

Arbeitsbereich Bauingenieurwesen
Betonwerk REKERS GmbH
in Kooperation mit der
Fachhochschule Münster

Alternative Bindemittel aus Betonbruch

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 34343 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Eckhardt Judith
Prof. Dr.-Ing. Jörg Harnisch
Prof. Dr.-Ing. Daniel Ufermann-Wallmeier

Juni 2021

1 Projektkennblatt

der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	34343	Referat	21/2	Fördersumme	109.545,00 €
Antragstitel		Alkalisch aktivierte Bindemittel			
Stichworte		Recycling, Betonbruch			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
2 Jahre	11.11.2018	30.10.2020	2		
Zwischenberichte		-			
Bewilligungsempfänger		REKERS Betonwerk GmbH & Co. KG Portlandstr. 15 48480 Spelle		Tel	05977/71-231
				Fax	05977/71-193
				Projektleitung Dipl.-Ing. (FH) Eckhard Judith	
				Bearbeiter Dipl.-Ing. (FH) Eckhard Judith	
Kooperationspartner		Fachhochschule Münster Fachbereich Bauingenieurwesen Labor für Baustoffe Prof. Dr.-Ing. Jörg Harnisch Externer Berater: Prof. Dr.-Ing. Daniel Ufermann-Wallmeier			

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Vor dem Hintergrund einer stetig wachsenden Weltbevölkerung und dem wirtschaftlichen Aufstreben vieler bevölkerungsreicher Schwellenländer stellt sich die dringliche Frage nach einem verantwortungsvollen und nachhaltigen Umgang mit den endlichen Ressourcen unseres Planeten.

Ein Baustein hierzu findet sich im zukünftigen Umgang mit dem weltweit derzeit am meisten verwendeten Baustoff – zementär gebundener Beton. Seine Herstellung macht rd. 5 bis 7 % des weltweiten, menschenverursachten CO₂-Ausstoßes aus und trägt damit maßgeblich zur globalen Erwärmung bei. Bei der Verwertung von Betonrecyklaten als hochwertige Baustoffkomponente besteht noch erhebliches Verbesserungspotenzial.

Vor diesem Hintergrund hat das vorliegende Forschungsprojekt der Fa. REKERS Betonwerk GmbH & Co. KG in Spelle in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Münster zum Ziel, Alternativen zur Herstellung von betonbasierten Baustoffen aufzuzeigen. Konkret wird im Projekt ein Betonpflasterstein entwickelt, dessen klinkerfreie Mörtelkomponente aus recyceltem Betonbrechsand des Produktionsausschusses der Fa. REKERS und einem geeigneten Metakaolin besteht. Durch die Substitution des CO₂-verursachenden Zementklinkers in diesem alternativen Beton soll das Treibhauspotential minimiert und natürliche Ressourcen geschont werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Das Projekt umfasst zwei Phasen. In der ersten Phase steht die Entwicklung eines alternativen alkalisch aktivierten Mörtels unter Einbezug der feinen Gesteinskörnung des Betonrecyclats der Fa. REKERS im Mittelpunkt. In der zweiten Phase wird hierauf aufbauend eine Betonrezeptur entwickelt, die gemäß den Vorgaben der Fa. REKERS auf die Herstellung von Pflastersteinen nach DIN 1338 hin optimiert wird.

Zur Bearbeitung der ersten Phase erfolgt zunächst die chemisch-physikalische Charakterisierung der Ausgangsstoffe für den alkalisch aktivierten Mörtel. Anschließend wird ein alkalisch aktiviertes Mörtelsystem mit einem möglichst hohen Anteil an recyceltem Betonbrechsand entwickelt.

Aufbauend auf den Erkenntnissen der ersten Phase wird in der zweiten Projektphase ein Beton mit einem möglichst hohen Brechsandanteil entworfen. Die Auswahl geeigneter Rezepturen basiert im ersten Schritt insbesondere auf den produktionsrelevanten Frischbetonkennwerten Grünstandfestigkeit und Formstabilität des Frischbetons. Die Festbetoneigenschaften dieser Rezepturen werden dann auf Grundlage des E-Moduls, der Druck- sowie Spaltzugfestigkeit und längenbezogenen Bruchlast charakterisiert.

Um die in der Praxis der Steinproduktion genutzten Methoden im Labor simulieren zu können, wird ein Verdichtungsverfahren für die Prüfkörper basierend auf der Proctormethode entwickelt.

Projektabschließend werden mit Hilfe einer „Einsteinmaschine“, welche die industriellen Produktionsbedingungen von Pflastersteinen simuliert, Steinprototypen hergestellt und den zuvor genannten Festbetonuntersuchungen unterzogen.

Ergebnisse und Diskussion

Aus der Phase 1 dieses Forschungsvorhabens ergeben sich die folgenden Ergebnisse:

- Die Mörtelversuche zur alkalischen Aktivierung des reinen Betonbrechsandes zeigen, dass es möglich ist, technisch sinnvoll verarbeitbare Frischmörtel zu entwickeln. Die Festmörtel Eigenschaften belegen jedoch, dass sich mit einem System aus reinem Betonbrechsand keine technisch nutzbringenden Festigkeiten erreichen lassen, was auf zu geringe Anteile amorpher Kieselsäuren und Aluminiumverbindungen zurückgeführt wird.
- Alkalisch aktivierte Hybridsysteme aus Betonbrechsand und Zement zeigen eine unzureichende Verarbeitbarkeit bei gleichzeitig geringen Druckfestigkeiten und sind somit zur Herstellung von Betonpflastersteinen ungeeignet.
- Weiterführende Untersuchungen an alkalisch aktivierten Hybridsystemen, basierend auf Kombinationen von Metakaolinen und dem recycelten Betonbrechsand, ergeben, dass sich hiermit Mörtel entwickeln lassen, welche neben einer guten Verarbeitbarkeit technisch nutzbare Festigkeiten aufweisen.

Die Untersuchungen in Phase 2 zur Entwicklung von Pflastersteinbetonen führen zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Es ist möglich, alkalisch aktivierte Betone herzustellen, die den Anforderungen an Verarbeitbarkeit und Grünstandfestigkeit in der Großproduktion genügen.
- Die Verdichtungsarbeit einer Großsteinmaschine konnte anhand eines selbstentwickelten Verdichtungsverfahrens auf Basis der Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Proctordichte nachgestellt werden.
- Aus den Untersuchungen ergeben sich zwei Betonzusammensetzungen, welche die definierten Kriterien zur Herstellung von Betonpflastersteinen nahezu vollständig erfüllen. Die Betone weisen technisch sinnvoll nutzbare Eigenschaften im Frisch- und Festbetonbereich auf und können der Güteklasse C25/30 zugeordnet werden.
- Im Vergleich zur hausintern geforderten Betongüte für die Pflastersteinproduktion der Fa. REKERS von C35/45 wird festgehalten, dass die alkalisch aktivierten Laborbetone diese teils nur geringfügig verfehlen, was auf einen zu hohen Luftporenanteil im Frischbeton zurückgeführt wird.
- In Bezug auf die derzeit im Werk der Fa. REKERS verwendete Rezeptur lässt sich ein deutliches CO₂-Einsparpotenzial von bis zu 49 % durch die Verwendung der alkalisch aktivierten Betone feststellen. Hieraus resultiert weiterhin eine maßgebliche Reduzierung des Einsatzes von natürlichen und nicht nachwachsenden Rohstoffen.

Die Prüfung der abschließend mit Hilfe der Laborbetone hergestellten Steinprototypen lässt die folgenden Schlussfolgerungen zu:

- Die Herstellung von Pflastersteinprototypen auf einer so genannten „Einsteinmaschine“ zeigt eindrucksvoll, dass die angewendeten Entwicklungsverfahren im Labor zu vergleichbaren Produktionsergebnissen führt, wie Sie auch auf der Großanlage erzielt werden.
- Die im Labormaßstab an der FH-Münster ermittelten Frisch- und Festbetonkennzahlen werden im halbindustriellen Versuchsmaßstab auf der „Einsteinmaschine“ vollumfänglich bestätigt.
- Die Variation der Nachbehandlungsschemata der Probekörper deutet auf ein bislang „ungenutztes“ Reaktionspotential der alkalisch aktivierten Betone mit hohen Betonbrechsandanteilen hin.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes erreichten Ergebnisse werden nun in anerkannten Fachzeitschriften sowie auf Fachtagungen veröffentlicht werden. Angestrebt werden hier Beiträge in: Betonwerk und Fertigteil-Technik, Beton und Stahlbeton, Beton, RECYCLING magazin, Baustoffrecycling + Deponietechnik die Beitragseinreichung bei anerkannten Tagungen wie der ibausil und dem Aachener Baustofftag.

Fazit

Die Arbeiten im Rahmen dieses Forschungsprojektes haben eindrucksvoll gezeigt, dass es möglich ist, alkalisch aktivierte Betone basierend auf Betonrecyclaten herzustellen, die den Herstellungsrandbedingungen auf einer Großanlage zur Betonsteinproduktion genügen.

Die normativ geforderten Spaltzugfestigkeiten und längenbezogenen Bruchlasten zur Pflastersteinherstellung konnten erreicht werden. Lediglich die betriebsintern geforderte Druckfestigkeit der Betongüte C35/45 wurde nicht zielsicher erreicht. Grundsätzlich können die in diesem Projekt entwickelten alkalisch aktivierten Betone als technisch sinnvoll nutzbare Baustoffe verstanden werden, die ein breites Anwendungsfeld in der Beton- und Betonwarenproduktion abdecken. Für den Einsatz im Verbundwerkstoff Stahlbeton sind weitere Forschungsarbeiten basierend auf dem hier vorliegenden Forschungsprojekt unbedingt notwendig.

Im Einzelnen müssen sich diese auf folgende Punkte konzentrieren:

- Neuentwicklung einer auf das alkalisch aktivierten System angepassten Sieblinie im Feinkornbereich des Betonbruchs zur Erzeugung eines optimalen Korngerüstes durch Einsatz neuartiger Aufbereitungstechniken.
- Darauf aufbauend die Entwicklung eines neuartigen, alkalisch aktivierten Bindemittelsystems durch den Einsatz aktivierbarer Pulverkomponenten und darauf abgestimmter Aktivatorlösungen.
- Neuentwicklung eines Betons mit einem geringeren Luftporengehalt und dadurch Steigerung der Festbetoneigenschaften.
- Die Variation der Nachbehandlungsschemata bei den Steinprototypen zeigt deutlich die Notwendigkeit zur Entwicklung abgestimmter Nachbehandlungskonzepte, um die bisher ungenutzten Reaktionspotentiale dieser Systeme vollständig ausschöpfen zu können. Hierunter ist auch der Einsatz hydrothermaler Härtungsprozesse zu verstehen.
- Das höchste Ziel muss die vollumfängliche Verwertung von Betonrecyclaten sowohl auf der Bindemittel- als auch auf der Gesteinskörnungsebene in neuen Betonen sein, um dem Gedanken des geschlossenen Stoffkreislaufes zu entsprechen

Inhalt

INHALT.....	II
ABBILDUNGEN	IV
TABELLEN	VI
BEGRIFFE	VII
2 ZUSAMMENFASSUNG.....	1
3 EINLEITUNG	2
3.1 Ausgangssituation und Zielsetzung.....	2
3.2 Aufgabenstellung	4
4 HAUPTTEIL.....	6
4.1 Chemisch – physikalische Charakterisierung der Ausgangsstoffe	6
4.1.1 Feinanteile des Betonbruchs - Betonbrechsand	6
4.1.2 Zement	10
4.1.3 Metakaolin	10
4.2 Entwicklung des alkalisch aktivierten Mörtelsystems.....	11
4.2.1 Mörtel aus Betonbrechsand	11
4.2.2 Hybridmörtel aus Betonbrechsand und Zement	15
4.2.3 Mörtel aus Betonbrechsand und Metakaolin.....	18
4.2.4 Auswahl geeigneter Mörtelrezepturen für den Betonmaßstab.....	22
4.3 Entwicklung eines alkalisch aktivierten Betons auf Basis von Betonbrechsand	23
4.3.1 Verdichtungsmethoden des Frischbetons	23
4.3.2 Hydraulisch gebundener Referenzbeton	24
4.3.3 Beton auf Basis eines alkalisch aktivierten Mörtels	30
4.4 Herstellung und Prüfung von Steinprototypen	49
4.4.1 Herstellung und Lagerung	49
4.4.2 Prüfung und Ergebnisse.....	50
4.5 Nachhaltigkeitsaspekte	55
5 FAZIT UND AUSBLICK.....	56
5.1 Fazit Stoffcharakterisierung und Mörtelentwicklung	56
5.2 Fazit Betonentwicklung	56
5.3 Fazit Herstellung von Steinprototypen	57
5.4 Ausblick	58

6	LITERATURVERZEICHNIS	60
	ANHANG A ERGEBNISSE DER MÖRTELVERSUCHE	A1
	ANHANG B ERGEBNISSE DER LABORBETONVERSUCHE.....	B1
	ANHANG C ERGEBNISSE STEINPROTOTYPEN.....	C1
	ANHANG D BERECHNUNGEN ZUM CO ₂ - ÄQUIVALENT	D1
	ANHANG E PRODUKTDATENBLÄTTER UND CHEMISCH-PHYSIKALISCHE ANALYSEN.....	E1

Abbildungen

Abbildung 1: Übersicht der Arbeitsschritte im Projekt	6
Abbildung 2: Korngrößenverteilung Betonbrechsand	7
Abbildung 3: Diffraktogramm (XRD) Betonbrechsand	9
Abbildung 4: Druckfestigkeiten alkalisch aktivierter Mörtel auf Basis von Betonbrechsand nach 7, 14 und 28 Tagen für Wasserglasmodule von 1,7 bis 2,2; Marker: Streubereich aus mini- malem und maximalem Einzelergebnis	13
Abbildung 5: Biegezugfestigkeiten alkalisch aktivierter Mörtel auf Basis von Betonbrechsand nach 7, 14 und 28 Tagen für Wasserglasmodule von 1,7 bis 2,2.....	13
Abbildung 6: 28 Tage alter Betonbrechsandmörtel nach 14-tägiger Wasserlagerung	14
Abbildung 7: Druckfestigkeit des Hybridmörtels aus Betonbrechsand und Zement nach 7, 14 und 28 Tagen mittels alkalischer Aktivierung und Wasseranregung.....	17
Abbildung 8: Biegezugfestigkeit des Hybridmörtels aus Betonbrechsand und Zement nach 7, 14 und 28 Tagen mittels alkalischer Aktivierung und Wasseranregung	17
Abbildung 9: Druckfestigkeit der Mörtelmischungen mit 100 % MetaVer R nach 7, 14 und 28 Tagen für Wasserglasmodule zwischen 1,7 und 2,0	20
Abbildung 10: Druckfestigkeit der Mörtelmischungen mit 100 % PowerPozz nach 7, 14 und 28 Tagen für Wasserglasmodule zwischen 1,7 und 2,0	20
Abbildung 11: Druckfestigkeit der Mörtelmischungen mit 75 % PowerPozz nach 7, 14 und 28 Tagen für Wasserglasmodule zwischen 1,7 und 2,0	21
Abbildung 12: Druckfestigkeit der Mörtelmischungen mit 50 % PowerPozz nach 7, 14 und 28 Tagen für Wasserglasmodule zwischen 1,7 und 2,0	21
Abbildung 13: Verdichtung mittels Instron B503.....	23
Abbildung 14: Verdichtung in Anlehnung an den Proctorversuch.....	24
Abbildung 15: Konsistenz des Referenzbetons nach dem Anmischen	25
Abbildung 16: Konsistenz des Referenzbetons nach Zusammendrücken in der Faust.....	25
Abbildung 17: Ausgeschalter Referenzbeton nach der Instron-Verdichtung	26
Abbildung 18: Druckfestigkeiten Referenzbeton Instron-Verdichtung (links) und Proctor-Verdichtung (rechts)	27
Abbildung 19: Spaltzugfestigkeiten Referenzbeton Instron-Verdichtung (links) und Proctor-Verdichtung (rechts)	27
Abbildung 20: Längenbezogene Bruchlasten Referenzbeton Instron-Verdichtung (links) und Proctor-Verdichtung (rechts).....	28
Abbildung 21: Versuchsreihe 01.01: Betonproben direkt nach dem Ausschalen (links: 5,5; mittig: 5,3; rechts: 5,1)	34
Abbildung 22: Versuchsreihe 01.03: Betonproben nach dem Ausschalen (links: 7,3 und rechts: 7,1)	35
Abbildung 23: Versuchsreihe 01.04: Betonproben direkt nach dem Ausschalen (links: 5,2; mittig: 5,6; rechts: 6,0)	35
Abbildung 24: Entwicklung der Druckfestigkeiten des Betons Nr.1 mit Proctor-Verdichtung	37
Abbildung 25: Entwicklung der Spaltzugfestigkeit des Beton Nr.1 nach 14 und 28 Tagen	37
Abbildung 26: Entwicklung der längenbezogenen Bruchlast des Betons Nr.1 nach 14 und 28 Tagen	38
Abbildung 27: Knetversuch der Versuchsreihen Beton Nr.2 (von links nach rechts) 1,1_5,0; 0,9_5,6; 1,3_5,9; 1,0_5,6	40
Abbildung 28: Zusammengefallener Beton WGM1,9_40/60_1,1_6,3 nach dem Ausschalen	44
Abbildung 29: Favorisierte Betonproben der Versuchsreihe 03.02 nach dem Ausschalen mit G/BMG-Verhältnissen von 6,0; 5,8; 5,5	44
Abbildung 30: Die drei favorisierten Betonproben nach dem Ausschalen (6,8; 6,6; 6,4)	45
Abbildung 31: 28-d-Druckfestigkeit Beton Nr.3	46
Abbildung 32: 28-d-Spaltzugfestigkeit des Betons Nr.3	47
Abbildung 33: 28-d-längenbezogene Bruchlast des Betons Nr.3	47

Abbildung 34: Vorderansicht (links) und Detailansicht (rechts) der Einsteinmaschine zur Prototypenherstellung	49
Abbildung 35: Auf- (links) und Seitenansicht (rechts) eines Pflastersteinprototyps direkt nach dem Ausschalen	50
Abbildung 36: Mittlere Trockenrohdichten (Säulen) der Steinprototypen und aus den Laborversuchen, Marker: Streubereich aus minimalem und maximalem Messergebnis	51
Abbildung 37: Mittlere Wassergehalte nach 28 Tagen (orange: lufttrocken), und nach 42 Tagen (blau: wassergesättigt), Marker: Streubereich aus minimalem und maximalem Messergebnis	51
Abbildung 38: Mittlere Druckfestigkeiten nach 28 Tagen (orange: Prototyp, lufttrocken; grau: Laborbeton, lufttrocken), und nach 42 Tagen (blau: atmosphärisch wassergesättigt), Marker: Streubereich aus minimalem und maximalem Messergebnis	52
Abbildung 39: Mittlere Spaltzugfestigkeiten nach 28 Tagen (orange: Prototyp, lufttrocken; grau: Laborbeton, lufttrocken), und nach 42 Tagen (blau: atmosphärisch wassergesättigt), Marker: Streubereich aus minimalem und maximalem Messergebnis	54
Abbildung 40: CO ₂ -Äquivalente in kg CO ₂ pro Kubikmeter Beton	55

Tabellen

Tabelle 1: Elementanalyse (XRF) Betonbrechsand in M.-%	8
Tabelle 2: Kristallphasen Betonbrechsand in M.-%.....	9
Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung, Dichte und pH-Wert der Natriumwasserglaslösung (Herstellerangaben)	10
Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung, Dichte und Farbe des Metakaolins MetaVer R10	
Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung, Dichte und Farbe des Metakaolins PowerPozz11	
Tabelle 6: Anforderungsbereich der Frisch- und Festmörtelkennzahlen	11
Tabelle 7: Prüfmatrix Betonbrechsand	12
Tabelle 8: Verarbeitungszeit der Betonbrechsandmörtel für Wasserglasmodule von 1,7 bis 3,3.....	12
Tabelle 9: Prüfmatrix der Hybridmörtel aus Betonbrechsand und Portlandzement	15
Tabelle 10: Verarbeitungszeit des mittels Aktivatorlösung (WGM 2,2) angeregten Hybridmörtels aus Betonbrechsand und Zement	16
Tabelle 11: Prüfmatrix der Mörtel aus Betonbrechsand und Metakaolin.....	19
Tabelle 12: Gegenüberstellung der Festmörteleigenschaften ausgewählter Mörtelrezepturen	22
Tabelle 13: Zusammensetzung des hydraulisch gebundenen Referenzbetons	25
Tabelle 14: Anforderungsbereich für die alkalisch aktivierten Betone.....	30
Tabelle 15: Bezeichnung und Massenverhältnisse der alkalisch aktivierten Betone	30
Tabelle 16: Versuchsreihen des Betons Nr.1	31
Tabelle 17: Ausgewählte Rezepturen der Versuchsreihe 01.01	32
Tabelle 18: Ausgewählte Rezepturen der Versuchsreihe 01.03	33
Tabelle 19: Ausgewählte Rezepturen der Versuchsreihe 01.04	33
Tabelle 20: Ausgewählte Versuchsserien der Reihen 01.01 bis 01.04 zur Bestimmung der Grünstandfestigkeit.....	34
Tabelle 21: Gegenüberstellung des Anforderungsbereiches und der ermittelten Kennzahlen für den Beton Nr.1	38
Tabelle 22: Versuchsreihen des Beton Nr.2	39
Tabelle 23: Versuchsreihen Beton Nr.3	41
Tabelle 24: Ausgewählte Rezeptur der Versuchsreihe 03.01	41
Tabelle 25: Ausgewählte Rezepturen der Versuchsreihe 03.02	42
Tabelle 26: Ausgewählte Rezepturen der Versuchsreihe 03.03	43
Tabelle 27: Ausgewählte Versuchsserien der Reihen 03.01 bis 03.03 zur Bestimmung der Grünstandfestigkeit.....	43
Tabelle 28: Gegenüberstellung des Anforderungsbereiches und den ermittelten Kennzahlen für den Beton Nr.3	48

Begriffe

AL/BMG	Verhältnis von Aktivatorlösung zu Betonbrechsand-Metakaolin-Gemisch [kg/kg]
AL/B	Verhältnis von Aktivatorlösung zu Betonbrechsand [M.-%/M.-%]
B/M	Verhältnis von Betonbrechsand zu Metakaolin [M.-%/M.-%]
BMG	Betonbrechsand-Metakaolin-Gemisch
B	Betonbrechsand
B/Z	Verhältnis von Betonbrechsand zu Zement [M.-%/M.-%]
BZG	Betonbrechsand-Zement-Gemisch
CEM I	Portlandzement nach EN 197-1
d ₉₅	Bezeichnet die Korngröße bei 95 % Siebdurchgang
G	Gesteinskörnung
G/BMG	Verhältnis von Gesteinskörnung zu Betonbrechsand-Metakaolin-Gemisch [kg/kg]
MK	Metakaolin
NS	CEN-Normsand nach EN 196-1
w/z-Wert	Wasser-Zement-Wert, Verhältnis von Wasser zu Zement [kg/kg]
WG	Wasserglaslösung, Natriumsilikatlösung
WGM	Wasserglasmodul bezeichnet als molares Verhältnis von SiO ₂ /Na ₂ O [-]
XRD	X-ray diffraction, dt. Röntgendiffraktometrie
XRF	X-ray fluorescence spectroscopy, dt. Röntgenfluoreszenzanalyse
Z	Zement

2 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund einer stetig wachsenden Weltbevölkerung und dem wirtschaftlichen Aufstreben vieler bevölkerungsreicher Schwellenländer stellt sich mehr denn je die dringliche Frage nach einem verantwortungsvollen und nachhaltigen Umgang mit den endlichen Ressourcen unseres Planeten.

Ein Baustein hierzu findet sich im zukünftige Umgang mit dem weltweit derzeit am meisten verwendeten Baustoff – zementär gebundener Beton. Denn seine Herstellung macht rd. 5 bis 7 % des weltweiten, menschenverursachten CO₂-Ausstoßes aus und trägt damit maßgeblich zur globalen Erwärmung bei. Aber auch bei der Verwertung des Baustoffes im Sinne eines geschlossenen Stoffkreislaufes bestehen weiter Lücken, die es zukünftig zu schließen gilt.

Vor diesem Hintergrund hat das vorliegende Forschungsprojekt der Fa. REKERS Betonwerk GmbH & Co. KG in Spelle in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Münster zum Ziel, Alternativen zur Herstellung von betonbasierten Baustoffen aufzuzeigen. Konkret wird im Projekt ein Betonpflasterstein entwickelt, welcher aus einem klinkerfreien Bindemittel, basierend auf Betonbrechsand aus dem Produktionsausschuss der Fa. REKERS, und einem geeigneten Metakaolin besteht.

Die Untersuchungen auf dem Bindemittel- und Mörtelmaßstab zeigen, dass sich ein alkalisch aktivierbarer Mörtel mit technisch nutzbaren Festigkeiten auf alleiniger Basis von Betonbrechsand nicht realisieren lässt.

Dies führte zur Entwicklung hybrider Mörtel, wobei sich zeigt, dass sich unter Verwendung eines silizium- und aluminatreichen Metakaolins alkalisch aktivierbare Mörtel herstellen lassen, die bei guter Verarbeitbarkeit Festmörtel Eigenschaften aufweisen, die mit jenen herkömmlicher zementärer Systeme vergleichbar sind.

So zeigen Mörtel mit einem Verhältnis von Betonbrechsand und Metakaolin von 1:1 nach 28 Tagen Druckfestigkeiten von bis zu 45,9 N/mm² bei Biegezugfestigkeiten von bis zu 6,9 N/mm². Bei Verhältnissen von 1:3 können gar Druckfestigkeiten bis 69 N/mm² bei Biegezugfestigkeiten bis zu 10,3 N/mm² erreicht werden.

Die auf diesen Mörteln aufbauende Betonentwicklung zeigt, dass sich klinkerfreie Betone herstellen lassen, welche die Verarbeitungsvorgaben der Fa. REKERS zur Produktion von Betonpflastersteinen auf Großmaschinen erfüllen.

So wird unter Verwendung eines Verhältnisses zwischen Betonbrechsand und Metakaolin von 1:1,5 ein Beton entwickelt, der mittlere 28-Tage-Spaltzugfestigkeiten von rd. 2,95 N/mm² erreicht. Eine Erhöhung des Metakaolinanteils auf ein Verhältnis von 1:3 führt hierbei zu Spaltzugfestigkeiten von 3,8 N/mm², welche die hohen normativen Anforderungen an einen Betonpflasterstein erfüllen. Aus den Versuchsreihen wird weiter deutlich, dass durch eine weitere Optimierung der Rezepturformulierung bessere Verhältnisse von Betonbrechsand und Metakaolin im Hinblick auf die CO₂-Bilanz erreicht werden können, ohne die normativen Anforderungen zu vernachlässigen.

Die Herstellung von Betonpflastersteinprototypen auf einer „Einsteinmaschine“ zur Simulation der Randbedingungen auf der Großanlage zeigen eindrücklich, dass die im Labor für Baustoffe der FH Münster entwickelten Herstellungs- und Verdichtungsverfahren die Bedingungen in der Praxis sehr gut widerspiegeln.

Eine CO₂-Bilanzierung zeigt, dass bei einem Verhältnis zwischen Betonbrechsand und Metakaolin von 1:3 bis zu 43 M.-% CO₂ gegenüber des derzeitig eingesetzten zementären Systems eingespart werden können. Eine weitere Steigerung des Betonbrechsandanteils führt bei sinnvollen technischen Eigenschaften zur einer weiteren Reduzierung der CO₂-Emissionen von rd. 49 M.-%. Die Arbeiten zeigen eindrucksvoll, dass jede weitere Reduzierung des Metakaolinanteils bzw. ein Wechsel zu reaktionsfreudigen Nebenprodukten mit günstigerem CO₂-Abdruck diese Bilanz bei dem derzeitigen Produktionsstandard noch weiter verbessert, was Ziel der weiteren Forschung sein muss.

3 Einleitung

In den vergangenen fast 100 Jahren der Firmengeschichte hat sich das mittelständische Familienunternehmen REKERS Betonwerk mit heute über 700 eigenen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern an vier deutschen Standorten zu einem der leistungsfähigsten Anbieter von Betonprodukten in Deutschland entwickelt.

Im Rahmen der Betonproduktion in den verschiedenen Produktionssegmenten sind „Übermengen“ an Frischbeton, sowie eine gewisse Ausschussmenge an Festbeton unvermeidbar. So fallen alleine am Produktionsstandort in Spelle jährlich rd. 26.000 Tonnen an reinem, hochwertigen Restbeton an, welcher nach entsprechenden Aufbereitungsprozessen heute fast ausschließlich für technisch weitgehend unregelmäßige Anwendungen eingesetzt wird. Dies trifft vor allem für aufbereitete Recyclatkörnungen mit einem Korndurchmesser von größer als 2 mm zu. Derzeit kaum Verwendung findet dahingehen der Feinanteil mit Kornfraktionen unter 2 mm.

Das in diesen Fraktionen liegende Potenzial zur Herstellung neuer Betonprodukte wird derzeit aufgrund fehlender Erkenntnisse im Hinblick auf die Auswirkungen auf maßgebliche Frisch- und Festbetoneigenschaften noch nicht genutzt.

Ziel ist es, den hohen Anteil an „gespeicherter“, grauer Energie im Restbeton möglichst ganzheitlich zu nutzen, indem der Feinanteil eines entsprechend gebrochenen Restbetons als Bindemittel in der Produktion wiederverwendet werden kann. Dies würde den Einsatz von Portlandzement und Zusatzstoffen wie z. B. Flugasche zur Herstellung neuer Betonzeugnisse weiter reduzieren und gleichzeitig den Restbetonanfall minimieren. Als Ergebnis ergibt sich eine deutliche Verbesserung der Ökobilanz des Produktionsprozesses von Betonbauteilen.

Für große betonproduzierende Unternehmen ist es mehr als drängend nach alternativen Bindemittelsystemen zu suchen und diese selbstständig umzusetzen, da wichtige Ressourcen, auf welche die Betonindustrie zurückgreift, in absehbarer Zeit erschöpft sein werden. Um in Zukunft das Potenzial des Baustoffes Beton voll ausschöpfen zu können, müssen neue Möglichkeiten gefunden werden, die das derzeitige Niveau bezüglich Nachhaltigkeit und technischer Nutzbarkeit von Betonrecyclaten deutlich übertreffen. Hier setzt das im Folgenden bearbeitete Projekt an.

3.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Der notwendige Brennprozess zur Erstellung einer Tonne Portlandzementklinker setzt rd. eine Tonne CO₂ frei [Har07] und ist für rd. 5 bis 7 % des jährlichen weltweiten CO₂-Ausstoßes verantwortlich [Met01]. Der sehr hohe Energieeinsatz (graue Energie) zur Herstellung von einer Tonne Portlandzement mit etwa 4300 MJ entspricht etwa dem durchschnittlichen Energieverbrauch eines Vier-Personenhaushaltes in drei Monaten [Int01]. Durch die generelle Forderung der Senkung der CO₂-Emissionen ist die zementproduzierende Industrie aufgefordert, durch energieeffizientere Prozesse sowie insbesondere durch die Absenkung des eigentlichen Portlandzementklinkergehaltes durch Einsatz von z. B. Hüttensand, Kalkstein (ungebrannt) oder Flugasche den Ausstoß von CO₂ im Rahmen ihrer Produktion zu reduzieren. Diesem Ansinnen steht allerdings entgegen, dass die vorgenannten Ersatzstoffe in Zukunft nicht mehr in den dafür erforderlichen Mengen und Qualitäten zur Verfügung stehen werden.

Durch die positiven Entwicklungen im Bereich der erneuerbaren Energiequellen sind z. B. die anfallenden Flugaschemengen - aus der Steinkohleverstromung - stark rückläufig. Bis 2022 ist mit einem deutlichen Rückgang der verfügbaren Mengen an Steinkohlenflugasche in Deutschland von derzeit etwa 2,6 Mio. Tonnen pro Jahr zu rechnen [Int02]. Ferner zeichnet sich in den letzten Jahren ein leichter Rückgang in der Rohstahlproduktion ab [Int03], welche die Grundlage zur Herstellung von Hüttensandmehl ist. Da bereits heute die gesamten Mengen an Steinkohlenflugasche und Hüttensand in der Zement- bzw. Betonindustrie verwertet werden, ist es unabdingbar, der Bauindustrie Alternativen zum portland- und hüttensandbasierten Zement als Bindemittel von Beton zur Verfügung zu stellen.

Um die bereits vorhandene und sich weiter vergrößernde Materialknappheit zur Herstellung der benötigten Bindemittelmengen für den Betonbau kompensieren zu können, müsste der Einsatz von Portlandzementklinker als Hauptbindemittelkomponente wieder deutlich erhöht werden. Eine alleinige Reduktion des Bindemittelgehaltes auf Basis von Zementklinker in Betonen erscheint nicht zielführend, da aus technischer Sicht bestimmte Mindestbindemittelgehalte im Beton eingehalten werden müssen [Reg01]. Diese Mindestgehalte werden bereits heute im Rahmen der technischen Möglichkeiten nahezu ausgeschöpft. Es müssen daher alternative Bindemittelsysteme entwickelt werden, um die sich anbahnende Versorgungslücke mit hochwertigen Bindemitteln auf technisch vergleichbarem Niveau zu schließen. Im Sinne der Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung müssen diese alternativen Bindemittel auf Baustoffrecyclaten basieren.

Alternativ zu klassischen Zementen auf Basis von Portlandzementklinker ist es möglich, Bindemittel auf Basis von alkalisch aktivierbaren mineralischen Stoffen mit einem um 20 bis 80 % niedrigeren CO₂-Aufkommen herzustellen [Zai17, Mce11].

Jeder geeignete Ausgangsstoff zur alkalischen Aktivierung enthält eine amorphe, reaktive Komponente („energetische Phase“). Die alkalische Anregung dieser Stoffe erfolgt z. B. über Natron- bzw. Kaliumwasserglaslösungen. Aufgrund der sehr guten Aktivierbarkeit werden derzeit hauptsächlich die begrenzt verfügbaren Hochofenschlacken [Kri03, Pac08], und Steinkohlenflugaschen [Ste09] als Ausgangsstoffe der alternativen Bindemittel eingesetzt. Aber auch Metakaoline [Kue12] sind grundsätzlich geeignet, um alkalisch aktiviert als Bindemittel zu fungieren.

Der Reaktionsprozess der alkalischen Aktivierung lässt sich grundsätzlich in zwei Phasen einteilen. Die erste Phase wird als „Löseprozess“ bezeichnet. Abhängig vom pulverförmigen Ausgangsstoff gehen durch die Zugabe des alkalischen Anregers reaktives SiO₂ und Al₂O₃ in Lösung und bilden mineralische Monomere bzw. Oligomere. In der anschließenden zweiten Phase setzt auf Basis einer Polykondensation - unter Abspaltung von Wasser - ein Erstarren und Verfestigen des Bindemittels ein. Wiederum in Abhängigkeit von den gewählten Ausgangsstoffen bilden sich z. B. festigkeitsbildende alumosilikatische Netzwerke aus.

Der Vorteil der Nutzung des Betonbruchs im Betonentwurf ist von Politik und Wirtschaft bereits erkannt worden. Dem Sinn des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung aufgegebenen Forschungsprojektes „R-Beton (Ressourcenschonender Beton Werkstoff der nächsten Generation)“ nach sind mineralische Bauabfälle als Rohstofflager aus Altbaustoffen zu betrachten und ihrem Nutzungspotenzial entsprechend als hochwertige Werkstoffe einzusetzen [Int04]. In Nachbarländern wie beispielsweise der Schweiz sieht die nationale Norm einen Mindestgehalt an Beton- und Mischbruch an der Gesteinskörnung > 2 mm von 25 M.-% für Recyclingbetone vor [Str12, Sch11]. Tatsächlich liegt der Einsatz von Betonbruch bei rd. 40 bis 70 M.-% der Gesteinskörnung > 2 mm [Str12]. Diese werden mittlerweile als gängige Alternative zum herkömmlichen Beton mit normaler Gesteinskörnung verwendet. Im Vergleich zur Schweiz sind die finanziellen und regulatorischen Hürden zum Einsatz von recycelter Gesteinskörnung in Deutschland deutlich höher, weswegen ein allgemeiner Einsatz in der Praxis derzeit nicht stattfindet.

Die Nutzung der Feianteile des Betonbruches < 2 mm wird bisher noch nicht aktiv angegangen. Diese Fraktion gilt aufgrund ihres nicht bekannten Einflusses auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften für die Herstellung von RC-Beton als risikoreich und wird bislang zumeist entsorgt. Um in Zukunft das Potential des Baustoffes Beton vollumfänglich ausschöpfen zu können, müssen daher neue Möglichkeiten der nachhaltigen und technischen Nutzbarkeit auch von feinkörnigen Betonrecyclaten gefunden werden.

Vor dem geschilderten Hintergrund besteht die Zielsetzung dieses Forschungsprojektes darin, den bislang nicht verwendeten Feianteil einer recycelten Gesteinskörnung aus Beton zur Entwicklung eines alternativen Bindemittels bzw. Mörtels einzusetzen, um die Nachhaltigkeit des Baustoffes Beton weiter zu optimieren. Neben der vollständigen Welterverwertung aller Kornfraktionen des Betonrecyclats in hochwertigen Anwendungen wird hierdurch eine Reduzierung der CO₂-Emissionen grundsätzlich möglich.

Das Projektziel verfolgt die Entwicklung eines normkonformen Betonpflastersteins gemäß DIN EN 1338. Hierbei soll ein alternativer Beton zur Anwendung kommen, welcher auf Basis eines alkalisch aktivierten Bindemittels/Mörtels sowie unter Verwendung des Feinanteils einer recycelten Betongesteinskörnung entwickelt wird.

3.2 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung umfasst zwei Entwicklungsphasen. In der ersten Phase steht die Entwicklung eines alternativen alkalisch aktivierten Bindemittels bzw. Mörtels unter Einbezug der feinen Gesteinskörnung des Betonrecyclats der Fa. REKERS im Mittelpunkt.

In der zweiten Phase wird hierauf aufbauend eine Betonrezeptur entwickelt, welche gemäß den Vorgaben der Fa. REKERS für die Herstellung von Pflastersteinen optimiert wird. Beide Phasen werden nachfolgend kurz beschrieben.

Phase 1: Charakterisierung der Ausgangsstoffe und Mörtelentwicklung

Zunächst werden alle notwendigen Ausgangsstoffe zur Herstellung des alternativen Mörtels chemisch-physikalisch charakterisiert. Die relevanten Materialkennwerte des Feinanteils des Betonrecyclats (im Folgenden auch als „Betonbrechsand“ bezeichnet) werden dabei in eigenen Laboruntersuchungen ermittelt.

Feinanteil aus dem Betonrecyclat („Betonbrechsand“)

Der Feinanteil des Betonrecyclats für dieses Forschungsvorhaben stammt ausnahmslos aus der Produktion des Betonwerks REKERS in Spelle. Die verwendete Kornfraktion entspricht dabei der Korngruppe 0/0,5. Die Lagerung des Materials erfolgt in luftdicht verschlossenen Behältern. An der Feinkornfraktion werden die physikalischen Eigenschaften, wie z. B. die Mahlfineinheit, die Rohdichte und die Korngrößenverteilung bestimmt. Weiterhin wird die mineralogische Zusammensetzung mittels XRF und XRD charakterisiert.

Reaktive Pulverkomponenten

In Anlehnung an die Charakterisierung des Betonbrechsandes werden weiterhin reaktive Pulverkomponenten wie Portlandzement und Metakaolin im Forschungsprojekt eingesetzt und entsprechend charakterisiert.

Aktivatorlösung

Als Aktivator wird eine Natriumsilikatlösung verwendet. Die gewünschten Wasserglasmodule werden dabei über die Zugabe von Natriumhydroxid eingestellt.

Entwicklung des alternativen Mörtels

In Vorversuchen werden auf Basis der charakterisierten Ausgangsstoffe Mörtelvarianten untersucht, um wichtige Erkenntnisse zu späteren Baustoffeigenschaften, wie der Verarbeitbarkeit und der Festigkeitsentwicklung, zu gewinnen.

Anhand der Verarbeitbarkeit und der Festigkeitsentwicklung werden das weitere Untersuchungsprogramm und die Möglichkeiten der stofflichen Optimierung abgeleitet.

Bei der Mörtelentwicklung werden folgende Ansätze verfolgt:

Ansatz 1:

Entwicklung eines Mörtels basierend auf dem Betonbrechsand.

Ansatz 2:

Entwicklung eines Mörtels basierend auf einer optimalen Mischung aus Betonbrechsand und einer optionalen Zugabe von Zement bzw. Metakaolin.

Die Mörtel aus Ansatz 2 werden auch als Hybridsystem bezeichnet. Zur Charakterisierung der Frisch- und Festmörteleigenschaften dieser Formulierungen werden Frischmörtelversuche zur Haptik und Verarbeitungszeit des Materials, sowie Festmörtelversuche zur Bestimmung der Druck- und Biegezugfestigkeiten in Anlehnung an gängige Zementprüfverfahren durchgeführt.

Phase 2: Entwicklung eines Pflastersteinbetons sowie eines Verdichtungsverfahrens zur Erstellung von Steinprototypen

Entwicklung eines Pflastersteinbetons

Auf Basis der im Mörtelmaßstab identifizierten Rezepturen wird durch gezielte Zugabe von Gesteinskörnung bis 8 mm Größtkorn der Übergang zum Betonmaßstab vorgenommen. Hier wird der Fokus auf die Konsistenz des Frischbetons (Grünstandfestigkeit, Formstabilität) gelegt. Die Bewertung der Festbetoneigenschaften erfolgt auf Grundlage des E-Moduls, der Druck- sowie Spaltzugfestigkeit und längenbezogenen Bruchlast. Die Verdichtung des Frischbetons im Betonmaßstab erfolgt mittels eines Verdichtungsverfahrens, welches ebenfalls in dieser Phase entwickelt wird.

Entwicklung eines Verdichtungsverfahrens

Um die realen Verhältnisse der Steinproduktion (Rüttelpressverfahren) im Labor möglichst genau zu simulieren, wird ein hierauf abgestimmtes Verdichtungsverfahren entwickelt. In diesem wird der Frischbeton mittels Druck und gleichzeitiger Vibration einer definierten Verdichtungsleistung ausgesetzt. Mit Hilfe dieses Verdichtungsverfahrens werden wichtige Erkenntnisse zum Verdichtungsverhalten des Frischbetons gewonnen, was Rückschlüsse auf die spätere Übertragbarkeit der Laborversuche auf die Serienproduktion auf der Großanlage zulässt.

Erstellung von Steinprototypen

Basierend auf der optimalen Betonzusammensetzung aus den Laborversuchen werden in einer so genannten „Einsteinmaschine“ Betonpflastersteinprototypen hergestellt. Hierbei sowohl die Verarbeitbarkeit des entwickelten Frischbetons in der Maschine als auch die erzielten Festbetoneigenschaften der erstellten Prototypen im Fokus der Untersuchungen.

4 Hauptteil

Im Folgenden werden die in der Aufgabenstellung, vgl. Kap 3.2, beschriebenen Arbeitsschritte dargestellt und die zugehörigen Untersuchungsergebnisse bewertet. Abbildung 1 fasst die in Kap. 3.2 beschriebene Vorgehensweise zur besseren Übersicht noch einmal verkürzt zusammen.

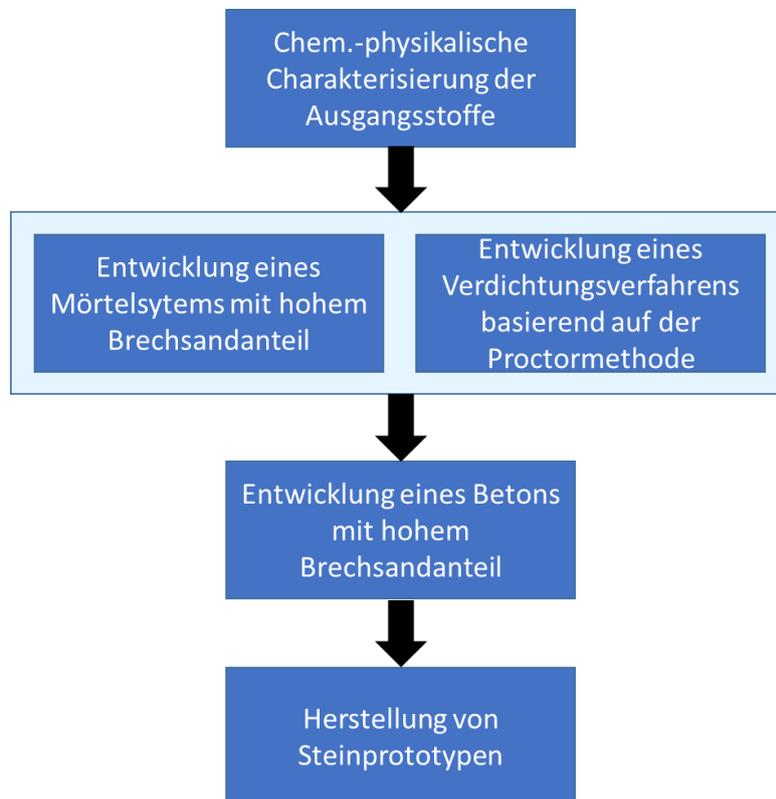


Abbildung 1: Übersicht der Arbeitsschritte im Projekt

4.1 Chemisch – physikalische Charakterisierung der Ausgangsstoffe

Zu Beginn des Projektes wurden der verwendete Betonbruch, die Aktivatorlösung (Natriumsilikatlösung) und die weiteren Pulverkomponenten Zement und Metakaolin hinsichtlich ihrer chemisch-physikalischen Eigenschaften in Hinblick auf die alkalische Aktivierbarkeit charakterisiert.

4.1.1 Feinanteile des Betonbruchs - Betonbrechsand

Der als Betonbruch bezeichnete Produktionsausschuss wurde zunächst mit einer industriellen Großanlage auf eine Korngröße von ≤ 4 mm gebrochen. Anschließend wurde der Betonbrechsand im Labor auf $< 0,5$ mm gesiebt. Für die Mörtelversuche wurde lediglich der Anteil $< 0,5$ mm verwendet. Die Prämisse bestand darin, so wenig zusätzlichen Aufwand wie möglich in den Aufbereitungsprozess zu investieren, und das Material entsprechend der derzeitigen technischen Möglichkeiten vor Ort aufzubereiten und einzusetzen. Die Korngröße von $0,5$ mm stellt einen Kompromiss zwischen einem typischen Zement mit einer Korngröße von $d_{95}=0,1$ mm und einem typischen Sand mit einer Korngröße von $d_{95}=2$ mm dar.

4.1.1.1 Sieblinie

Die Kornverteilung wurde mittels Sieb- und Schlämmanalyse in Anlehnung an DIN EN ISO 17892-4 [Reg02] ermittelt. Das Ergebnis ist in nachstehender Abbildung 2 dargestellt.

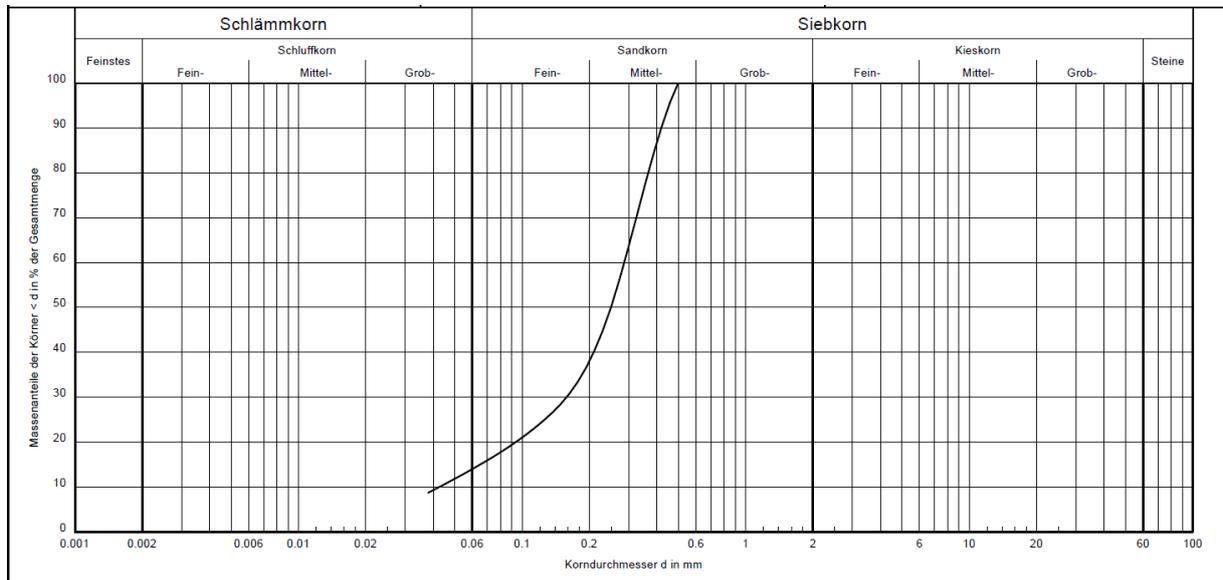


Abbildung 2: Korngrößenverteilung Betonbrechsand

Der Abbildung 2 ist zu entnehmen, dass der Brechsand einen Feinkornanteil von rund 22 M.-% mit einem Größtkorn von weniger als 100 µm aufweist. Überträgt man diese Sieblinie gedanklich in einen Betonmaßstab, entspricht das Körnungsband des Sandes einer üblichen Betonsieblinie mit einem Mehlkornanteil (< 100 µm) von rund 20 % und einem Anteil feiner und grober Gesteinskörnung von etwa 80 %.

4.1.1.2 Rohdichte

Die Bestimmung der Kornrohddichte erfolgte mittels Pyknometer in Anlehnung an DIN EN ISO 17892-3. [Reg03].

Die Dichte des Betonbruchsandes wurde damit zu 2,69 g/cm³ bestimmt. Diese liegt zwischen der Rohdichte eines typischen Portlandzementes mit einer Rohdichte von etwa 3,0 g/cm³ und einer üblichen Rohdichte für Gesteinskörnung von etwa 2,65 g/cm³. Die Einzelergebnisse zur Bestimmung der Rohdichte sind in Anlage D, Tabelle D1 dargestellt.

4.1.1.3 Chemische Zusammensetzung mittels Röntgenfluoreszenz- (XRF) und Strukturanalyse mittels Röntgendiffraktometrie (XRD)

Die Elementzusammensetzung des Betonbruchsandes erfolgte nach entsprechender Präparation mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse (im Folgenden XRF). Aus dem Spektrum der XRF können Rückschlüsse auf die elementare Zusammensetzung der Probe gezogen werden. Sie gibt allerdings keine näheren Informationen zum strukturellen Aufbau der identifizierten Elemente (kristalline oder amorphe Phasen).

Hierzu wurde die Probe in einem weiteren Schritt mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie (im Folgenden XRD) untersucht. Bei dieser Röntgenbeugungsmethode wird die Probe in einer Versuchsanordnung ebenfalls mit Röntgenstrahlung beaufschlagt. In Abhängigkeit der Kristallstruktur wird der Röntgenstrahl in spezifischen Winkeln abgelenkt, was auf einer Fotoplatte ein Beugungsmuster hinterlässt.

Das Beugungsmuster ist phasenspezifisch und wird anschließend mit einer Datenbank abgeglichen. Die Zuordnung ist nicht immer eindeutig, da einige Muster eine sehr hohe Ähnlichkeit zueinander besitzen und bei der Messung Störfaktoren auftreten. Es ist daher nicht immer eine eindeutige Phasenidentifizierung möglich, weshalb das Ergebnis qualitativ zu betrachten ist. Das Ergebnis wird als Diffraktogramm festgehalten. Dieses zeigt die Häufigkeit der jeweiligen Beugungsmuster in der Probe und ist somit ein Indikator für die enthaltene Menge der jeweiligen kristallinen Phase.

Für die Analyse der mineralogischen Zusammensetzung wurden insgesamt sechs Proben aus unterschiedlichen Bruchchargen untersucht. Auf diese Weise wurde deutlich, wie groß die Streuung zwischen den Bruchchargen ist. Tabelle 1 zeigt die chemische Zusammensetzung des Betonbruchsandes, wobei die Streuung als Differenz zwischen maximalem und minimalem Wert in Massenprozent angegeben wird.

Tabelle 1: Elementanalyse (XRF) Betonbrechsand in M.-%

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Minimum	56,572	0,189	4,246	1,627	0,042	0,41	14,884	0,791	1,061
Maximum	72,644	0,285	5,099	2,063	0,061	0,7	20,658	1,196	1,145
Streubreite	16,072	0,096	0,853	0,436	0,019	0,29	5,774	0,405	0,084
Mittelwert	65,305	0,251	4,731	1,884	0,052	0,567	17,264	1,013	1,013

Die Streuung in den Analyseergebnissen ist u. a. der Herkunft des Betonbruchs, welcher auf verschiedenen Produktionsserien mit unterschiedlichen Rezepturen basiert, geschuldet. Besonders beim SiO₂-Gehalt ist dies anhand der vorliegenden Streubreite deutlich zu erkennen. Aus diesem Grund wurde für die weiteren Betrachtungen im Projekt der Mittelwert der festgestellten Elementquantitäten verwendet.

Für die Ausbildung der Festigkeiten in alkalisch aktivierten Systemen sind vor allem die Oxidverbindungen der Elemente Silizium, Aluminium und Calcium ausschlaggebend. Diese müssen in amorpher Struktur vorliegen, um alumosilikatische Netzwerke zu erzeugen.

Um die vorliegende Struktur zu identifizieren, wurde der Betonbrechsand in einem nächsten Schritt hinsichtlich seiner Phasenzusammensetzung untersucht. Es ist zu beachten, dass das Diffraktogramm die Messanzahl der Phasen als „counts“ des rein kristallinen Anteils der Probe anzeigt. Auf dieser Grundlage wurde mit Hilfe der Rietveld-Methode der Massenanteil jeder kristallinen Phasen bezogen auf die Summe aller kristallinen Phasen bestimmt. Die amorphe Masse ist dabei nicht mit inbegriffen. Diese wurde indirekt über die „Internal Standard Method“ bestimmt.

Bei dieser Methode wird der Probe eine fest definierte Masse eines Standards Al₂O₃ hinzugegeben und die Probe erneut gemessen. Über den Standard wird ein Faktor kleiner eins errechnet, in dem die bekannte Masse des Standards durch die per XRD gemessene Masse geteilt wird. Dieser Faktor stellt den „Fehler“ zwischen korrekter und gemessener Masse dar und ist ein Hilfsmittel für die Ermittlung der amorphen Anteile in der Probe. Indem der Faktor mit den anderen ermittelten Phasen multipliziert wird, errechnet sich so die Menge der kristallinen Phasen bezogen auf die Summe aller Phasen. Die Differenz aus der Summe der korrigierten kristallinen Phasenmasse zur Gesamtmasse stellt den Anteil an röntgenamorpher Substanz dar. Hierbei muss beachtet werden, dass die röntgenamorphe Substanz amorphe und semikristalline Phasen beinhalten kann. Eine genaue Differenzierung in einzelne Phasen ist nicht möglich. Allerdings können unter Berücksichtigung der Elementanalyse der XRF Rückschlüsse auf mögliche amorphe Bestandteile gezogen werden.

Die Ergebnisse der XRD-Analyse des Betonbrechsands sind als Diffraktogramm in Abbildung 3 dargestellt. Wie zuvor bereits aus der XRF hervorgegangen ist, ist der größte Anteil im Brechsand kristallines SiO₂, auch als Quartz bekannt. Darüber hinaus setzt sich das Material im Wesentlichen aus Calciumsilikaten, Portlandit und Calciumoxid zusammen.

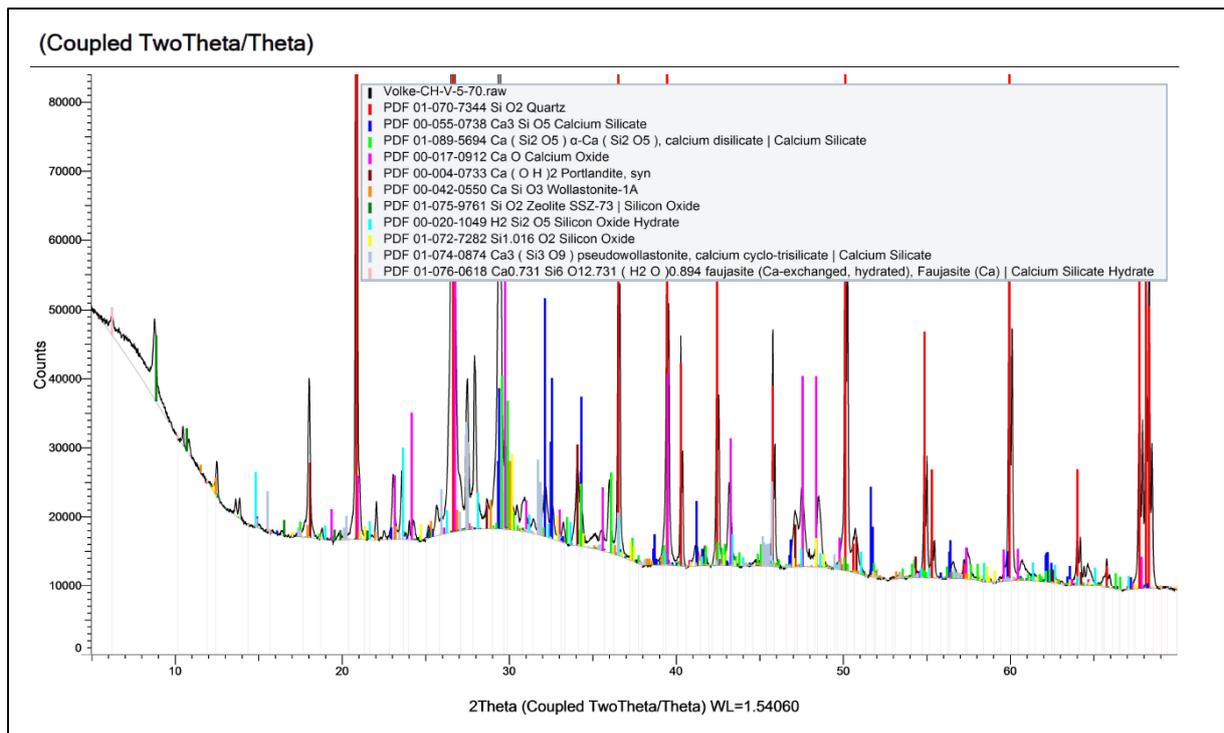


Abbildung 3: Diffraktogramm (XRD) Betonbrechsand

Tabelle 2 zeigt die Zusammensetzung der kristallinen Phasen und den röntgenamorphen Anteil in M.-% im Detail.

Tabelle 2: Kristallphasen Betonbrechsand in M.-%

Summenformel	Phase	Massenanteil
[-]	[-]	[M.-%]
1	2	3
SiO ₂	Quartz	64
Ca(Si ₂ O ₅) α-Ca(Si ₂ O ₅)	Calcium Silikat	4,4
Ca ₃ SiO ₅	Calcium Silikat	2,6
CaSiO ₃	Calcium Silikat	4,0
Ca ₃ (SiO ₃)	Calcium Silikat	7,3
(Fe, Mg) SiO ₃	Magnesian: Ferrosilit	3,5
Ca(OH) ₂	Portlandit	1,7
CaO	Calciumoxid	4,0
Ca _{0.12} Fe _{0.85} Mg _{0.13} (SiO ₂)	Silikat: Pigeonit	7,5
Ca _{0.731} Si ₆ O _{12.731} (H ₂ O)	Calcium-Silikat-Hydrat	0,03
		Σ 99,03
	Röntgenamorpher Anteil	~ 1

Aus den XRF- und XRD-Untersuchungen lässt sich ableiten, dass der Siliziumanteil von ca. 65 M.-% und der Calciumgehalt von ca. 17 M.-% vollständig gebunden in den Kristallstrukturen von Quartz, Calciumsilikat, Calciumoxid und Portlandit vorliegen. Daraus lässt sich schließen, dass die Elemente Silizium und Calcium keine amorphen Anteile mehr aufweisen und somit für eine alkalische Anregung des Betonbrechsandes nicht zur Verfügung stehen.

Lediglich das Element Aluminium liegt als amorphe reaktive und semikristalline Phase im Betonbrechsand vor. Aluminium wird z. B. während der Hydratation von Zement in Calciumaluminathydraten gebunden. Diese Phasen können sich kristallin, semikristallin und amorph ausbilden [Neu73].

4.1.1.4 Aktivatorlösung

Als Aktivatorlösung kam eine Natriumsilikatlösung zum Einsatz. Als Natriumsilikatlösung wurde das Produkt Crystal 0079 des Herstellers PQ Corporation verwendet, vgl. Tabelle 3. Wassergläser werden i. d. R. über den Wasserglasmodul (WGM) definiert. Dieser wird durch das Massenverhältnis von SiO₂ zu Na₂O beschrieben. Über die Zugabe von Natriumhydroxidschuppen wurde der molare Wasserglasmodul von 1,70 bis 2,2 für die geplanten Versuchsreihen eingestellt, um die Auswirkung auf die Verarbeitbarkeit und Festigkeit der hergestellten Mörtel zu testen.

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung, Dichte und pH-Wert der Natriumwasserglaslösung (Herstellerangaben)

Na ₂ O	SiO ₂	H ₂ O	SiO ₂ / Na ₂ O	Dichte	pH-Wert
[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[-]	[g/cm ³]	[-]
1	2	3	4	5	6
8,8	29,3	61,9	3,33	1,39	12

4.1.2 Zement

Für die Prüfserien an Hybridmörteln bestehend aus Betonbrechsand und Zement wurde ein Portlandzement CEM I 52,5 N der Fa. Wittekind verwendet. Die Rohdichte des Zementes wurde zu 3,15 g/cm³ bestimmt.

4.1.3 Metakaolin

Für die Prüfserien bestehend aus Betonbrechsand und Metakaolin wurden die Produkte *MetaVer R* und *PowerPozz* verwendet. Beide Produkte wurden von der Firma New Chem bereitgestellt, vgl. Anhang E.

Die beiden Metakaoline unterscheiden sich in ihrem Reinheitsgrad. Das Kaolin für das Produkt *PowerPozz* wird zunächst gereinigt, wodurch der Quarzanteil verringert wird und der Reinheitsgrad an Aluminiumsilikaten erhöht wird. Das Produkt *MetaVer R* enthält einen höheren Anteil an Quarzresten, weshalb der kristalline SiO₂-Anteil größer ist. Die chemische Zusammensetzung der Metakaoline ist in Tabelle 4 und Tabelle 5 dargestellt. Die detaillierten Analysewerte zur mineralogischen Zusammensetzung der Metakaoline sind im Prüfbericht in Anlage E, Tabelle E1 und E2 dargestellt.

Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung, Dichte und Farbe des Metakaolins *MetaVer R*

Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Dichte
[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[g/cm ³]
1	2	3	4	5
23	65	6	0,6	2,5

Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung, Dichte und Farbe des Metakaolins PowerPozz

Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Dichte
[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[g/cm ³]
1	2	3	4	5
38	55	5	-	2,6

4.2 Entwicklung des alkalisch aktivierten Mörtelsystems

Die Entwicklung der alkalisch aktivierten Mörtel fand in zwei Stufen statt. Zunächst wurden anhand von Vorversuchen erste Anhaltswerte zur Frischmörtelkonsistenz gesammelt. Hierbei wurde die Verarbeitbarkeit, bei konstanten Anteilen von Feststoff und Aktivatorlösung, in Abhängigkeit vom Wasserglasmodul ermittelt. Als Zielgröße zur Verarbeitbarkeit wurde für die Frischmörtel ein Verarbeitungszeitraum von 30 min angestrebt.

Im zweiten Schritt wurde die Druck- und Biegezugfestigkeit des Festmörtels nach 7, 14 und 28 Tagen anhand von jeweils 6 Prüfkörpern für die Druckfestigkeit und 3 Prüfkörpern für die Biegezugfestigkeit ermittelt.

Die Festigkeiten wurden an Prismen (4x4x16 cm³) geprüft. Die Befüllung der Prismenschalungen erfolgte innerhalb von zwei Minuten nach Mischende unter stetiger Verdichtung in zwei Schichten. Die Proben wurden nach einem Tag ausgeschalt und bis zur Prüfung unter Normklimabedingungen gelagert.

Die Bruchstücke der Prismen wurden nach der Bestimmung der 28-Tagefestigkeiten für weitere 14 Tage unter Wasser gelagert, um die Wasserbeständigkeit des Festmörtels zu prüfen.

Die Anforderungen an die Frisch- und Festmörtelkenngrößen sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

Tabelle 6: Anforderungsbereich der Frisch- und Festmörtelkennzahlen

Kenngröße	Einheit	Anforderung
1	2	3
Verarbeitbarkeit	[min]	> 30
Druckfestigkeit	[N/mm ²]	> 50
Biegezugfestigkeit	[N/mm ²]	> 3,6

4.2.1 Mörtel aus Betonbrechsand

Innerhalb dieser Versuchsreihe wurde ein Mörtel aus 450 g Betonbrechsand, 1350 g Normsand und 500 g Wasserglaslösung hergestellt. Das Volumenverhältnis von Aktivatorlösung/Brechsand wurde für alle Prüfreiheiten mit 1,1 konstant gehalten und der Wasserglasmodul zwischen 1,7 und 3,3 in Abstufungen von 0,1 variiert. Die Mörtelrezepturen und die Bezeichnungssystematik sind Tabelle 7 verkürzt dargestellt.

Tabelle 7: Prüfmatrix Betonbrechsand

Versuchsreihe	WGM	Aktivator/B	Einwaage		
			Betonbrechsand	Normsand	Wasserglas
[-]	[-]	[-]	[g]	[g]	[g]
1	2	3	4	5	6
B_1,7	1,7	1,1	450	1350	500
B_1,8	1,8	1,1	450	1350	500
...
B_3,3	3,3	1,1	450	1350	500

Die untere Grenze des eingestellten Wasserglasmoduls basiert auf dem Sachverhalt, dass Wasserglaslösungen mit einem Wasserglasmodul von $\leq 1,6$ als ätzend eingestuft werden. Aufgrund der daraus resultierenden Schutzmaßnahmen zur Handhabung wurde der Wasserglasmodul von 1,7 als untere Grenze für alle Untersuchungsreihen festgelegt. In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse zu den durchgeführten Frisch- und Festmörteluntersuchungen vorgestellt.

4.2.1.1 Verarbeitbarkeit

Vor der Prüfkörperherstellung zur Bestimmung der Feststoffkennzahlen wurde die Verarbeitungszeit des Frischmörtels in Abhängigkeit vom Wasserglasmodul ermittelt, vgl. Tabelle 8. Als Kriterium galt hierbei der Zeitpunkt zu dem sich der Mörtel nach Zugabe der Aktivatorlösung zum Feststoff noch problemlos in die Prismenformen einbringen ließ.

Tabelle 8: Verarbeitungszeit der Betonbrechsandmörtel für Wasserglasmodule von 1,7 bis 3,3

	Wasserglasmodul							
	1,7	2,0	2,2	2,3	2,5	2,7	2,9	3,3
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
	1	2	3	4	5	6	7	8
Verarbeitungszeit in Minuten	>30	>30	30	21	15	8	5	3

Aufgrund der bestehenden Anforderung an die Mindestverarbeitungszeit von mindestens 30 min wurden für die nachfolgenden Untersuchungen Wasserglasmodule zwischen 1,7 und 2,2 weiter in Betracht gezogen.

4.2.1.2 Druck- und Biegezugfestigkeit

An den hergestellten Prüfkörpern wurde die Biegezug- (n=3) und Druckfestigkeit (n=6) für Rezepturen mit Wasserglasmodulen zwischen 1,7 und 2,2 nach 7, 14 und 28 Tagen ermittelt.

In der nachfolgenden Abbildung 4 und Abbildung 5 sind die Druck- und Biegezugfestigkeiten an den Prüfterminen 7, 14 und 28 Tage nach Herstellung dargestellt.

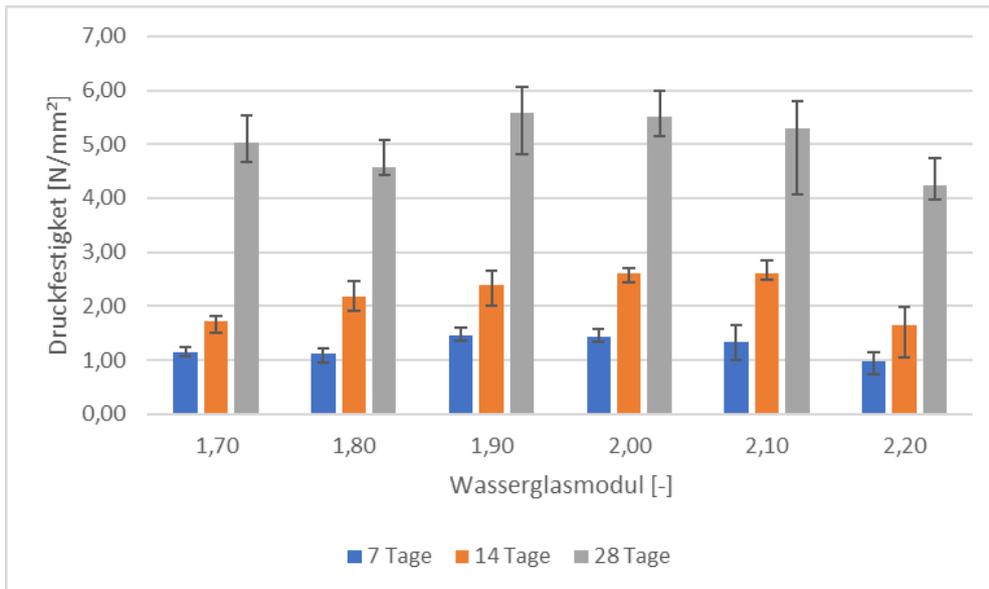


Abbildung 4: Druckfestigkeiten alkalisch aktivierter Mörtel auf Basis von Betonbrechsand nach 7, 14 und 28 Tagen für Wasserglasmodule von 1,7 bis 2,2; Marker: Streubereich aus minimalem und maximalem Einzelergebnis

Die Druckfestigkeiten für alle untersuchten Wasserglasmodule liegen nach 28 Tagen zwischen 4,25 N/mm² und 5,58 N/mm². Dabei werden mit den Wasserglasmodulen von 1,9 bis 2,1 die höchsten Druckfestigkeiten von > 5 N/mm² erreicht. Die 7-Tagefestigkeiten liegen bei allen Modulen auf einem sehr niedrigen Niveau von < 1,5 N/mm².

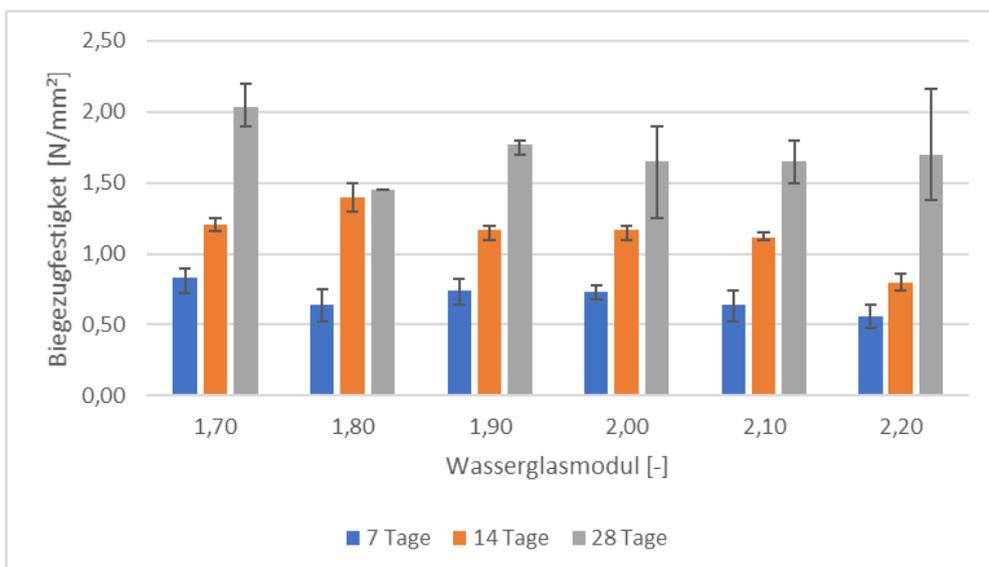


Abbildung 5: Biegezugfestigkeiten alkalisch aktivierter Mörtel auf Basis von Betonbrechsand nach 7, 14 und 28 Tagen für Wasserglasmodule von 1,7 bis 2,2

Die größten Biegezugfestigkeiten werden nach 28 Tagen bei einem Wasserglasmodul von 1,7 mit 2,0 N/mm² erreicht. Im Bereich der höchsten Druckfestigkeiten bei Modulen von 1,9 bis 2,1 werden etwas geringere 28-Tage-Biegezugfestigkeiten von 1,65 N/mm² bis 1,75 N/mm² erreicht.

Im Verhältnis zu den 7 Tage Druckfestigkeiten von < 1,5 N/mm² liegen die Biegezugfestigkeiten zwischen 0,5 N/mm² und 0,8 N/mm² relativ hoch.

4.2.1.3 Wasserbeständigkeit des Festmörtels

Neben den ermittelten Frisch- und Festbetonkennzahlen spielt bei den alkalisch aktivierten Systemen die Beständigkeit gegenüber einer Wasserlagerung eine sehr wichtige Rolle in Bezug auf die Dauerhaftigkeit. Bei Pflastersteinen wäre z. B. die Wasserbeständigkeit eine generelle Grundvoraussetzung zum Einsatz im Außenbereich. Ferner lässt sich abschätzen, welche Bindewirkung innerhalb des hergestellten Prüfkörpers überwiegt. Bei einer überwiegenden Wasserglasbindung, ohne dass sich alumosilikatische Strukturen gebildet haben, ist ein Zerfall der Prüfkörper zu erwarten.

Die Bruchstücke der nach 28 Tage geprüften Prüfkörper wurden zur Überprüfung der Wasserbeständigkeit für 14 Tage unter Wasser bei Raumtemperatur gelagert, vgl. Abbildung 6.



Abbildung 6: 28 Tage alter Betonbrechsandmörtel nach 14-tägiger Wasserlagerung

Bei allen eingelagerten Prüfkörpern fand während der Einlagerungsperiode ein Zerfall der Mörtelmatrix statt. Dies hat zur Folge, dass sich auf Basis der bis hierhin untersuchten Rezepturen keine dauerhaften Mörtelprodukte herstellen lassen.

4.2.1.4 Bewertung der Ergebnisse und weitere Vorgehensweise

In den zuvor beschriebenen Versuchsreihen wurde die Auswirkung des Wasserglasmoduls auf die Frisch- und Festmörteleigenschaften eines Betonbrechsandmörtels untersucht. Ein nutzbarer Verarbeitungszeitraum ist zwischen den Wasserglasmodulen 1,7 bis 2,2 erreicht worden.

Bei den ermittelten Festmörteleigenschaften werden im Alter von 28 Tagen für die untersuchten Wasserglasmodule im Alter von 28 Tagen Druckfestigkeiten von etwa 5 N/mm² und Biegezugfestigkeiten von etwa 1,6 N/mm² erreicht.

Ferner konnte durch die Wasserlagerung der Prüfkörper gezeigt werden, dass es sich bei der Binderwirkung lediglich um eine überwiegend reversible „Wasserglasbindung“ handelt und sich über einen Zeitraum von bis zu 28 Tagen keine dauerhaft wasserstabilen silikatischen bzw. alumosilikatischen Strukturen ausbilden.

Neben diesem zwingend einzuhaltenden Kriterium sind die gemessenen Druck- und Biegezugfestigkeiten für die geplante Nutzung als Pflasterstein deutlich zu gering.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse musste der Entwicklungsansatz angepasst werden. Durch die gezielte Zugabe von Zement oder Metakaolin entstanden Mörtelsysteme, die im Folgenden als „Hybridsysteme“ bezeichnet werden. Es wurde erwartet, dass einerseits die Wasserbeständigkeit und andererseits die erforderlichen Druck- und Biegezugfestigkeiten im Hinblick auf die gestellten Anforderungen an einen Betonpflasterstein unter Zuhilfenahme der genannten Stoffe erreicht werden, ohne die gestellte Zielsetzung eines hohen Betonbrechsandanteils zu verfehlen.

Als Alternative ist eine weitere Aufbereitung des Betonbrechsandes zur Steigerung der Reaktivität in Betracht gezogen worden, welche aber im Rahmen des laufenden Projektes nicht abgebildet werden konnte, aber als Ausgangsbasis für weitere Forschungsansätze dienen kann.

4.2.2 Hybridmörtel aus Betonbrechsand und Zement

Als erste naheliegende Variante sollte durch die Zugabe von Portlandzement (CEM I) das bereits untersuchte Reinsystem Betonbrechsand modifiziert werden, um so die notwendigen Festigkeiten und die Wasserbeständigkeit zu erreichen.

Als Teilsubstitut für den Betonbrechsand wurde der zum derzeitigen Zeitpunkt im Werk verwendete Portlandzement genutzt.

Die untersuchten Mörtelrezepturen sind in Tabelle 9 aufgeführt und im Wesentlichen in zwei größere Gruppen eingeteilt.

Im der ersten Gruppe wurden die Gemische aus Betonbrechsand (B) und Zement (Z), zusammengefasst als „BZG“, mittels alkalischer Aktivatorlösung angeregt. Die Gewichtsverhältnisse von Betonbrechsand (B) zu Zement (Z) variieren zwischen 90/10 und 25/75. Die bereits in Kap. 4.2.1 untersuchte Betonbrechsandmischung mit einem Anteil von 100 M.-% Brechsand diente hierbei als Referenzmischung. Der Wasserglasmodul wurde mit 2,2 und das Verhältnis von Aktivatorlösung zu Brechsand-Zement-Gemisch (BZG) von 1,1 konstant gehalten. Der Wasserglasmodul wurde zu Gunsten des Zementes auf 2,2 festgelegt, weil sich Calciumverbindungen bei extrem hohen pH-Werten bzw. OH⁻-Konzentrationen deutlich schlechter lösen lassen [Pac15]. Die Mischung Z_2,2, bei welcher die Aktivierung des Zementes mittels Wasserglaslösung vorgenommen wird, stützt diese These.

In der zweiten Gruppe wurden die Gemische aus Betonbrechsand und Zement rein hydraulisch mittels Wasser angeregt. Die BZG-Gemische wurden mit 50/100 und 25/75 festgelegt. Die Mischung mit 100 % Zement und rein hydraulischer Anregung dient als direkter Vergleich zur Anregung von Zement mittels Wasserglaslösung. Der w/z-Wert der hydraulischen Mischungen entspricht dem Wasseranteil, der aus der Wasserglaslösung in das System eingebracht wird.

Tabelle 9: Prüfmatrix der Hybridmörtel aus Betonbrechsand und Portlandzement

Versuchsreihe	Betonbrechsand/ Zement	WGM	Aktivator/ BZG	Einwaage				
				Betonbrechsand	Zement	Normsand	Wasserglas	Wasser
	[M.-%/ M.-%]	[-]	[-]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Mörtel mit alkalischer Aktivierung								
Z_2,2	0/100	2,2	1,1	0	450	1350	500	0
B_2,2	100/0	2,2	1,1	450	0	1350	500	0
B/Z 90/10_2,2	90/10	2,2	1,1	405	45	1350	500	0
B/Z 70/30_2,2	70/30	2,2	1,1	315	135	1350	500	0
B/Z 50/50_2,2	50/50	2,2	1,1	225	225	1350	500	0
B/Z 25/75_2,2	25/75	2,2	1,1	135	315	1350	500	0

Versuchsreihe	Betonbrechsand/ Zement	WGM	Aktivator/ BZG	Einwaage				
				Betonbrechsand	Zement	Normsand	Wasserglas	Wasser
	[M.-%/M.-%]	[-]	[-]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Mörtel ohne alkalische Aktivierung								
Z_0	0/100	-	0,39*	0	450	1350	0	176
B/Z 50/50_0	50/50	-	0,39*	225	225	1350	0	176
B/Z 25/75_0	25/75	-	0,39*	135	315	1350	0	176

* angegeben als w/z-Wert

4.2.2.1 Verarbeitbarkeit

Die ermittelten Verarbeitungszeiten für die Mischungen der mittels Aktivatorlösung angeregten B/Z-Verhältnisse aus Tabelle 9 sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Verarbeitungszeit des mittels Aktivatorlösung (WGM 2,2) angeregten Hybridmörtels aus Betonbrechsand und Zement

	Massenverhältnisse Betonbrechsand/Zement				
	100/0	90/10	30/70	50/50	25/75
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
	1	2	3	4	5
Verarbeitungszeit in Minuten	30	12	5	1	<1

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verarbeitbarkeit des Frischmörtels mit steigendem Zementanteil stark abnimmt und bereits ab einem Zementanteil von 10 M.-% mit 12 Minuten deutlich unter den geforderten 30 Minuten liegt.

Für die Versuchsreihen der rein hydraulisch angeregten Rezepturen wurden keine Versuche zur Verarbeitungszeit durchgeführt, weil zu erwarten war, dass diese erfahrungsgemäß in einem Bereich von > 60 min liegen.

4.2.2.2 Druck- und Biegezugfestigkeiten

Die ermittelten Druckfestigkeiten der in Tabelle 9 aufgeführten Rezepturen sind in Abbildung 7 dargestellt.

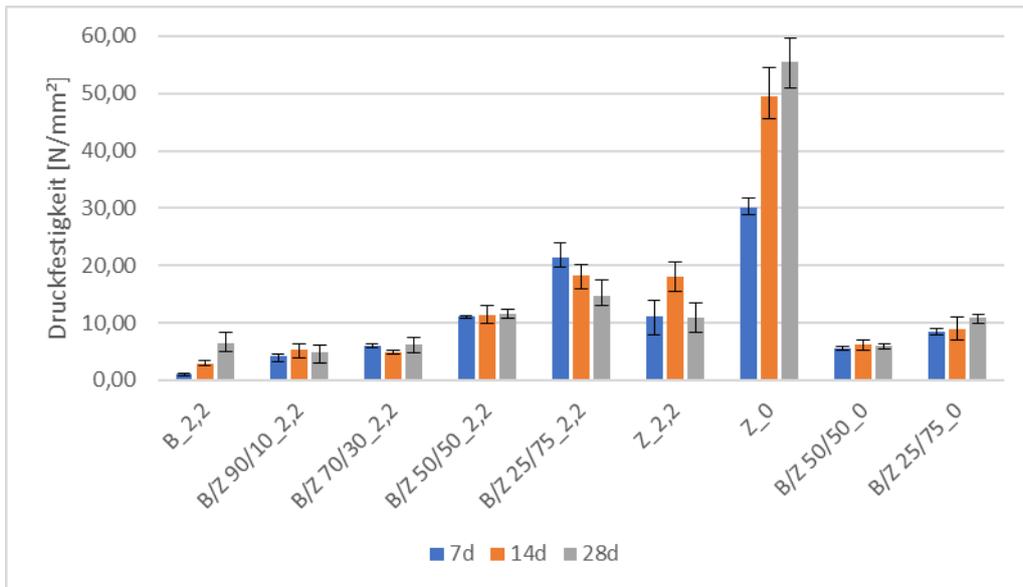


Abbildung 7: Druckfestigkeit des Hybridmörtels aus Betonbrechsand und Zement nach 7, 14 und 28 Tagen mittels alkalischer Aktivierung und Wasseranregung

Grundsätzlich führt die Anregung des reinen Zementes mittels Wasserglaslösung gegenüber Wasser zu einer deutlichen Reduzierung der Druckfestigkeiten. Die Rezeptur Z_2,2 erreicht mit 11 N/mm² nach 28 Tagen eine deutlich geringere Festigkeit als die Rezeptur Z_0 mit 55,5 N/mm².

Vergleicht man dahingegen die Ergebnisse für die Verhältnisse von B/Z von 50/50 und 25/75, so fällt ins Auge, dass diese bei alkalischer Anregung nach 28 Tagen annähernd 50 M.-% höher ausfallen als bei der Anregung mit reinem Wasser.

Innerhalb der Gruppe der alkalisch aktivierten Systeme führt die Steigerung des Zementanteils lediglich zu einer geringfügigen Druckfestigkeitssteigerung.

Die in Abbildung 8 dargestellten Biegezugfestigkeiten zeigen im direkten Vergleich der Zementaktivierung mittels Wasserglaslösung im Vergleich zu Wasser nicht so deutliche Unterschiede wie sie bei den Druckfestigkeiten ermittelt worden sind. Bei einem Gewichtsverhältnis B/Z von 50/50 und 25/75 liegen die Biegezugfestigkeiten ebenfalls auf einem vergleichbaren Niveau.

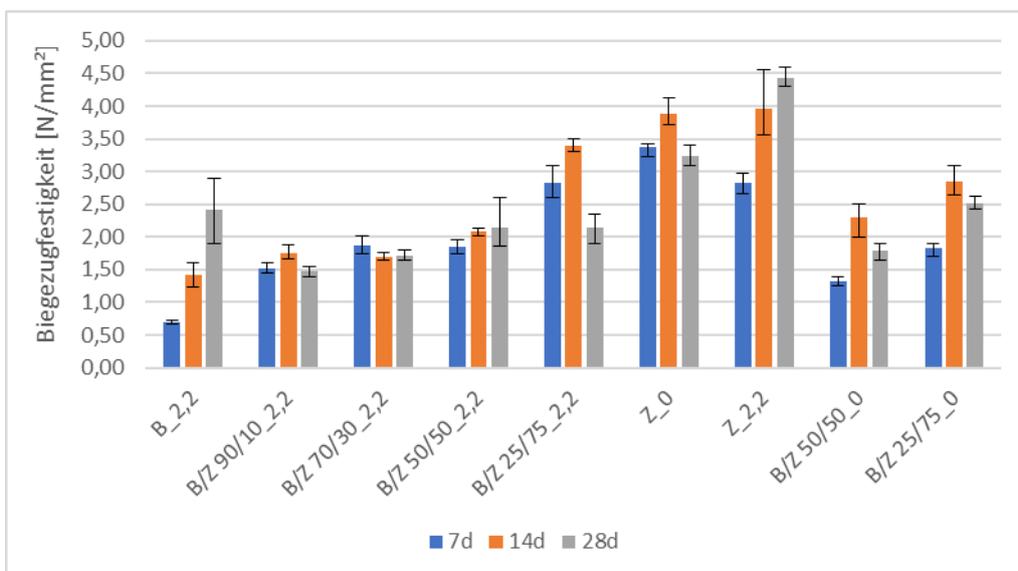


Abbildung 8: Biegezugfestigkeit des Hybridmörtels aus Betonbrechsand und Zement nach 7, 14 und 28 Tagen mittels alkalischer Aktivierung und Wasseranregung

4.2.2.3 Bewertung der Ergebnisse und weitere Vorgehensweise

Die z. B. im Tunnelbau zur Erstarrungsbeschleunigung erprobte Zugabe von Wasserglaslösungen zu einem zementären System führte wie erwartet zu einem deutlich schnelleren Ansteifen des Frischmörtels. Alkalisilikate der alkalischen Lösung reagieren mit dem im Zement enthaltenen Kalk und Aluminat und beschleunigen so die Abbindereaktion um ein Vielfaches [Gir13]. Das Ansteifen der Mörtel erfolgte so schnell, dass eine Verarbeitbarkeit unter den derzeitigen Produktionsbedingungen nicht gegeben ist.

Bezogen auf die in Tabelle 6 aufgeführten Anforderungen an die Frisch- und Festmörtel-eigenschaften ist folgendes festzustellen:

Bei den ermittelten Druckfestigkeiten konnte bei der alkalischen Aktivierung des reinen Portlandzementes gegenüber dem reinen Betonbrechsand eine deutliche Steigerung der Festigkeiten von bis zu 70 % ermittelt werden. Trotzdem konnten selbst mit dem Portlandzement nach 28 Tagen lediglich Druckfestigkeiten von etwa 11 N/mm² erreicht werden, die deutlich unterhalb des technisch nutzbaren Bereiches liegen.

Es ist zu vermuten, dass selbst bei einem verhältnismäßig hohen Wasserglasmodul von 2,2 die Alkalität noch ausreichend hoch ist, um das Löseverhalten der Calciumverbindungen im Portlandzement deutlich zu reduzieren. Dieses Löseverhalten führt zu einer merklichen Reduzierung der Festigkeiten, vgl. [Pac15]

Die im Verhältnis zur Druckfestigkeit hohen Biegezugfestigkeiten bei der alkalischen Aktivierung nach 28 Tagen von > 2 N/mm² bei einem Verhältnis B/Z von 50/50 erreichen schon 50 % der notwendigen Festigkeit im Hinblick auf die Zielsetzung der Herstellung eines Pflastersteines und wären für untergeordnete Anwendungen durchaus technisch nutzbar.

Die mit Wasser angeregten hybriden Mörtel zeigen einen Festigkeitsabfall im Gegensatz zur Aktivierung mit Wasserglas. Neben der hydraulischen Phasenbildung des Zementes, findet hier ebenfalls eine reversible Wasserglaserhärtung statt, welche bereits bei den Mörteln aus reinem Betonbrechsand festgestellt worden sind. Diese fällt bei der Aktivierung mit Wasser weg, so dass dort lediglich eine rein hydraulische Festigkeit zu verzeichnen ist. Aufgrund der nicht praxisgerechten Verarbeitbarkeit und der für eine technische Nutzbarkeit geringen Druckfestigkeiten kann diese Vorgehensweise lediglich für untergeordnete Prozesse brauchbar sein. Die erzielten Festigkeiten und Verarbeitungsbedingungen rechtfertigen nicht den Einsatz von Portlandzement unter dem Aspekt der angestrebten Nachhaltigkeit.

Es konnte dennoch gezeigt werden, dass die Kombination aus einem Betonbrechsand und einer weiteren Bindemittelkomponente zur Erreichung des Projektzieles beitragen kann. Aus diesem Grund wurde im Folgenden der Zement durch ein Metakaolin ausgetauscht, um die benötigten Frisch- und Festbetoneigenschaften zu erreichen.

4.2.3 Mörtel aus Betonbrechsand und Metakaolin

Aus den Versuchen unter Zugabe von Portlandzement konnten schon erste Verbesserungen des Mörtels auf Kosten der Verarbeitbarkeit erzielt werden.

Im folgenden Kapitel sollen Metakaoline, die in der jetzigen Produktion noch nicht zum Einsatz kommen, als partielles Substitut für den Betonbrechsand eingesetzt werden.

Der Literatur ist zu entnehmen, dass Bindemittel auf Basis von Metakaolin i. d. R. gute Ergebnisse, auch bei hohen pH-Werten, erreichen [Pac15]. Aus diesem Grund wurde der Wasserglasmodul im Vergleich zu den vorangegangenen Untersuchungen, vgl. Kap. 4.2.2, reduziert und zwischen 1,7 und 2,0 eingestellt. In diesem Bereich erreichten auch die reinen Betonbrechsandmischungen die besten Ergebnisse, vgl. Kap. 4.2.1. Die Substitutionsraten wurden in Anlehnung an die mit Portlandzement durchgeführten Untersuchungen gewählt, vgl. Tabelle 9.

In Tabelle 11 sind die Zusammensetzungen der Versuchsreihen mit Gemischen aus Betonbrechsand (B) und Metakaolin (MK) aufgeführt. Zusätzlich zu diesen Mischungen wurden auch Mörtel mit 100 M.-% Metakaolin als Referenz in die Untersuchungen einbezogen. Für jedes Mischungsverhältnis wurden beide zur Verfügung stehenden Metakaolintypen (Meta-Ver R und PowerPozz) eingesetzt.

Die Wasserglasmodule wurden zwischen 1,7 und 2,0 variiert. Das Verhältnis von Aktivatorlösung zum Brechsand-Metakaolin-Gemisch (BMG) wurde bei 1,1 konstant gehalten. Jeder Mischung wurde wie auch bei den vorherigen Versuchsreihen unter der Zugabe von Normsand hergestellt.

Tabelle 11: Prüfmatrix der Mörtel aus Betonbrechsand und Metakaolin

Versuchsreihe	Betonbrechsand/Metakaolin	WGM	Aktivator/BMG	Einwaage			
				Betonmehl	Metakaolin	Normsand	Wasserglas
	[-]	[-]	[-]	[g]	[g]	[g]	[g]
1	2	3	4	5	6	7	8
MK_1,7	0/100	1,7	1,1	0	450	1350	500
MK_1,8	0/100	1,8	1,1	0	450	1350	500
MK_1,9	0/100	1,9	1,1	0	450	1350	500
MK_2,0	0/100	2,0	1,1	0	450	1350	500
B/MK 25/75_1,7	25/75	1,7	1,1	112	338	1350	500
B/MK 25/75_1,8	25/75	1,8	1,1	112	338	1350	500
B/MK 25/75_1,9	25/75	1,9	1,1	112	338	1350	500
B/MK 25/75_2,0	25/75	2,0	1,1	112	338	1350	500
B/MK 50/50_1,7	50/50	1,7	1,1	225	225	1350	500
B/MK 50/50_1,8	50/50	1,8	1,1	225	225	1350	500
B/MK 50/50_1,9	50/50	1,9	1,1	225	225	1350	500
B/MK 50/50_2,0	50/50	2,0	1,1	225	225	1350	500
B/MK 75/25_1,7	75/25	1,7	1,1	338	112	1350	500
B/MK 75/25_1,8	75/25	1,8	1,1	338	112	1350	500
B/MK 75/25_1,9	75/25	1,9	1,1	338	112	1350	500

4.2.3.1 Verarbeitbarkeit

Das Verarbeitbarkeitsfenster wurde vor der Herstellung der Prüfkörper zur Bestimmung der Festmörtelkennzahlen ermittelt. Alle Mischungen erreichten dabei bei einem Wasserglasmodul von 1,7 eine Verarbeitbarkeitszeit zwischen 30 und 40 min. Erwartungsgemäß nahm die Verarbeitbarkeitszeit mit steigendem Wasserglasmodul zu, erreichte aber auch für die höheren Wasserglasmodule für die Praxis akzeptable Werte.

4.2.3.2 Druck- und Biegezugfestigkeiten

Im folgenden Kapitel werden die Erhärtungsverläufe der in Tabelle 11 aufgeführten Rezepturen vorgestellt. Aufgrund der Vielzahl an untersuchten Mischungen wird zur besseren Übersicht nur auf eine Auswahl relevanter Rezepturen eingegangen. Die Ergebnisse aller Rezepturen sind in Anhang A zusammengestellt.

In der

Abbildung 9 und

Abbildung 10 sind die Erhärtungsverläufe der reinen Metakaolinnmischungen für die Produkte MetaVer R und PowerPozz, welche mittels Wasserglaslösung und Wasserglasmodulen von 1,7 bis 2,0 angeregt wurden, dargestellt.

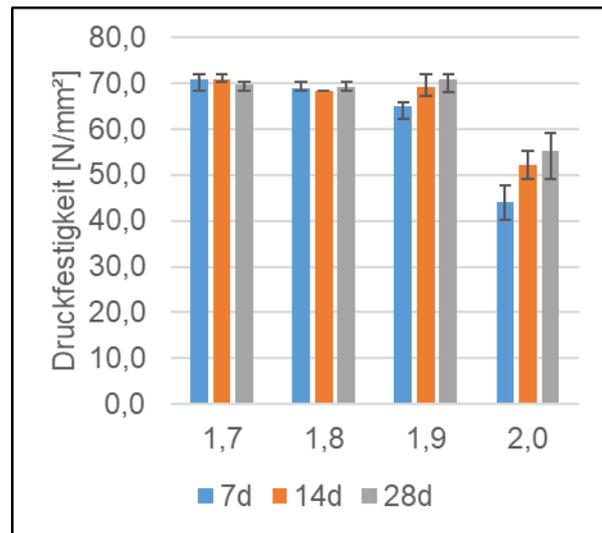
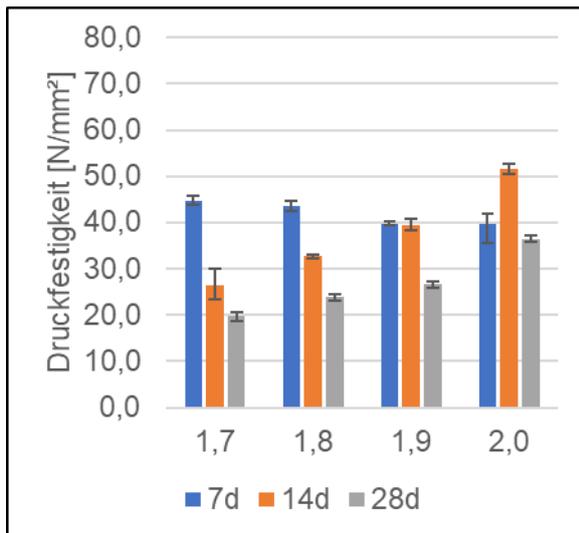


Abbildung 9: Druckfestigkeit der Mörtelmischungen mit 100 % MetaVer R nach 7, 14 und 28 Tagen für Wasserglasmodule zwischen 1,7 und 2,0

Abbildung 10: Druckfestigkeit der Mörtelmischungen mit 100 % PowerPozz nach 7, 14 und 28 Tagen für Wasserglasmodule zwischen 1,7 und 2,0

Abbildung 9 macht deutlich, dass bei der Anregung des Metakaolins MetaVer R (MK) bei allen eingestellten Wasserglasmodulen erhebliche Festigkeitsrückgänge zwischen dem 7. und 28. Tag ermittelt werden. Der Effekt nimmt mit sinkendem Wasserglasmodul zu.

Bei den Versuchsreihen unter Verwendung des Metakaolins PowerPozz sind diese Rückgänge nicht feststellbar. Die Druckfestigkeiten bei Wasserglasmodulen zwischen 1,7 und 1,9 liegen auf einem ähnlich hohen Niveau nach 28 Tagen von etwa 70 N/mm². Lediglich bei einem Wasserglasmodul von 2,0 werden zum gleichen Zeitpunkt geringere Druckfestigkeiten von 55 N/mm² erreicht.

Die Druckfestigkeiten der Rezepturen mit Betonbrechsand/PowerPozz-Verhältnissen (B/MK) von 75/25 bzw. 50/50 sind in

Abbildung 11 und

Abbildung 12 dargestellt. Die Druckfestigkeiten der Verhältnisse 25/75 liegen mit Werten um 9 N/mm² auf einem deutlich niedrigeren Niveau und sind in Anhang A hinterlegt.

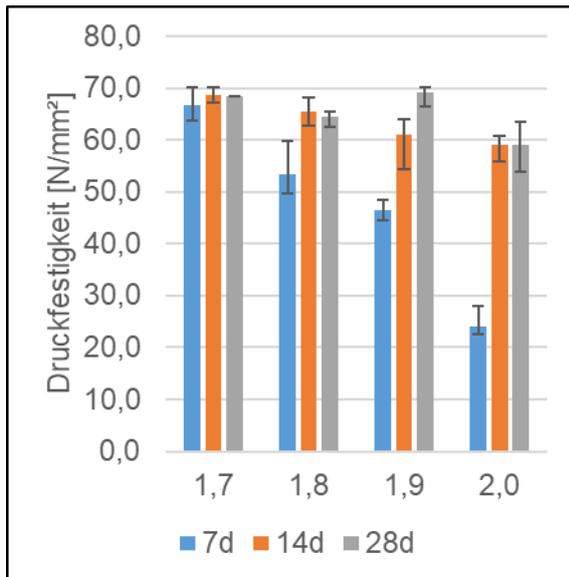


Abbildung 11: Druckfestigkeit der Mörtelmischungen mit 75 % PowerPozz nach 7, 14 und 28 Tagen für Wasserglasmodule zwischen 1,7 und 2,0

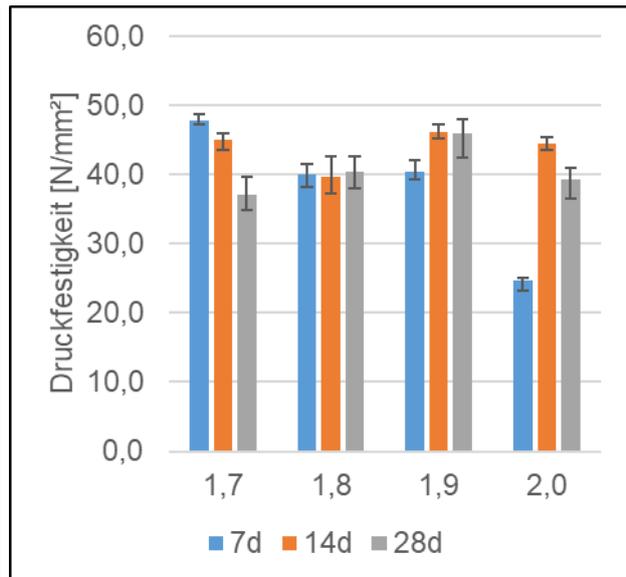


Abbildung 12: Druckfestigkeit der Mörtelmischungen mit 50 % PowerPozz nach 7, 14 und 28 Tagen für Wasserglasmodule zwischen 1,7 und 2,0

Bei einem PowerPozz-Anteil von 75 M.-% am BMG werden ab einem Wasserglasmodul < 2,0 28-Tage-Druckfestigkeiten von etwa 65 N/mm² ermittelt. Die zeitgleich ermittelten Biegezugfestigkeiten liegen auf einem Niveau von 9 N/mm², vgl. Anhang A. Bei einem auf 50 M.-% reduzierten PowerPozz-Anteil liegen die 28-Tage-Druckfestigkeiten auf einem Niveau von rd. 40 N/mm² und die Biegezugfestigkeiten in einem Bereich von 6 N/mm². Aufgrund des deutlich geringeren Niveaus werden die Ergebnisse zu den ermittelten Druckfestigkeiten für die Substitution von Betonbrechsand durch das Metakaolin MetaVer R hier nicht diskutiert und sind im Anhang A hinterlegt.

4.2.3.3 Bewertung der Ergebnisse und weitere Vorgehensweise

Bezugnehmend auf die in Tabelle 6 festgelegten Anforderungen zu den wichtigsten Frisch- und Festbetonkennzahlen kann folgendes festgehalten werden:

Im direkten Vergleich der beiden zur Verfügung stehenden Metakaoline hat sich gezeigt, dass das MetaVer R mit einem gegenüber dem Produkt PowerPozz geringeren Anteil an reaktivem SiO₂ und Al₂O₃ deutlich geringe Druckfestigkeiten im Beobachtungszeitraum erreicht. Ferner ist noch ein deutlicher Abfall der Druckfestigkeiten im Alter zwischen 7 und 28 Tagen dokumentiert worden. Lediglich bei einem MetaVer-R-Anteil von 25 M.-% am Brechsand-Metakaolin-Gemisch wurden bei den Wasserglasmodulen 1,9 bis 1,7 keine Rückgänge der Druck- und Biegezugfestigkeiten festgestellt. Die dabei erreichten Druckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen von etwa 8 N/mm² liegen aber in einem technisch nicht relevanten Bereich.

Ausschließlich die Biegezugfestigkeiten von rund 3 N/mm² können als technisch relevant eingestuft werden. Aufgrund der deutlichen, nicht kalkulierbaren Druckfestigkeitsrückgänge über die Zeit ist eine technische Eignung der Rezepturen mit MetaVer R auszuschließen.

Die bei den Versuchsreihen mit dem Metakaolin PowerPozz (Anteil 75 M.-%) erreichten 28-Tage-Druckfestigkeiten von etwa 60 N/mm² - bei Biegezugfestigkeiten von 6 N/mm² - liegen vollständig im Anforderungsbereich für die geplante technische Anwendung, wobei die Biegezugfestigkeiten die Anforderungen deutlich übertreffen. Im Hinblick auf eine maximale ökologische Optimierung der Baustoffrezeptur stellt die Variante mit 50 M.-% Metakaolin die vielversprechendste, im technisch relevanten Bereich liegende Alternative dar.

Die Druckfestigkeiten liegen mit 45 N/mm² nur unwesentlich unterhalb der Anforderungen an ein zementäres System, wohingegen die Biegezugfestigkeiten mit 7 N/mm² diese um rd. 100% überschreiten.

4.2.4 Auswahl geeigneter Mörtelrezepturen für den Betonmaßstab

Im Folgenden werden mit Ausblick auf die Betonversuche ausgewählte Mörteluntersuchungen gegenübergestellt und die technisch relevanten Rezepturen für den Betonmaßstab ausgewählt. Tabelle 12 zeigt diese in der Übersicht.

Tabelle 12: Gegenüberstellung der Festmörtel Eigenschaften ausgewählter Mörtelrezepturen

Anforderungen und Rezepturen	WGM	Druckfestigkeit	Biegezugfestigkeit	Bemerkung	Anforderungen erfüllt?
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6
Anforderungsbe- reich		> 50	> 3,6		
B_2,2	1,9	5,58	1,77	100% Beton- brechsand wasserlöslich	nein/nein
B/Z 50/50	2,2	11,6	2,1	50% Beton- Brechsand 50% Zement	nein/nein
B/M (MetaVer R) 25/75	1,9	10,0	2,6	25% Beton- brechsand 75% Metakaolin Festigkeitsrück- gang	nein/nein
B/M (PowerPozz) 25/75	1,9	69,1	10,3	25% Beton- brechsand 75% Metakaolin	ja/ja
B/M (PowerPozz) 50/50	1,9	45,9	6,9	50% Beton- brechsand 50% Metakaolin	nein/ja

Für den Betonmaßstab werden die beiden aufgeführten Mörtelrezepturen aus Mischungen von Betonbrechsand und Metakaolin (PowerPozz) mit Mischungsverhältnissen von 50/50 und 25/75 verwendet.

Bei beiden Rezepturen werden die Anforderungen an die Biegezugfestigkeit deutlich erfüllt. Da das ausschlaggebende Kriterium zur Herstellung eines Pflastersteines die Zugfestigkeit ist, wird die geringfügige Unterschreitung der Druckfestigkeit der Mischung BS/PowerPozz von 50/50 im Hinblick auf eine im ökologischen Sinne optimierte Rezeptur in die weiteren Betrachtungen einbezogen.

Bei den anderen Rezepturen bestehend aus 100 % Betonbrechsand oder den Mischungen aus MetaVer R und Betonbrechsand besteht keine realistische Aussicht, die geforderten Kennzahlen im Betonmaßstab zu erreichen. Auch die in Kap. 4.2.2 vorgestellten Mischungen aus Betonbrechsand und Zement haben aufgrund des sehr schnellen Ansteifverhaltens und der eher niedrigen Festigkeitskennzahlen keine Aussicht auf Erfolg.

4.3 Entwicklung eines alkalisch aktivierten Betons auf Basis von Betonbrechsand

4.3.1 Verdichtungsmethoden des Frischbetons

Ausgehend von den entwickelten Mörteln aus Kapitel 4.2 wurde im nächsten Schritt durch die Zugabe von grober Gesteinskörnung ein erdfeuchter Beton mit sehr steifer Konsistenz hergestellt. Erdfeuchte Betongemische zeichnen sich durch einen geringen Bindemittelgehalt aus und besitzen daher eine hohe innere Reibung der Gesteinskörnung, wodurch der Frischbeton eine hohe Formbeständigkeit (Grünstandfestigkeit) aufweist. Dies ermöglicht bei der Produktion im Werk das frühe Ausschalen der Pflastersteine, erfordert jedoch eine hohe Verdichtungsintensität, welche durch leistungsstarke Verdichtungsgeräte erreicht wird.

Ziel war es daher, einen labortechnischen Aufbau zu entwickeln, der die Verdichtung des Frischbetons bei der Steinherstellung (Rüttelpressverfahren) im Betonwerk REKERS simuliert. Hierzu wurden an der FH-Münster zwei Verfahren näher untersucht. Zum Vergleich konnte bei der abschließenden Herstellung von Pflastersteinprototypen die Verdichtung mittels einer so genannten „Einsteinmaschine“ im Betonsteinwerk Klostermann in Coesfeld genutzt werden, vgl. Kapitel 4.4.

4.3.1.1 Instron-Verdichtung

Als erste Verdichtungs-Variante wurde mittels einer Universalprüfmaschine ein Pressdruck von 1 kN über einen Stahlstempel ($d = 99 \text{ mm}$) in einen mit Frischbeton gefüllten Stahlzylinder ($d/h=100/300 \text{ mm}$) eingeleitet, vgl. Abbildung 13.



Abbildung 13: Verdichtung mittels Instron B503

Gleichzeitig wurde eine Schwingung über das untere Auflager erzeugt, um eine dynamische Verdichtung zu erzeugen. Der Beton wurde in zwei Lagen eingebaut und jeweils verdichtet. Die Verdichtung wurde so lange vorgenommen, bis eine konstante Rohdichte des Frischbetons im Stahlzylinder ermittelt werden konnte. Die Rohdichte dient auch in der Betonwarenproduktion als wichtige Kenngröße zur Beurteilung der „Verdichtungswilligkeit“ erdfeuchter Betone. Durch entsprechende Korrelationen kann so die Druckfestigkeit direkt nach der Herstellung der Steine abgeschätzt werden. Ferner soll die Druckfestigkeit für einen Beton zur Herstellung von Betonpflastersteinen als Richtmaß bzw. Referenz dienen.

4.3.1.2 Proctor-Verdichtung

Alternativ zu der sehr aufwendigen Instron-Verdichtung wurde eine zweite Vorgehensweise zur Verdichtung der Prüfkörper untersucht. Diese ähnelt stark dem Verfahren zur Ermittlung der Proctordichte von bindigen Böden. Hierzu wird der lagenweise in einen Stahlzylinder eingebrachte Beton über ein 15 kg schweres Fallgewicht schrittweise verdichtet. Parallel dazu wird der auf einem handelsüblichen zur Verdichtung von Betonproben eingesetzten Rütteltisch positionierte Schalung dynamisch verdichtet, vgl. Abbildung 14. Nach dieser gleichzeitig statisch und dynamischen Verdichtung wurde der Zylinder wiederum auf einen festen Untergrund gestellt und noch einmal statisch über das Fallgewicht „nachverdichtet“.



Abbildung 14: Verdichtung in Anlehnung an den Proctorversuch

Die Anzahl der ausgeführten Schläge orientierte sich an der jeweils ermittelten Dichte des Frischbetons. Die Verdichtung wurde so lange durchgeführt bis sich - wie auch bei der Verdichtung mittels der Instron-Prüfmaschine - eine konstante Dichte des Frischbetons eingestellt hat.

4.3.1.3 Verdichtung mittels „Einsteinmaschine“

Aufgrund der räumlichen Distanz konnte lediglich zur Herstellung der finalen Prototypensteine eine der wenigen in der Betonwarensteinproduktion zu findenden „Einsteinmaschinen“ in den Räumlichkeiten der Fa. Klostermann in Coesfeld genutzt werden. Diese Verdichtungseinrichtung ist auf Basis einer industriellen Großverdichtungseinrichtung konstruiert und für den Labormaßstab angepasst worden. Auf dieser Maschine kann im Gegensatz zur Serienproduktion lediglich ein kleinformatiger Stein verdichtet werden. Der Vorteil dieser Kleinanlage gegenüber den an der FH-Münster zur Verfügung stehenden Möglichkeiten beruht darauf, dass die Parameter einer Serienproduktion realitätsnah wiedergegeben werden können.

4.3.2 Hydraulisch gebundener Referenzbeton

Zur Entwicklung des alkalisch aktivierten Betons wurde im Vorfeld eine Referenzbetonrezeptur auf Basis der im Werk verwendeten Rohstoffe hergestellt, die erfahrungsgemäß alle Frisch- und Festbetonkennwerte für die Serienproduktion erfüllt. Die gewählte Zusammensetzung für 1 m³ Frischbeton ist in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Zusammensetzung des hydraulisch gebundenen Referenzbetons

Stoffkomponente	Anteilige Masse
[-]	[kg/m ³]
1	2
CEM I 52,5 N-NA-LA	260
Kalksteinmehl	45
Sand 0/2	760
Kies 2/8	1124
Zugabewasser	122
Stabilisierer	1,6

In den folgenden Kapiteln werden die durchgeführten Frisch- und Festbetonuntersuchungen, die an dem Referenzbeton vorgenommen wurden, vorgestellt. Anhand der Ergebnisse aus den Untersuchungen am Referenzbeton sollen neben den normativen Anforderungen weitere Kennzahlen für den Anforderungsbereich der alkalisch aktivierten Betone ermittelt und festgelegt werden.

4.3.2.1 Frischbetonkonsistenz

Wie auch bei den Mörteluntersuchungen wird im ersten Schritt die Verarbeitbarkeit der Betone untersucht. Der Verarbeitbarkeit kommt bei der Herstellung von Betonpflastersteinen eine hohe Bedeutung zu. Der Beton muss trotz seiner steifen Konsistenz rieselfähig sein und sich gut verdichten lassen. Hierzu werden in der Praxis oftmals rein haptische Verfahren herangezogen, die auch hier zum Einsatz kommen sollen. Eine langjährige Erfahrung zur Beurteilung der „optimalen“ Rieselfähigkeit und dem zu erwartendem Verdichtungsverhalten ist i. d. R. unabdingbar. Um die Betone entsprechend beurteilen zu können, wurden diese in enger Zusammenarbeit mit der Fa. REKERS beurteilt und eingeordnet. Der hergestellte Referenzbeton erreichte nach dem Mischprozess die gewünschte erdfuchte Konsistenz und ließ sich in der Hand zu einer formstabilen Masse kneten, vgl. Abbildung 15 und Abbildung 16.



Abbildung 15: Konsistenz des Referenzbetons nach dem Anmischen



Abbildung 16: Konsistenz des Referenzbetons nach Zusammendrücken in der Faust

Ergänzend zu den rein haptischen Untersuchungen wurde zur weiteren Quantifizierung der Konsistenz das dynamische Verdichtungsmaß nach DIN EN 12350-4 [Reg04] bestimmt, welches ausschließlich für sehr steife bis weiche Betone eingesetzt wird.

In der DIN EN 12350-4 [Reg04] werden Betone nach DIN EN 206/DIN 1045-2 [Reg05] mit einem Verdichtungsmaß zwischen 1,26 bis 1,45 als steif und darüber hinaus als sehr steif definiert. Der Referenzbeton erreicht ein Verdichtungsmaß von 1,53 und liegt damit im Bereich der Werksproduktion mit mittleren Verdichtungsmaßen von 1,6.

4.3.2.2 Frischbetonrohichte

Beim Vergleich der in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Verdichtungsverfahren wurde mit der Proctor-Verdichtung gegenüber der Instron-Verdichtung eine deutlich höhere Frischbetonrohichte von 2,38 kg/dm³ erreicht. Diese entspricht den im Werk erreichten üblichen Rohdichten von etwa 2,35 kg/dm³.

4.3.2.3 Grünstandfestigkeit

Neben den Rohdichten ist die „Grünstandfestigkeit“ ein wichtiges Kriterium zur Tauglichkeit von erdfeuchten Betonen in der Betonwarenproduktion. Mit beiden Verdichtungsverfahren konnten Betonprüfkörper mit einer ausreichenden Grünstandfestigkeit hergestellt werden. Die hergestellten Referenzbetone erreichten nach dem Verdichten und direkten Ausschalen die notwendige Formstabilität über einen Zeitraum von > 2 Stunden, vgl. Abbildung 17.



Abbildung 17: Ausgeschalter Referenzbeton nach der Instron-Verdichtung

4.3.2.4 Betondruckfestigkeit

Die Betondruckfestigkeiten wurden an den hergestellten zylindrischen Prüfkörpern in einem Alter zwischen 7 und 28 Tagen nach DIN EN 12390-3 [Reg06] ermittelt.

In der Abbildung 18 sind die Druckfestigkeiten für die mit den jeweiligen Verdichtungsverfahren hergestellten Prüfkörper dargestellt. Im linken Bildabschnitt sind die Festigkeiten für jene Prüfkörper, die mit der Instron-Verdichtung hergestellt worden sind, und im rechten Bildabschnitt die Festigkeiten jener Prüfkörper, die mit der Proctorverdichtung hergestellt worden sind, dargestellt.

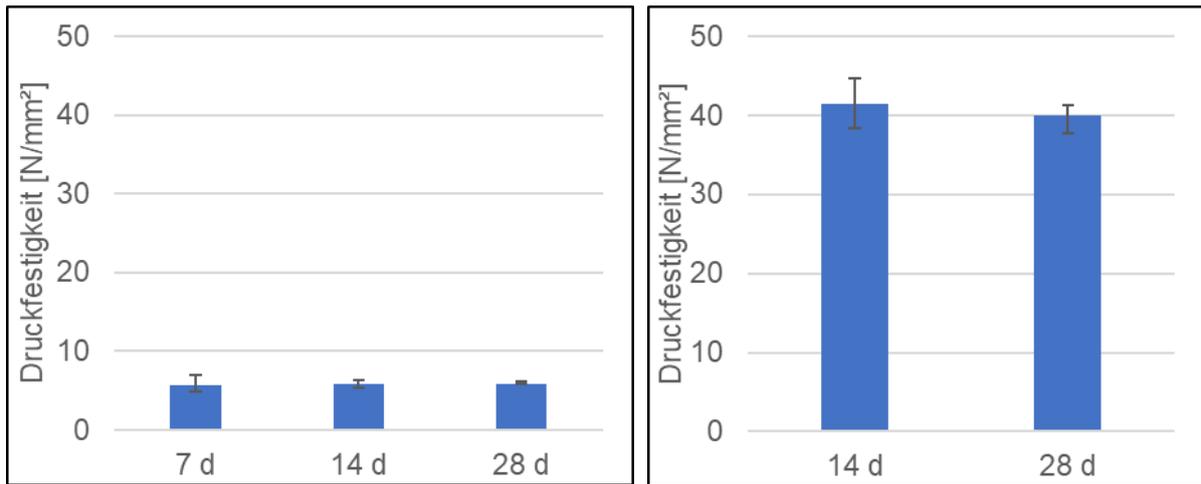


Abbildung 18: Druckfestigkeiten Referenzbeton Instron-Verdichtung (links) und Proctor-Verdichtung (rechts)

Es ist deutlich erkennbar, dass mit der Proctor-Verdichtung eine um ein Vielfaches höhere Druckfestigkeit bei sonst gleichen Rezepturparametern erreicht werden konnte. Nach 28 Tagen betragen die Druckfestigkeiten rund 40 N/mm².

Dieser merkbare Unterschied veranschaulicht die deutlich bessere Verdichtungsleistung der Proctor-Verdichtung gegenüber der Instron-Verdichtung.

4.3.2.5 Spaltzugfestigkeiten und längenbezogene Bruchlasten

Die Prüfung der Spaltzugfestigkeiten und Bruchlasten wurde nach DIN EN 12390-6 [Reg07] durchgeführt und entsprechend nach DIN 1383 [Reg09] bewertet.

Wie auch für die Druckfestigkeit wurden die zylindrischen Prüfkörper mit den zwei im Labor zur Verfügung stehenden Verdichtungsverfahren hergestellt.

Die daraus resultierenden Spaltzug- und längenbezogenen Bruchlasten sind in Abbildung 19 dargestellt, wobei im linken Diagramm die Spaltzugfestigkeiten für die mittels der Instron-Verdichtung und rechts für die mittels der Proctor-Verdichtung hergestellten Prüfkörper dargestellt sind.

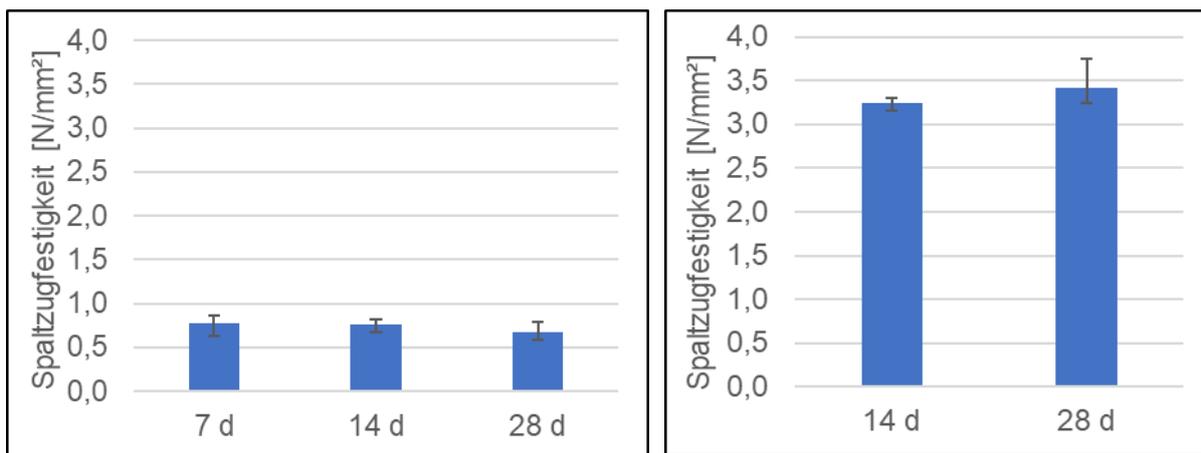


Abbildung 19: Spaltzugfestigkeiten Referenzbeton Instron-Verdichtung (links) und Proctor-Verdichtung (rechts)

Wie auch bei den Druckfestigkeiten erreichen die Prüfkörper, welche mittels der Proctor-Verdichtung hergestellt wurden, eine deutlich höhere Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen mit 3,4 N/mm² gegenüber 0,7 N/mm².

Die an den Proben ermittelten längenbezogenen Bruchlasten in Abhängigkeit des Verdichtungsverfahrens sind in Abbildung 20 dargestellt.

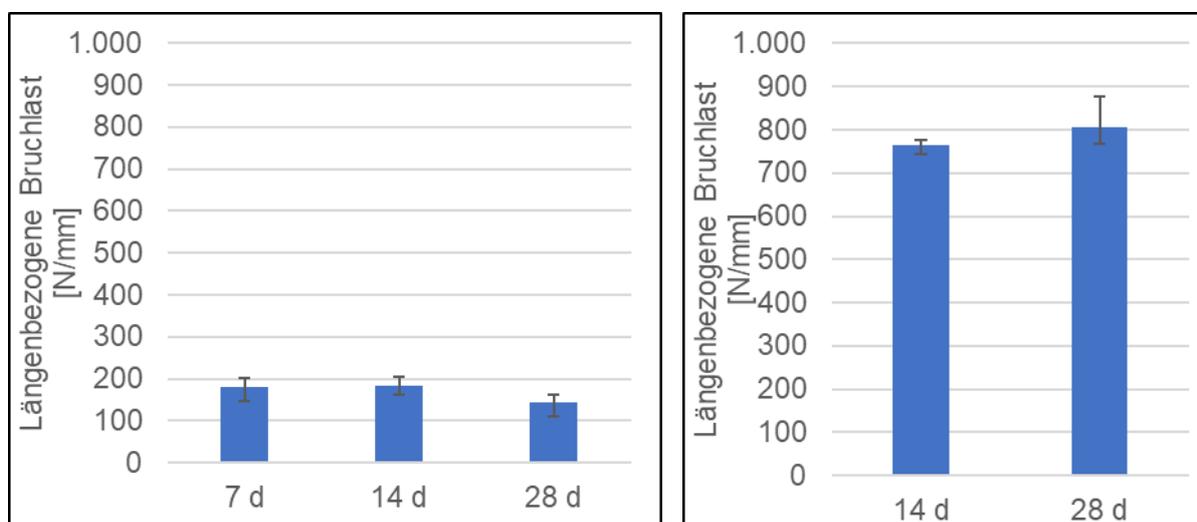


Abbildung 20: Längenbezogene Bruchlasten Referenzbeton Instron-Verdichtung (links) und Proctor-Verdichtung (rechts)

Für die längenbezogenen Bruchlasten ergeben sich qualitativ die gleichen Erkenntnisse wie für die Druck- und Spaltzugfestigkeiten. Die Verwendung der Proctor-Verdichtung führt nach 28 Tagen mit 805 N/mm gegenüber 143 N/mm zu deutlich höheren Werten.

4.3.2.6 E-Modul

Aufgrund der eindeutigen Erkenntnisse aus den vorangegangenen Untersuchungen wird der Fokus bei der Bestimmung des E-Moduls nach DIN EN 12390-13 [Reg08] auf Prüfkörper gelegt, die mittels der Proctor-Verdichtung verdichtet worden sind. Der für diese Betone ermittelte E-Modul betrug 36.000 N/mm².

4.3.2.7 Auswertung und weitere Vorgehensweise

Grundsätzlich erreichen die Prüfkörper, die mit der Proctor-Verdichtung hergestellt wurden, gegenüber den mittels der Instron-Verdichtung hergestellten Prüfkörpern technisch brauchbare Festbetoneigenschaften. Die Konsistenz und Grünstandfestigkeit des Referenzbetons konnte für eine Serienproduktion entsprechend eingestellt und die gewünschten Rohdichten erzielt werden.

Die ermittelten Festbetonkennzahlen liegen, bis auf die Spaltzugfestigkeit, die lediglich 0,2 N/mm² zu gering ausfällt, im Anforderungsbereich. Die normative Anforderung für eine Pflastersteinproduktion nach DIN EN 1338 [Reg09] muss eine Mindestspaltzugfestigkeit von 3,6 N/mm² erreichen. Die geringe Abweichung kann in den abweichenden Laborbedingungen und der geringen Anzahl an Prüfkörpern begründet sein. Die ermittelten längenbezogenen Bruchlasten übertreffen die nach 28 Tagen geforderten Werte nach DIN EN 1338 [Reg09] von 250 N/mm mit 805 N/mm deutlich. Die Druckfestigkeiten, welche in Beziehung zur Spaltzugfestigkeit stehen, erreichen mit 40 N/mm² ein ausreichendes Niveau.

Der E-Modul liegt mit 36.000 N/mm² in einem für Normalbeton üblichen Bereich. Für die in den folgenden Kapiteln zu entwickelnden und zu untersuchten alkalisch aktivierten Betone werden anhand des Referenzbetons die folgenden Anforderungen festgelegt, siehe Tabelle 14.

Tabelle 14: Anforderungsbereich für die alkalisch aktivierten Betone

Eigenschaft	Einheit	Kriterium/ Anforderung
1	2	3
Verarbeitbarkeit	[-]	rieselfähig und knetbar
Verdichtungsmaß	[-]	≥ 1,5
Grünstandfestigkeit	[-]	nach dem Ausschalen formstabil
Frischbetonrohddichte	[N/mm ²]	2,2 bis 2,4
28-d-Druckfestigkeit	[N/mm ²]	≥40
28-d-Spaltzugfestigkeit	[N/mm ²]	≥ 3,4 (normativ ≥3,6)
28-d-längenbezogene Bruchlast	[N/mm]	≥ 805 (normativ ≥ 250)
28-d-E-Modul	[N/mm ²]	30.000 bis 36.000

4.3.3 Beton auf Basis eines alkalisch aktivierten Mörtels

Im Folgenden werden die Ergebnisse zu den unterschiedlichen alkalisch aktivierten Betonen vorgestellt. Hierbei werden zu Gunsten der Übersichtlichkeit aufgrund der großen Anzahl von einstellbaren Rezepturparametern drei Hauptprüfreihe unterschieden. Die Differenzierung beruht in erster Linie auf dem Verhältnis von Betonbrechsand zu Metakaolin. Es wurden die folgenden Verhältnisse mit den entsprechenden Bezeichnungen untersucht, vgl. Tabelle 15. Wie schon innerhalb der Mörteluntersuchungen festgelegt wurde, wurde lediglich das Metakaolin PowerPozz verwendet.

Tabelle 15: Bezeichnung und Massenverhältnisse der alkalisch aktivierten Betone

Bezeichnung	Massenverhältnis Betonbrechsand/Metakaolin
[-]	[M.-/%/M.-%]
1	2
Beton Nr.1	25/75
Beton Nr.2	50/50
Beton Nr.3	40/60

Innerhalb dieser Hauptserien wurden der Wasserglasmodul, das Verhältnis des Betonbrechsand-Metakaolin-Gemisches (BMG) zur Gesteinskörnung und das Verhältnis von Aktivatorlösung zum BMG variiert.

4.3.3.1 Beton Nr.1: Massenverhältnis Betonbrechsand/Metakaolin 25/75

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Frisch- und Festbetonuntersuchungen für den Beton Nr.1 dargestellt. Der Beton Nr.1 wurde bezüglich des Verhältnisses von Aktivatorlösung (AL)/Brechsand-Metakaolin-Gemisch(BMG) und dem Verhältnis von Gesteinskörnung(G)/BMG entsprechend aufgeschlüsselt untersucht, vgl. Tabelle 16.

Tabelle 16: Versuchsreihen des Betons Nr.1

Versuchsreihe	WGM	Verhältnis AL/BMG	Verhältnis von G/BMG
[-]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4
01.01	1,9	1,1	5,0 bis 6,5
01.02	1,9	0,9	5,5 bis 6,5
01.03	1,9	1,3	6,3 bis 8,0
01.04	1,9	1,2	5,0 bis 7,0

Zur Wahrung der besseren Übersicht sind die vollständigen Prüfergebnisse, inklusive der ausgeschlossenen Betonrezepturen, im Anhang B zusammengestellt.

Wie auch bei den Untersuchungen am Referenzbeton, wird im folgenden Kapitel mit einem Hauptkriterium - der Konsistenz bzw. Verarbeitbarkeit des Betons Nr.1 - begonnen.

Im Anschluss an die Versuche zur Bestimmung der Konsistenz und Grünstandfestigkeit soll die vielversprechendste Rezeptur aus allen Versuchsreihen für die weitere Vorgehensweise ausgewählt werden.

4.3.3.1.1 Konsistenz

Die Untersuchungen zur Konsistenz an den jeweiligen Versuchsreihen werden im Folgenden dargestellt.

Versuchsreihe 01.01:

In der ersten Versuchsreihe 01.01 wurde das Betonbrechsand-Metakaolin-Gemisch (BMG) mit Aktivatorlösung im Verhältnis 1,1 versetzt. Die entsprechenden Einwaagen im Rahmen der Konsistenzprüfungen sind dem Anhang B, Tabelle B1 zu entnehmen.

Der optische bzw. haptische Eindruck der Versuchsreihe 01.01 nach dem Mischprozess und anschließendem Knetversuch sind für die jeweiligen G/BMG-Verhältnisse in Anhang B, Tabelle B6 dargestellt.

Angelehnt an das Gesteinskörnung/Zement-Kalkstein-Gemisch-Verhältnis des Referenzbetons von 4,37 wird zunächst das Verhältnis von Gesteinskörnung/Betonbrechsand-Metakaolin für den Beton Nr. 1 auf 5,0 gerundet.

In der haptischen Wahrnehmung erweist sich dieses jedoch als ungeeignet, da sich große klebrige Klumpen bzw. Schollen gebildet haben, welche beim Hochwerfen nicht auseinanderrieseln. Somit ist die geforderte Rieselfähigkeit des Betons, als wichtiges Kriterium für die Verarbeitbarkeit, nicht gegeben.

Die größeren Agglomerate weisen einen hohen Feinkornanteil auf, der sich vor allem an den Körnern der groben Gesteinskörnung angesammelt hat. Es ist davon auszugehen, dass der alkalisch aktivierte Beton Nr.1 weniger Feinststoffe benötigt und sich dadurch die Agglomerate auflösen lassen und die gewünschte Rieselfähigkeit einstellen lässt.

Im nächsten Schritt wird deshalb das G/BMG-Verhältnis von 5,0 auf 6,5 angehoben, um den Feinststoffanteil zu reduzieren.

Bei einem Verhältnis von 6,5 bilden sich erwartungsgemäß kleinere Agglomerate. Jedoch fällt der Beton beim Zusammendrücken in der Hand zu schnell auseinander, vgl. Anhang B, Tabelle B1, Zeile „6,5“. Es ist außerdem zu erkennen, dass nicht die gesamte Gesteinskörnung mit feineren Bestandteilen umhüllt wurde, sondern einzelne Gesteinskörner ohne „Verbund“ vorliegen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass bei einem Verhältnis von G/BMG von 6,5 nicht genügend BMG vorhanden ist, um die gesamte Gesteinskörnung zu umhüllen bzw. Brücken zwischen den einzelnen groben Gesteinskörnern zu bilden.

Durch iterative Vorgehensweise zwischen den Verhältnissen 5,0 und 6,5 konnten die folgenden Betonrezepturen für die weiterführenden Untersuchungen identifiziert werden, vgl. Tabelle 17.

Tabelle 17: Ausgewählte Rezepturen der Versuchsreihe 01.01

Bezeichnung	Wasserglas- modul	Verhältnis Beton- brechsand/Me- takaolin	Verhältnis Aktivatorlö- sung/BMG	Verhältnis Gesteins- körnung/ BMG
[-]	[-]	[M.-%/ M.-%]	[-]	[-]
1	2	3	4	5
1,9_25/75_1,1_5,1	1,9	25/75	1,1	5,1
1,9_25/75_1,1_5,3	1,9	25/75	1,1	5,3
1,9_25/75_1,1_5,5	1,9	25/75	1,1	5,5
1,0_25/75_1,1_5,7	1,9	25/75	1,1	5,7

Die Betonrezeptur 1,9_25/75_1,1_5,1 wird bereits als grenzwertig eingestuft, da der Frischbeton hier nur noch sehr gering rieselfähig ist.

An den ausgewählten Rezepturen wird im nächsten Schritt die Grünstandfestigkeit, vgl. Kapitel 4.3.3.1.2, ermittelt.

In der nachfolgenden Versuchsreihe 01.02 wird gegenüber der Reihe 01.01 das Verhältnis von Aktivatorlösung/BMG von 1,1 auf 0,9 reduziert.

Versuchsreihe 01.02:

Ausgehend von der Versuchsreihe 01.01 werden in der Versuchsreihe 01.02 die G/BMG-Verhältnisse 5,5, 6,1 und 6,5 untersucht. Das Verhältnis von Aktivatorlösung/BMG wird von 1,1 auf 0,9 reduziert.

Der optische und haptische Eindruck der erzeugten Betone ist in Anhang B, Tabelle B7 dargestellt.

Hier legt sich das nach Zugabe der Aktivatorlösung vergleichsweise dickflüssigere BMG vorrangig um die größeren Gesteinskörner. Es bilden sich große klebrige Schollen und die kleineren Gesteinskörner liegen „lose“ und „unvernetzt“ in dem Betongemisch vor.

Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Verringerung des G/BMG-Verhältnisses von 6,5 auf 5,5. Die Schollenbildung nimmt dadurch weiter zu. Es werden zwar mehr Gesteinskörner gebunden, jedoch bildet sich kein homogenes Betongemisch aus, welches den optischen und haptischen Anforderungen entspricht.

Es ist zu vermuten, dass sich das dickflüssigere und kleberigere BMG schlechter zwischen den Gesteinskörnern verteilt und dadurch nicht alle Gesteinskörner umhüllt. Da bereits an dieser Stelle erkennbar ist, dass sich keine akzeptable Verarbeitbarkeit einstellen lässt, wird das AL/P-Verhältnis von 0,9 nicht weiter untersucht.

Abgeleitet aus diesen Erkenntnissen wird in der Versuchsreihe 01.03 das AL/BMG-Verhältnis von 0,9 auf 1,3 angehoben.

Versuchsreihe 01.03:

In der dritten Versuchsreihe wird das Verhältnis gegenüber der Versuchsreihe 01.02 auf 1,3 angepasst und liegt somit geringfügig höher als in der Versuchsreihe 01.01 mit einem Verhältnis von 1,1.

Wie auch in der vorherigen Versuchsreihe wird mit einem G/BMG-Verhältnis von 6,5 zur Bestimmung der Konsistenzigenschaften begonnen. Hier hat das BMG eine deutlich flüssigere Konsistenz im Vergleich zu den Versuchsreihen 01.01 und 01.02. Die gewonnenen optischen und haptischen Eindrücke der Versuchsreihe 01.03 sind in Anhang B, Tabelle B9 dargestellt.

Beim Anmischen der ersten Betonmischung mit einem G/BMG-Verhältnis von 6,5 fällt auf, dass sich keine klumpenartigen Schollen ausbilden. Bei der haptischen Untersuchung fühlt sich der Beton nass und weniger klebrig an. Dadurch ist er merklich weniger zusammenhaltend und fällt aufgrund der geringeren Klebwirkung deutlich leichter auseinander und erreicht eine akzeptable Rieselfähigkeit.

Aus den weiteren iterativen Versuchen durch Variation des G/BMG-Verhältnisses werden folgende Zusammensetzungen für die in Kapitel 4.3.3.1.2 bestimmten Grünstandfestigkeiten ausgewählt, vgl. Tabelle 18.

Tabelle 18: Ausgewählte Rezepturen der Versuchsreihe 01.03

Bezeichnung	Wasserglasmodul	Verhältnis Betonbrechsand/Metakaolin	Verhältnis Aktivatorlösung/BMG	Verhältnis Gesteinskörnung/BMG
[-]	[-]	[M.-%/M.-%]	[-]	[-]
1	2	3	4	5
1,9_25/75_1,3_7,3	1,9	25/75	1,3	7,3
1,9_25/75_1,3_7,1	1,9	25/75	1,3	7,1

Auf Basis der Erkenntnisse aus den Versuchsreihen 01.01 bis 01.03 wurde in der nachfolgenden Versuchsreihe 01.04 das Verhältnis zwischen Aktivatorlösung und BMG zu 1,2 eingestellt.

Versuchsreihe 01.04:

Die Versuchsreihe 01.04 wird vor dem Hintergrund betrachtet, einen weniger kleberigen Beton als in der Reihe 01.01 und einen weniger „feuchten“ Beton im Vergleich zu der Reihe 01.03 zu erhalten.

Ausgehend von einem G/BMG-Verhältnis von 7,0 werden nun die verschiedenen Konsistenzen für ein AL/BMG-Verhältnis von 1,2 untersucht. Die optischen und haptischen Eindrücke der untersuchten Betone sind in Anhang B, Tabelle B10 dargestellt.

Bei den hohen Verhältnissen zwischen 6,5 und 7,0 bilden sich wieder große Schollen und ein Teil der Gesteinskörner liegt noch lose im Betongemisch vor, vgl. Anhang B, Tabelle B10, Zeile "7,0". Bei niedrigeren Verhältnissen zwischen 4,8 und 6,3 findet eine deutlich feinere Verteilung der Masse statt, vgl. Anhang B, Tabelle B10, Zeile "5,0" und "5,6". Durch die weiterführende iterative Vorgehensweise wurden die folgenden Zusammensetzungen entsprechend Tabelle 19 für die in Kapitel 4.3.3.1.2 ermittelten Grünstandfestigkeiten ausgewählt.

Tabelle 19: Ausgewählte Rezepturen der Versuchsreihe 01.04

Bezeichnung	Wasserglasmodul	Verhältnis Betonbrechsand/Metakaolin	Verhältnis Aktivatorlösung/BMG	Verhältnis Gesteinskörnung/BMG
[-]	[-]	[M.-%/M.-%]	[-]	[-]
1	2	3	4	5
1,9_25/75_1,2_5,2	1,9	25/75	1,2	5,2
1,9_25/75_1,2_5,6	1,9	25/75	1,2	5,6
1,9_25/75_1,2_6,0	1,9	25/75	1,2	6,0

4.3.3.1.2 Grünstandfestigkeit

Für die anhand der Konsistenzprüfungen ausgewählten Betonrezepturen werden im weiteren Verlauf die Grünstandfestigkeiten ermittelt. Hierbei wird der junge Beton direkt nach der Verdichtung wieder ausgeschalt und die Formstabilität des Prüfkörpers über die Zeit beobachtet.

Die Grünstandfestigkeit ist bei der Pflastersteinherstellung ein wichtiges Kriterium im Hinblick auf die einheitlichen geometrischen Abmessungen der ausgehärteten Betonsteine. In der nachfolgenden Tabelle sind die aus Kapitel 4.3.3.1.1 aufgrund ihres optischen und haptischen Eindrucks ausgewählten Betonrezepturen zusammengefasst.

Tabelle 20: Ausgewählte Versuchsserien der Reihen 01.01 bis 01.04 zur Bestimmung der Grünstandfestigkeit

Ver-suchs-reihe	Bezeichnung	WGM	Verhältnis B/M	Verhältnis AL/BMG	Verhältnis G/ BMG
[-]	[-]	[-]	[M.-%/M.-%]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6
01.01	1,9_25/75_1,1_5,7	1,9	25/75	1,1	5,7
	1,9_25/75_1,1_5,5	1,9	25/75	1,1	5,5
	1,9_25/75_1,1_5,3	1,9	25/75	1,1	5,3
	1,9_25/75_1,1_5,1	1,9	25/75	1,1	5,1
01.03	1,9_25/75_1,3_7,3	1,9	25/75	1,3	7,3
	1,9_25/75_1,3_7,1	1,9	25/75	1,3	7,1
01.04	1,9_25/75_1,2_5,2	1,9	25/75	1,2	5,2
	1,9_25/75_1,2_5,6	1,9	25/75	1,2	5,6
	1,9_25/75_1,2_6,0	1,9	25/75	1,2	6,0

Versuchsreihe 01.01:

Aus den in Tabelle 20 für die Versuchsreihe 01.01 aufgeführten Rezepturen wurden zylindrische Prüfkörper zur Bestimmung der Grünstandfestigkeit hergestellt. In Abbildung 21 sind beispielhaft die frisch ausgeschalteten Betonzyylinder für die G/BMG-Verhältnisse von 5,5 bis 5,1 dargestellt.



Abbildung 21: Versuchsreihe 01.01: Betonproben direkt nach dem Ausschalen (links: 5,5; mittig: 5,3; rechts: 5,1)

Alle Betonproben bleiben nach dem Ausschalen für mindestens zehn Minuten ohne erkennbare Formveränderung stehen und erfüllen somit die gestellten Anforderungen an die Grünstandfestigkeit.

Versuchsreihe 01.03:

Für die in Tabelle 20 für die Versuchsreihe 01.03 aufgeführten Rezepturen wurden zylindrische Prüfkörper zur Bestimmung der Grünstandfestigkeit hergestellt. In Abbildung 22 sind beispielhaft die frisch ausgeschalteten Betonzyylinder für die G/BMG-Verhältnisse von 7,1 und 7,3 dargestellt.

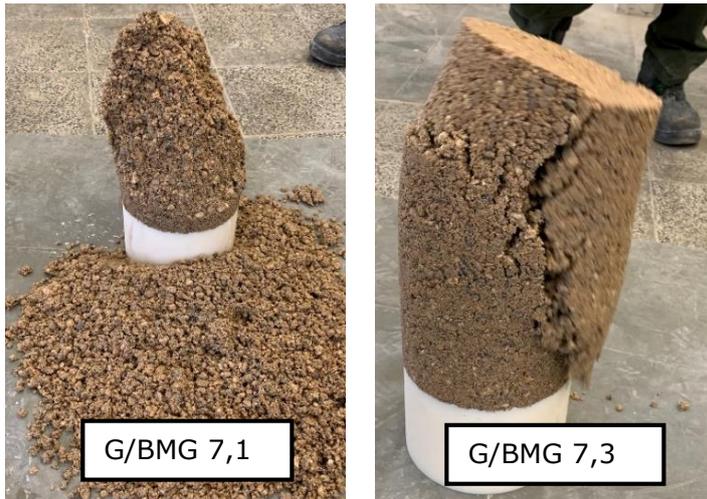


Abbildung 22: Versuchsreihe 01.03: Betonproben nach dem Ausschalen (links: 7,3 und rechts: 7,1)

Die bereits im Rahmen der Konsistenzprüfung als eher „feucht bzw. nass“ bezeichneten Proben bleiben maximal 30 s. formstabil und zerfallen anschließend. Als Hintergrund ist ein zu hohes Verhältnis von Aktivatorlösung zu BMG zu vermuten. Ähnlich wie bei einem zu hohen w/z-Wert bei hydraulisch gebundenen Betonen wirkt zu viel Aktivatorlösung festigkeitsmindernd bzw. reduziert die „Klebwirkung“ zwischen den einzelnen Partikeln der Gesteinskörnung.

Aufgrund dieser unzureichenden Grünstandfestigkeiten werden die Betonrezepturen dieser Versuchsreihe im Folgenden nicht weiter untersucht.

Versuchsreihe 01.04:

Aus den in Tabelle 20 für die Versuchsreihe 01.04 aufgeführten Rezepturen wurden zylindrische Prüfkörper zur Bestimmung der Grünstandfestigkeit hergestellt.

In Abbildung 23 sind beispielhaft die frisch ausgeschalteten Betonzylinder für die G/BMG-Verhältnisse von 5,2 bis 6,0 dargestellt.

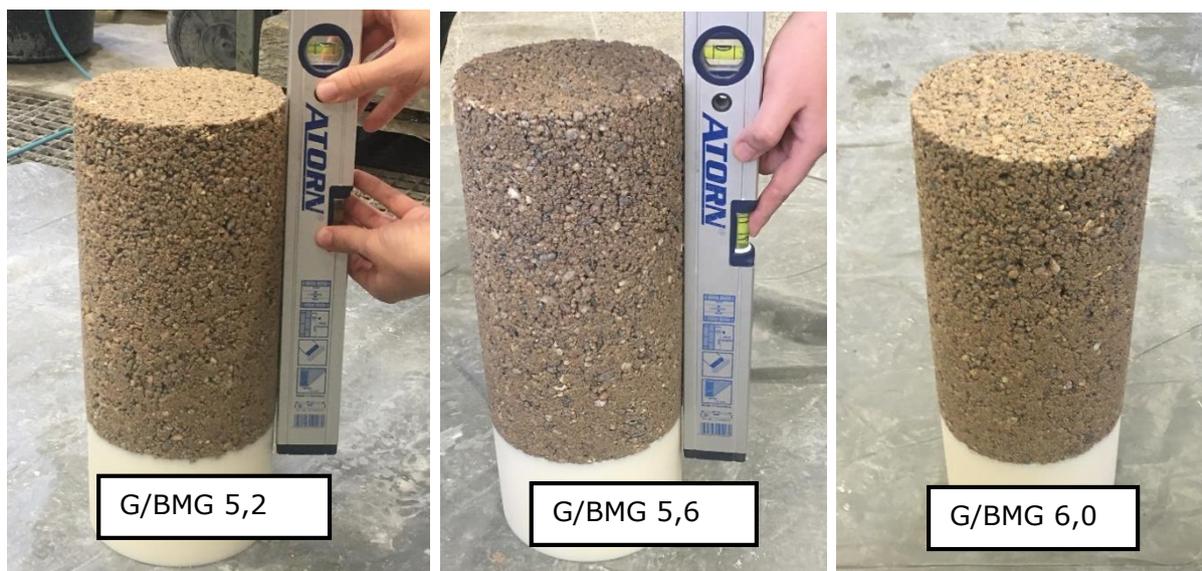


Abbildung 23: Versuchsreihe 01.04: Betonproben direkt nach dem Ausschalen (links: 5,2; mittig: 5,6; rechts: 6,0)

Wie bei der Versuchsreihe 01.01 bleiben alle zylindrischen Betonproben nach dem Ausschalen standfest und formstabil.

4.3.3.1.3 Bewertung der Ergebnisse und weitere Vorgehensweise

Der Beton der Versuchsreihe 01.01 mit dem AL/BMG-Verhältnis von 1,1 weist im Vergleich zur Referenz eine sehr klebrige Konsistenz auf. Dadurch ist dieser zwar sehr zusammenhängend, aber nur gering rieselfähig, was sich für die Produktion im Betonwerk als nachteilig darstellt.

Die in der Versuchsreihe 01.02 erzielten Ergebnisse zur Konsistenz bei einem G/BMG-Verhältnis von 0,9 deuteten bereits nicht auf eine Gebrauchstauglichkeit hin, weshalb auf Versuche zur Bestimmung der Grünstandfestigkeit verzichtet wurde.

Die Versuchsreihe 01.03 zeigte gegenüber dem Referenzbeton eine deutlich feuchtere Beschaffenheit mit einem eingestellten AL/BMG-Verhältnis von 1,2.

Unter Berücksichtigung der bis zu diesem Zeitpunkt durchgeführten Untersuchungen wird die Rezeptur der Versuchsreihe 01.04 mit einem G/BMG-Verhältnis von 1,2 für die weiteren Betonprüfungen bevorzugt.

Nicht nur die Rieselfähigkeit, sondern auch die Nachhaltigkeit sprechen hier für einen Beton mit einem niedrigeren Feinstkorngesamt. Daher werden die Eigenschaften des Betons 1,9_25/75_1,2_6,0 in den folgenden Kapiteln weiterverfolgt.

Zur besseren Übersicht wird der Beton mit der Rezeptur 1,9_25/75_1,2_6,0 mit der vereinfachten Schreibweise Beton Nr.1 bezeichnet.

4.3.3.1.4 Dynamisches Verdichtungsmaß

Bei der Bestimmung des Verdichtungsmaßes mithilfe des Proctorhammers wurde bei der Rezeptur Beton Nr.1 ein Verdichtungsmaß von 1,43 erreicht und liegt damit geringfügig unterhalb des Anforderungsbereiches von $> 1,5$, vgl. Tabelle 14.

Da alle Proben, sowohl die des Referenzbetons als auch die der alkalisch aktivierten Betone, mit 20 Proctorschlägen verdichtet wurden, zeigt sich hierbei die schwierige Verdichtbarkeit des alkalisch aktivierten Betons gegenüber dem Referenzbeton. Der alkalisch aktivierte Beton lässt sich statt in die Konsistenzklasse C0 (sehr steif) lediglich in die Konsistenzklasse C1 (steif) einordnen.

4.3.3.1.5 Frischbetonrohichte

Die für den Beton Nr.1 ermittelte Frischbetonrohichte erreicht mit $2,16 \text{ kg/dm}^3$ nicht ganz den auf $2,2$ bis $2,4 \text{ kg/dm}^3$ festgelegten Anforderungsbereich, vgl. Tabelle 14. Eine Erklärung für die leicht geringere Rohichte des alkalisch aktivierten Betons ist wahrscheinlich in der schlechteren Verdichtung gegenüber einem hydraulisch gebundenen Baustoff zu finden.

4.3.3.1.6 Druckfestigkeit

Die Prüfkörper zur Bestimmung der Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 [Reg06] wurden unter Zuhilfenahme der Instron- und Proctor-Verdichtung hergestellt. Mit jedem Verdichtungsverfahren werden für die Prüfzeitpunkte 7, 14 und 28 Tage je drei Prüfkörper zur Bildung eines Mittelwertes hergestellt.

Bei der Druckfestigkeitsentwicklung der Prüfkörper, welche mittels der Instron-Verdichtung hergestellt wurden, werden nach 28 Tagen sehr geringe Werte von etwa 8 N/mm^2 erreicht. Auch der Referenzbeton erreicht mit diesem Verdichtungsverfahren nur sehr geringe Festigkeiten von etwa 6 N/mm^2 . Diese Ergebnisse zeigen, dass die Verdichtungsleistung der Instron-Verdichtung zu gering für die Herstellung geeigneter Betonsteinprodukte und nicht mit der Verdichtungsleistung im Industriemaßstab vergleichbar ist.

Bei der Proctor-Verdichtung werden bereits nach 14 Tagen mit 22 N/mm^2 deutlich höhere Festigkeiten erreicht.

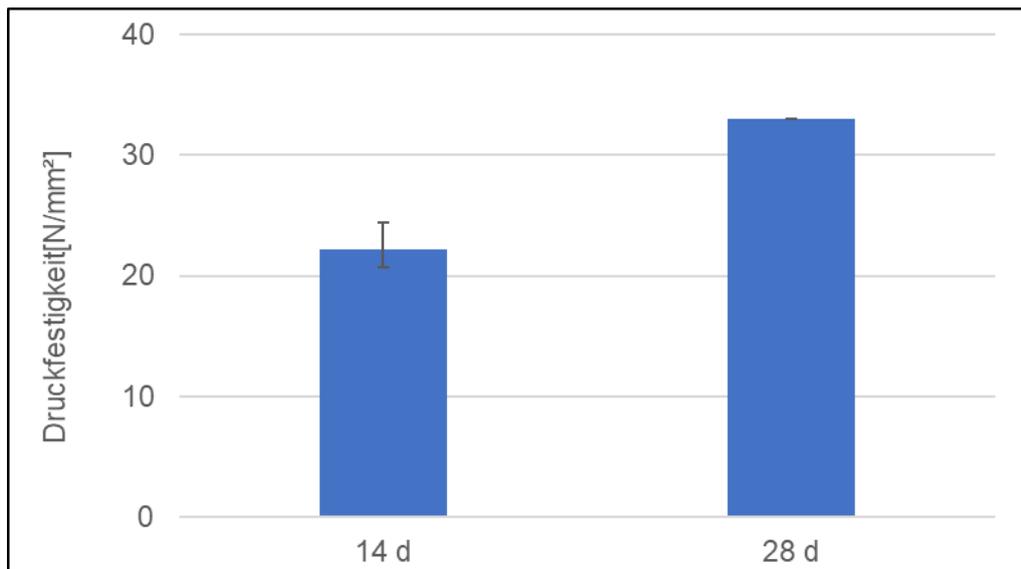


Abbildung 24: Entwicklung der Druckfestigkeiten des Betons Nr.1 mit Proctor-Verdichtung

Nach 28 Tagen erreichen die Prüfkörper eine mittlere Druckfestigkeit von rund 33 N/mm².

4.3.3.1.7 E-Modul

Der E-Modul wurde an mittels der Proctor-Verdichtung hergestellten Prüfkörpern im Alter von 28 Tagen nach DIN EN 12390-13 [Reg08] zu einem Wert von 26.715 N/mm² ermittelt. Als Rechenwert für einen typischen C 30/37 wird nach DIN EN 1992-1-1/NA [Reg10] ein E-Modul von 34.000 N/mm² angesetzt.

4.3.3.1.8 Spaltzugfestigkeit und längenbezogene Bruchlast

In Abbildung 25 werden die Spaltzugfestigkeiten nach DIN EN 12390-6 [Reg07] für den Beton Nr.1 dargestellt.

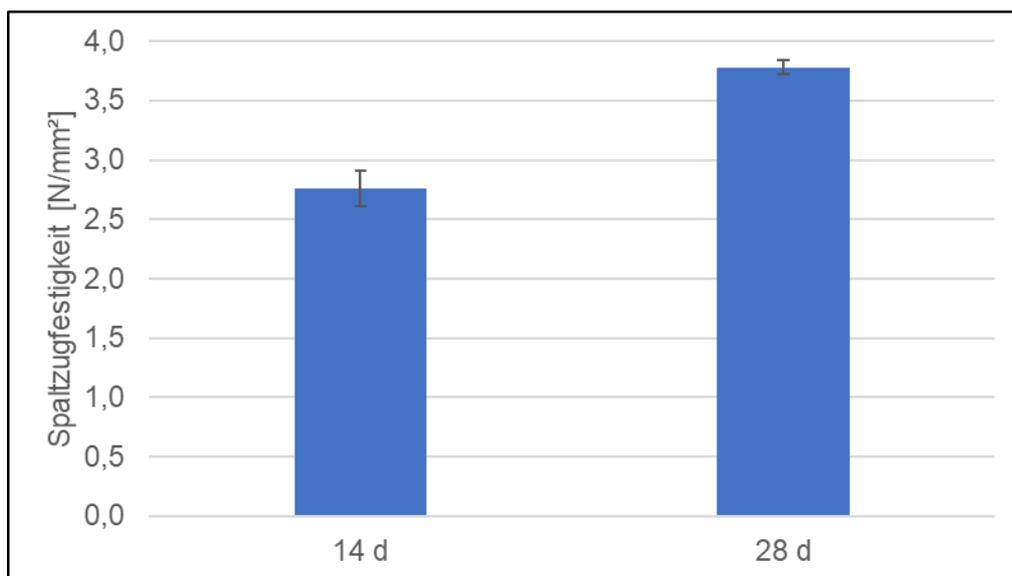


Abbildung 25: Entwicklung der Spaltzugfestigkeit des Beton Nr.1 nach 14 und 28 Tagen

Vom 14. bis zum 28. Tag ist eine moderate Steigerung der Spaltzugfestigkeiten zu beobachten. Die mit $3,8 \text{ N/mm}^2$ erreichte Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen liegt im festgelegten Anforderungsbereich von $> 3,6 \text{ N/mm}^2$, vgl. Tabelle 14.

Als ein weiteres normatives Kriterium wurden die in Abbildung 26 dargestellten längenbezogenen Bruchlasten parallel zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit für den Beton Nr.1 ermittelt.

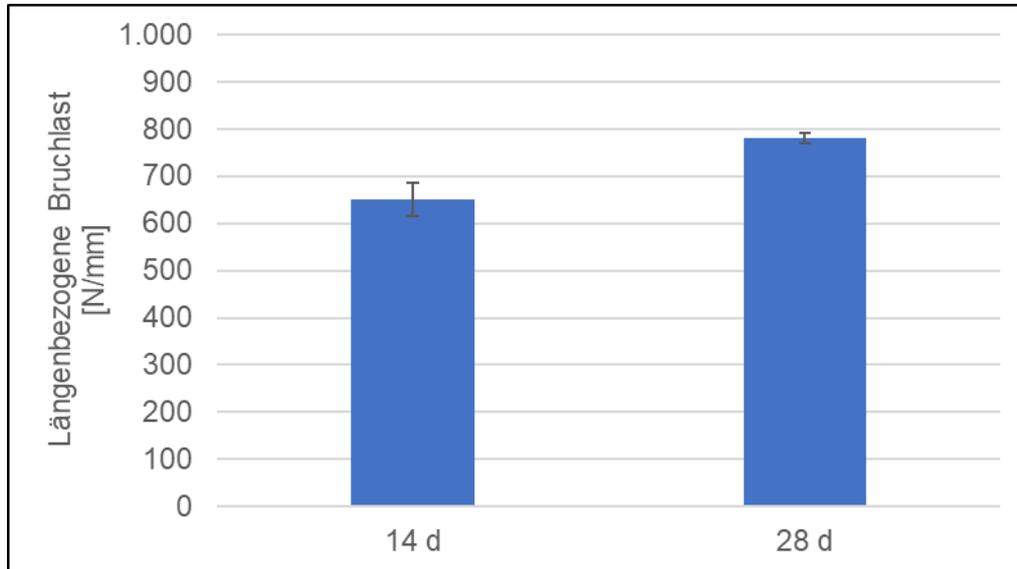


Abbildung 26: Entwicklung der längenbezogenen Bruchlast des Betons Nr.1 nach 14 und 28 Tagen

Die längenbezogene Bruchlast erreichte mit einem Wert von 884 N/mm eine höhere längenbezogene Bruchlast als der Referenzbeton mit $805,35 \text{ N/mm}$ und erfüllt die Anforderungen an den Anforderungsbereich, vgl. Tabelle 14.

4.3.3.1.9 Bewertung der Ergebnisse und weitere Vorgehensweise

Zur besseren Übersicht werden in Tabelle 21 die formulierten Anforderungen mit den Untersuchungsergebnissen für den Beton Nr.1 gegenübergestellt. Als Beton Nr.1 wurde die Betonrezeptur vereinfachend bezeichnet, welche nach den Untersuchungen zur Konsistenz und Grünstandfestigkeit als aussichtsreich identifiziert und für die weiteren Prüfungen verwendet wurde (Rezeptur 1,9_25/75_1,2_6,0).

Tabelle 21: Gegenüberstellung des Anforderungsbereiches und der ermittelten Kennzahlen für den Beton Nr.1

Eigenschaft	Kriterium / Anforderung	Beton Nr.1	Kriterium erfüllt
1	2	3	4
Verarbeitbarkeit	rieselfähig und knetbar	rieselfähig und knetbar	ja
Verdichtungsmaß	$\geq 1,5$	1,43	nein
Grünstandfestigkeit	nach dem Ausschalen formstabil	nach dem Ausschalen formstabil	ja
Frischbetonrohddichte	2,2 bis 2,4 kg/dm^3	2,16 kg/dm^3	nein
28-d-Druckfestigkeit	$\geq 40 \text{ N/mm}^2$	33 N/mm^2	nein
28-d-Spaltzugfestigkeit	$\geq 3,4 \text{ N/mm}^2$ (normativ $\geq 3,6 \text{ N/mm}^2$)	3,8 N/mm^2	ja

Fortsetzung Tabelle 21: Gegenüberstellung des Anforderungsbereiches und der ermittelten Kennzahlen für den Beton Nr.1

Eigenschaft	Kriterium / Anforderung	Beton Nr.1	Kriterium erfüllt
1	2	3	4
28-d-längenbezogene Bruchlast	≥ 805 N/mm (normativ ≥ 250 N/mm)	884 N/mm	ja
28-d-E-Modul	30.000 bis 36.000 N/mm ²	26.715 N/mm ²	nein

Aus der vorstehenden Tabelle ist zu entnehmen, dass der Beton Nr.1 einige Kennwerte des Anforderungsbereiches nicht erreicht. Die zu geringe Rohdichte und das zu geringe Verdichtungsmaß sind im Kontext zu betrachten und könnten durch eine intensivere Verdichtung, wie sie im Werk stattfindet, erreicht werden.

Auch bei der Druckfestigkeit ist eine Verknüpfung zur Rohdichte abzuleiten. Ob diese aber durch eine intensivere Verdichtung von 33 N/mm² auf 40 N/mm² gesteigert werden kann, müsste in weiterführenden Untersuchungen ermittelt werden. Gleiches gilt für den ermittelten E-Modul. Anzumerken ist, dass die Betondruckfestigkeit kein normatives Kriterium für Betonpflastersteine darstellt und lediglich im Werk als Hilfsgröße für die normativ geforderten Spaltzugfestigkeiten herangezogen wird.

Bei den normativ geforderten Spaltzugfestigkeiten und längenbezogenen Bruchlasten nach DIN EN 13183 erreichte der alkalisch aktivierte Beton Nr.1 die geforderten und in Tabelle 21 aufgeführten Werte.

Der in diesem Kapitel untersuchte Beton wies einen Betonbrechsandanteil von 25 M.-% und einen Metakaolinanteil von 75 M.-% auf. Im Hinblick auf eine maximale Ausnutzung des Betonbrechsandes als Substitut für Metakaolin wurden im nächsten Kapitel Prüfserien von Betonen mit einem Betonbrechsandanteil von 50 % näher untersucht.

4.3.3.2 Beton Nr.2: Betonbrechsand zu Metakaolin-Verhältnis 50/50 M.-%

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse für den Beton Nr.2 dargestellt. Der Beton Nr.2 wurde gegenüber dem Beton Nr.1 mit einem Betonbrechsand/Metakaolinverhältnis von 50/50 hergestellt. Die eingestellten Verhältnisse zwischen Aktivatorlösung (AL)/Brechsand-Metakaolin-Gemisch(BMG) sowie zwischen Gesteinskörnung(G) und BMG sind in nachfolgender Tabelle 22 aufgeschlüsselt.

Tabelle 22: Versuchsreihen des Beton Nr.2

Bezeichnung	WGM	Verhältnis B/M	Verhältnis AL/BMG	Verhältnis G/ BMG
[-]	[-]	[M.-%/ M.-%]	[-]	[-]
1	2	3	4	5
1,9_50/50_1,1_5,0	1,9	50/50	1,1	5,0
1,9_50/50_1,1_5,2	1,9	50/50	1,1	5,2
1,9_50/50_1,0_5,6	1,9	50/50	1,0	5,6
1,9_50/50_0,9_5,6	1,9	50/50	0,9	5,6
1,9_50/50_0,9_5,8	1,9	50/50	0,9	5,8

Wie auch bei den Untersuchungen zum Beton Nr.1 wurde im folgenden Kapitel mit einem Hauptkriterium - der Konsistenz bzw. Verarbeitbarkeit - begonnen.

Im Anschluss an die Versuche zur Bestimmung der Konsistenz und Grünstandfestigkeit wurde die vielversprechendste Rezeptur aus allen Versuchsreihen für die weitere Vorgehensweise herangezogen.

4.3.3.2.1 Konsistenz

Für die Konsistenzprüfungen wurden wie auch bei den vorhergehenden Betonrezepturen die Konsistenz bzw. Verarbeitbarkeit anhand von optischen und haptischen Eigenschaften ermittelt.

Das optische Erscheinungsbild und die Haptik nach dem Knetversuch für ausgewählte Betonrezepturen sind in Abbildung 27 dargestellt.



Abbildung 27: Knetversuch der Versuchsreihen Beton Nr.2 (von links nach rechts) 1,1_5,0; 0,9_5,6; 1,3_5,9; 1,0_5,6

Die Rezepturen des Betons Nr.2 besitzen im Allgemeinen eine lockere und gut rieselfähige Konsistenz.

Während der Knetversuche wurde festgestellt, dass sich der Beton mit einem Brechsandanteil von 50 % bei allen eingestellten Aktivatorlösung/Betonsand-Metakaolin-Gemisch (BMG)-Verhältnissen deutlich nasser und schwerer anfühlt als der Referenzbeton bzw. der alkalisch aktivierte Beton Nr.1.

Alle in Tabelle 22 aufgeführten Versuchsreihen der Rezeptur Nr.2 werden zur Überprüfung der Grünstandfestigkeit herangezogen.

4.3.3.2.2 Grünstandfestigkeit

Alle untersuchten Varianten der Betonrezeptur Nr.2, die direkt nach dem Verdichten ausgeschalt wurden, fallen bereits nach wenigen Sekunden zusammen und sind damit für die weiteren Prüfungen nicht geeignet.

Da keine der ausgewählten Rezepturen des 50/50-Betons eine ausreichende Grünstandfestigkeit besitzt, wird im Folgenden der Anteil des Betonbrechsands auf 40 M.-% reduziert und der Anteil des Metakaolins auf 60 M.-% erhöht, was zu Beton Nr. 3 führt.

4.3.3.3 Beton Nr.3: Betonbrechsand zu Metakaolin-Verhältnis 40/60 M.-%

Wie auch bei den Versuchsreihen zum Beton Nr.1, vgl. Kapitel 4.3.3.1, wurden für den Beton Nr.3 im ersten Schritt mehrere Versuchsreihen festgelegt, die in Tabelle 23 zusammengestellt sind.

Tabelle 23: Versuchsreihen Beton Nr.3

Versuchsreihe	WGM	Verhältnis AL/BMG	Verhältnis G/BMG
[-]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4
03.01	1,9	1,1	6,0 bis 7,0
03.02	1,9	0,9	4,0 bis 7,0
03.03	1,9	1,0	5,0 bis 7,0

4.3.3.3.1 Konsistenz

Innerhalb der Prüfung zur Konsistenz des Betons Nr. 3 mit einem Betonbrechsand/Me-takaolin-Verhältnis von 40/60 wurden unterschiedliche Verhältnisse zwischen Aktivatorlö-sung und BMG eingestellt und untersucht.

Versuchsreihe 03.01:

In Anhang B, Tabelle B17 sind die Ergebnisse zur Konsistenzuntersuchung der Versuchs-reihe 03.01 direkt nach dem Anmischen und anschließendem Knetversuch dargestellt.

Zur Konsistenzprüfung wurde zunächst ein AL/BMG-Verhältnis von 1,1 mit einem G/BMG-Verhältnis von 7,0 gewählt. Ähnlich wie bei Beton Nr.1, vgl. Kapitel 4.3.3.1, bilden sich vermehrt Schollen bei der Zugabe des Mörtels zu der Gesteinskörnung. Die Gesteinskör-nung wird nicht vollständig umhüllt, vgl. Anhang B, Tabelle B17, Zeile „7,0“.

Bei Abstufung des G/BMG-Verhältnisses auf 6,5 verringert sich die Schollenbildung und die Masse hält besser zusammen, vgl. Anhang B, Tabelle B17, Zeile „6,5“.

In weiteren Abstufungen stellt sich heraus, dass ein G/BMG-Verhältnis von 6,3, vgl. An- hang B, Tabelle B17, Zeile „6,3“, zu favorisieren ist, da der Beton bei einem G/BMG-Verhältnis von 6,0 bereits haptisch zu nass und zu schwer erscheint.

Nach dem Zusammenkneten des Betons mit einem G/BMG-Verhältnis von 6,0 fällt dieser leichter auseinander als bei einem Verhältnis von 6,3.

Auf Basis der zahlreichen Versuche zur Konsistenzschatzung wird lediglich die in Tabelle 24 aufgeführte Rezeptur der Versuchsreihe 03.01 zur Bestimmung der Grünstandfestigkeit herangezogen.

Tabelle 24: Ausgewählte Rezeptur der Versuchsreihe 03.01

Bezeichnung	WGM	Verhältnis B/M	Verhältnis AL/BMG	Verhältnis G/BMG
[-]	[-]	[M.-%/M.-%]	[-]	[-]
1	2	3	4	5
1,9_40/60_1,1_6,3	1,9	40/60	1,1	6,3

Aufgrund der Haptik des Betons dieser Reihe werden AL/P-Verhältnisse größer 1,1 als nicht zielführend erachtet. Eine größere Menge der Aktivatorlösung im Beton würde die schwere und nasse Beschaffenheit verstärken und den Zusammenhalt weiter verschlechtern. Ein ähnliches Phänomen wurde u. a. auch bei Beton Nr.1 mit einem AL/BMG-Verhältnis von 1,3 beobachtet, vgl. Kapitel 4.3.3.1.

Im folgenden Abschnitt wird die Konsistenz des Betons innerhalb der Versuchsserie 03.02 mit einem reduzierten AL/BMG-Verhältnis von 0,9 getestet.

Versuchsreihe 03.02:

Innerhalb der Versuchsreihe 03.02 wird das AL/BMG-Verhältnis gegenüber der Versuchs-reihe 03.01 von 1,2 auf 0,9 reduziert.

Der optische und haptische Eindruck für die G/BMG-Verhältnisse 5,5, 6,0 und 7,0 sind exemplarisch in Anhang B, Tabelle B19 dargestellt.

Während des Anmischens des alkalisch aktivierten Betons mit einem AL/BMG-Verhältnis von 0,9 und einem G/BMG-Verhältnis von 7,0 bilden sich ähnlich wie beim Beton Nr.2 größere Schollen, bestehend aus Sand und Leim. Die grobe Gesteinskörnung wird deutlich schlechter umhüllt.

Mit der Zugabe von weiterem Mörtel entstand eine homogene Masse, in der alle Bestandteile gebunden wurden. Zwischen einem G/BMG-Verhältnis von 5,5 und 6,0 haftet der Beton beim Zusammenkneten gut zusammen, vgl. Anhang B, Tabelle B19, Zeile „6,0“, und ließ sich unter Bewegung leicht zerrieseln. Bei einem G/BMG-Verhältnis kleiner 5,5 bekommt die Rezeptur eine immer klebrigere Konsistenz. Der Beton haftet dadurch zwar sehr gut zusammen, besitzt aber nicht die für die Herstellung erforderliche Rieselfähigkeit.

Auf Basis der zahlreichen Versuche zur Konsistenzschätzung wurden die in Tabelle 25 aufgeführte Rezepturen der Versuchsreihe 03.02 zur Bestimmung der Grünstandfestigkeit herangezogen.

Tabelle 25: Ausgewählte Rezepturen der Versuchsreihe 03.02

Bezeichnung	WGM	Verhältnis B/M	Verhältnis AL/BMG	Verhältnis G/BMG
[-]	[-]	[M.-%/M.-%]	[-]	[-]
1	2	3	4	5
1,9_40/60_0,9_5,2	1,9	40/60	0,9	5,2
1,9_40/60_0,9_5,5	1,9	40/60	0,9	5,5
1,9_40/60_0,9_5,8	1,9	40/60	0,9	5,8
1,9_40/60_0,9_6,0	1,9	40/60	0,9	6,0

Bei Herstellung der Betonrezepturen zur Versuchsreihe 03.02 mit eine AL/P-Verhältnis von 0,9 fiel auf, dass diese im Vergleich zu der Rezeptur mit einem AL/P-Verhältnis von 1,1 besser zusammenhaften. Dies kann auf die kleinere Menge der Aktivatorlösung im Vergleich zu der Menge des reaktiven Metakaolins zurückgeführt werden. Vergleicht man die Rieselfähigkeit der ersten beiden Versuchsreihen 03.01 und 03.02 fällt jedoch auf, dass die Serie 03.01 mit dem größeren AL/BMG-Verhältnis von 1,1 den gestellten Anforderungen besser entspricht.

Um den optimalen Zusammenhalt der Gesteinskörnung und des Bindemittels zu erhalten und dabei die Rieselfähigkeit nicht zu verlieren, soll in der Versuchsreihe 03.03 die Konsistenz der 40/60-Grundrezeptur bei einem AL/BMG-Verhältnis von 1,0 untersucht werden.

Versuchsreihe 03.03:

Innerhalb der Versuchsreihe 03.03 wird das AL/BMG-Verhältnis gegenüber der Versuchsreihe 03.01 von 1,1 auf 1,0 reduziert und liegt damit genau zwischen den Versuchsreihen 03.01 und 03.02.

Die Ergebnisse zu den Konsistenzprüfungen und zur Knetfähigkeit sind in Anhang B, Tabelle B21 hinterlegt.

Bei einem AL/BMG-Verhältnis von 1,0 bilden sich wie auch bei den vorherigen Versuchsreihen 03.01 und 03.02 Schollen aus. Die Gesteinskörnung ist bei einem G/BMG-Verhältnis von 7,0 nicht vollständig gebunden und fällt nach dem Zusammenkneten wieder auseinander, vgl. Anhang B, Tabelle B21, Zeile „7,0“.

Durch eine weitere Zugabe von Mörtel erreichte der Beton ab einem G/BMG-Verhältnis von 6,6 einen guten Zusammenhalt. Die Betonmasse hielt nach dem Zusammenkneten in der Hand gut zusammen, vgl. Anhang B, Tabelle B21, Zeile „6,6“, und ließ sich unter Bewegung wieder leicht zerrieseln.

Bei weiterer Zugabe von Mörtel wird der Beton ab einem G/BMG-Verhältnis von kleiner 6,2 feuchter und schwerer. Die Haftung zwischen dem Mörtel und der Gesteinskörnung nimmt ab. Der Beton fällt nach dem Zusammenkneten leicht auseinander, vgl. exemplarisch Anhang B, Tabelle B21, Zeile „5,0“.

Die in dieser Versuchsreihe favorisierten Betonmischungen besitzen eine bessere Rieselfähigkeit als die ausgesuchte Mischung des Betons der Versuchsreihe 03.02 mit einem G/BMG-Verhältnis von 0,9. Der augenscheinliche Zusammenhalt ist aber als geringer einzustufen.

Auf Basis der zahlreichen Versuche zur Konsistenzschätzung wurden die in Tabelle 26 aufgeführten Rezepturen der Versuchsreihe 03.03 zur Bestimmung der Grünstandfestigkeit herangezogen.

Tabelle 26: Ausgewählte Rezepturen der Versuchsreihe 03.03

Bezeichnung	WGM	Verhältnis B/M	Verhältnis AL/BMG	Verhältnis G/BMG
[-]	[-]	[M.-%/M.-%]	[-]	[-]
1	2	3	4	5
1,9_40/60_1,0_6,4	1,9	40/60	1,0	6,4
1,9_40/60_1,0_6,6	1,9	40/60	1,0	6,6
1,9_40/60_1,0_6,8	1,9	40/60	1,0	6,8

Im folgenden Kapitel werden an den favorisierten Rezepturen der Versuchsreihen 03.01 bis 03.03 die Grünstandfestigkeiten ermittelt.

4.3.3.3.2 Grünstandfestigkeit

An den auf Basis der Konsistenzprüfung ausgewählten Betonrezepturen des Betons Nr.3 (B/M-Verhältnis von 40/60) wurde die Grünstandfestigkeit bestimmt. Die zur Ermittlung der Grünstandfestigkeit hergestellten Prüfkörper wurden alle mittels der Proctor-Verdichtung, vgl. Kapitel 4.3.1, hergestellt.

In der Tabelle 27 sind die aufgrund ihres optischen und haptischen Eindrucks ausgewählten Betonrezepturen der Versuchsreihen 03.01 bis 03.03 zusammengefasst, an denen anschließend die Grünstandfestigkeit bestimmt wurde.

Tabelle 27: Ausgewählte Versuchsserien der Reihen 03.01 bis 03.03 zur Bestimmung der Grünstandfestigkeit

Versuchsreihe	Bezeichnung	WGM	Verhältnis B/M	Verhältnis AL/BMG	Verhältnis G/BMG
[-]	[-]	[-]	[M.-%/M.-%]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6
03.01	1,9_40/60_1,1_6,3	1,9	40/60	1,1	6,3
03.02	1,9_40/60_0,9_5,2	1,9	40/60	0,9	5,2
	1,9_40/60_0,9_5,5	1,9	40/60	0,9	5,5
	1,9_40/60_0,9_5,8	1,9	40/60	0,9	5,8
	1,9_40/60_0,9_6,0	1,9	40/60	0,9	6,0
03.03	1,9_40/60_1,0_6,4	1,9	40/60	1,0	6,4
	1,9_40/60_1,0_6,6	1,9	40/60	1,0	6,6
	1,9_40/60_1,0_6,8	1,9	40/60	1,0	6,8

Versuchsreihe 03.01:

Die Grünstandfestigkeit der aus der Konsistenzprüfung favorisierten Rezeptur mit einem G/BGM-Verhältnis von 6,3 ist in Abbildung 28 dargestellt.



Abbildung 28: Zusammengefallener Beton WGM1,9_40/60_1,1_6,3 nach dem Ausschalen

Direkt nach dem Ausschalen fiel der Betonzylinder in sich zusammen. Der zuvor in der Konsistenzprüfung festgestellte geringe Zusammenhalt wurde bestätigt und das G/BMG-Verhältnis von 1,1 der 40/60-Grundrezeptur konnte für die weiteren Untersuchungen ausgeschlossen werden.

Ferner ließ sich ableiten, dass sich bei einem noch höheren G/BMG-Verhältnis von $> 1,1$ eine noch stärker ausgeprägte „haptische Nässe“ des Betons ausgebildet hätte, aus der ein noch geringerer Zusammenhalt resultieren würde.

Versuchsreihe 03.02:

Die bei einem AL/BMG-Verhältnis von 0,9 innerhalb der Konsistenzprüfung als aussichtsreich identifizierten Rezepturen mit G/BMG-Verhältnissen zwischen 5,5 und 6,0 sind in Bezug auf die Grünstandfestigkeit in Abbildung 29 dargestellt.



Abbildung 29: Favorisierte Betonproben der Versuchsreihe 03.02 nach dem Ausschalen mit G/BMG-Verhältnissen von 6,0; 5,8; 5,5

Alle favorisierten Betone behalten nach dem Ausschalen ihre Form. Die Rezeptur besitzt einen höheren Anteil an Mörtel, was die Konsistenz im Vergleich zu den anderen Versuchsreihen klebriger macht.

Versuchsreihe 03.03:

Die bei einem AL/BMG-Verhältnis von 1,0 innerhalb der Konsistenzprüfung als aussichtsreich identifizierten Rezepturen mit G/BMG-Verhältnissen zwischen 6,4 bis 6,8 sind in Bezug auf die Grünstandfestigkeit in Abbildung 30 dargestellt.

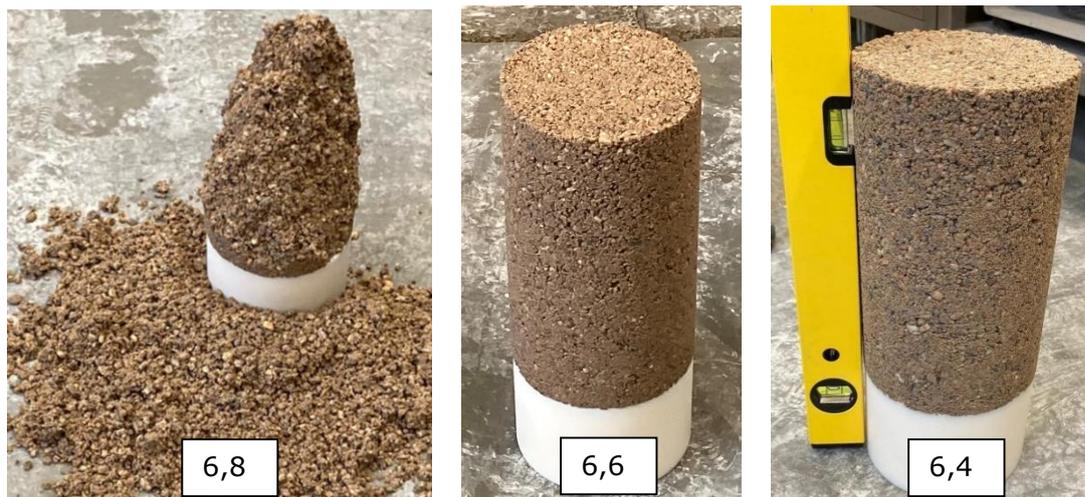


Abbildung 30: Die drei favorisierten Betonproben nach dem Ausschalen (6,8; 6,6; 6,4)

Nach dem Ausschalen blieb die Rezeptur mit dem G/BMG-Verhältnis von 6,8 für etwa eine Minute formstabil und fiel danach in sich zusammen, vgl. Abbildung 30, „6,8“.

Die Rezepturen mit einem G/BMG-Verhältnis von 6,8 bzw. 6,4 blieben über den geforderten Zeitraum hinweg formstabil.

4.3.3.3.3 Bewertung der Ergebnisse und weitere Vorgehensweise

Zur Auswahl einer geeigneten Rezeptur für die nachfolgenden Prüfungen galt als ausschlaggebender Faktor der Zusammenhalt des Betons. Dieser ist unumgänglich für die Pflasterherstellung im Betonwerk.

Bei der Prüfung der Grünstandfestigkeit des G/BMG-Verhältnisses von 1,1 zerfiel der Beton direkt nach dem Ausschalen. Bei einem G/BMG-Verhältnis von 1,0 blieben nur zwei der drei favorisierten Rezepturen nach dem Ausschalen formstabil. Daraus wurde abgeleitet, dass die verbliebenen standhaften Rezepturen trotzdem eine geringere Grünstandfestigkeit als die Rezepturen mit einem G/BMG-Verhältnis von 0,9 besitzen. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde die Rezeptur der Versuchsserie 03.01 (1,9_40/60_0,9_6,0) mit dem AL/BMG-Verhältnis von 0,9 und dem G/BMG-Verhältnis von 6,0 für die weiteren Untersuchungen herangezogen.

4.3.3.3.4 Dynamisches Verdichtungsmaß

Bei der Bestimmung des Verdichtungsmaßes mithilfe des Proctorhammers wurde bei der Rezeptur Beton Nr.3 (1,9_40/60_0,9_6,0) ein Verdichtungsmaß von 1,43 erreicht, was auf dem Niveau von Beton Nr.1 liegt. Dieses liegt damit geringfügig unterhalb des Anforderungsbereiches von $> 1,5$, vgl. Tabelle 14.

Da alle Proben, sowohl die des Referenzbetons als auch die der alkalisch aktivierten Betone, mit 20 Proctorschlägen verdichtet werden, zeigt sich hierbei die schwierige Verdichtbarkeit des alkalisch aktivierten Betons gegenüber dem Referenzbeton. Der alkalisch aktivierte Beton lässt sich statt in die Konsistenzklasse C0 (sehr steif) in die Konsistenzklasse C1 (steif) einordnen.

4.3.3.3.5 Frischbetonrohichte

Die für den Beton Nr.3 ermittelte Rohdichte erreicht mit $2,16 \text{ kg/dm}^3$, die gleiche Rohdichte wie Beton Nr.1 und damit ebenfalls nicht ganz den mit $2,20$ bis $2,40 \text{ kg/dm}^3$ festgelegten Anforderungsbereich, vgl. Tabelle 14.

4.3.3.3.6 Druckfestigkeit

Die Prüfkörper zur Bestimmung der Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 [Reg06] wurden unter Zuhilfenahme der Proctor-Verdichtung für das normativ maßgebliche Prüfalter von 28 Tagen hergestellt. Die in Abbildung 31 dargestellte, mittlere Druckfestigkeit wurde aus drei Einzelwerten bestimmt. Aufgrund der nicht relevanten Druckfestigkeiten der Prüfkörper, welche mit Hilfe der Instron-Verdichtung hergestellt wurden, wird diese Art der Verdichtung an dieser Stelle nicht angewendet, vgl. Kapitel 4.3.2.4.

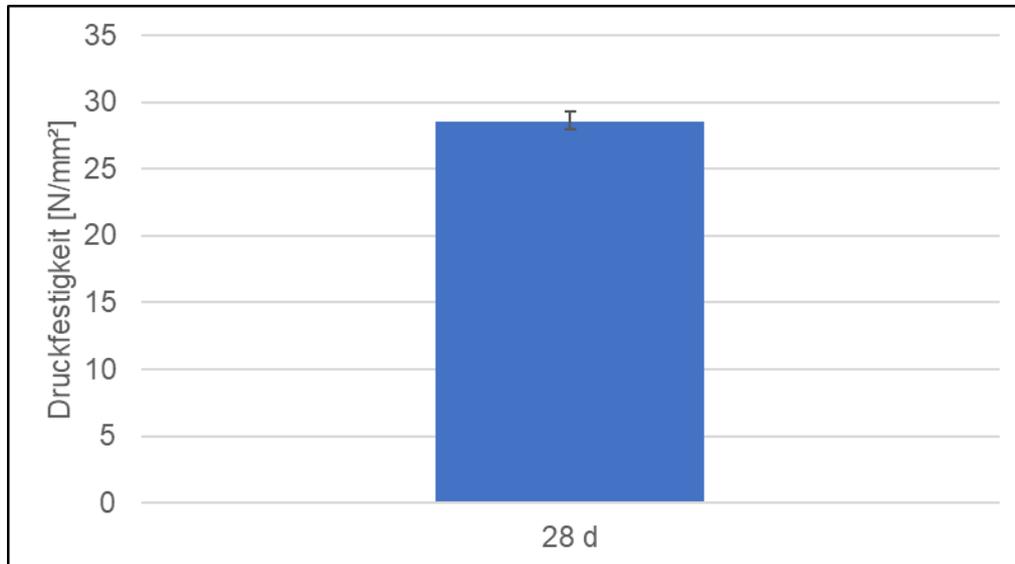


Abbildung 31: 28-d-Druckfestigkeit Beton Nr.3

Nach 28 Tagen erreichen die Prüfkörper eine mittlere Druckfestigkeit von 28,5 N/mm² und liegen damit auf einem vergleichbaren Niveau wie die des Betons Nr. 1.

4.3.3.3.7 E-Modul

Der E-Modul wurde an mittels der Proctor-Verdichtung hergestellten Prüfkörpern im Alter von 28 Tagen nach DIN EN 12390-13 [Reg08] zu einem Wert von 24.150 N/mm² ermittelt. Als Rechenwert für einen typischen C 30/37 wird nach DIN EN 1992-1-1/NA [Reg10] ein E-Modul von 34.000 N/mm² angesetzt.

4.3.3.3.8 Spaltzugfestigkeit und längenbezogene Bruchlast

In Abbildung 32 werden die Spaltzugfestigkeiten nach DIN EN 12390-6 [Reg07] für den Beton Nr.3 dargestellt.

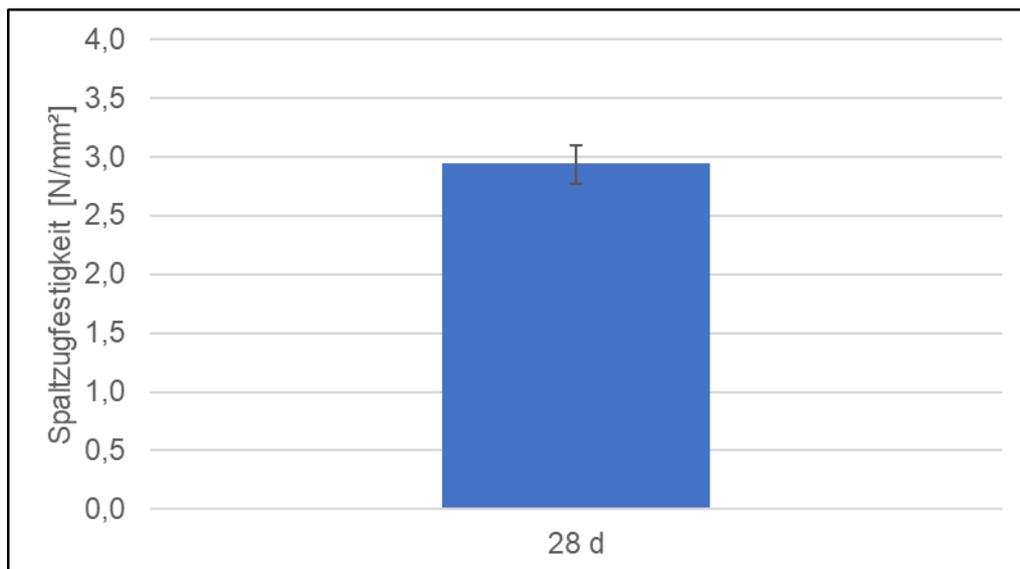


Abbildung 32: 28-d-Spaltzugfestigkeit des Betons Nr.3

Die mit 2,95 N/mm² erreichte Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen liegt unterhalb des festgelegten Anforderungsbereiches von > 3,6 N/mm², vgl. Tabelle 14.

Als ein weiteres normatives Kriterium wurde die in Abbildung 33 dargestellte längenbezogene Bruchlast parallel zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit für den Beton Nr.3 ermittelt.

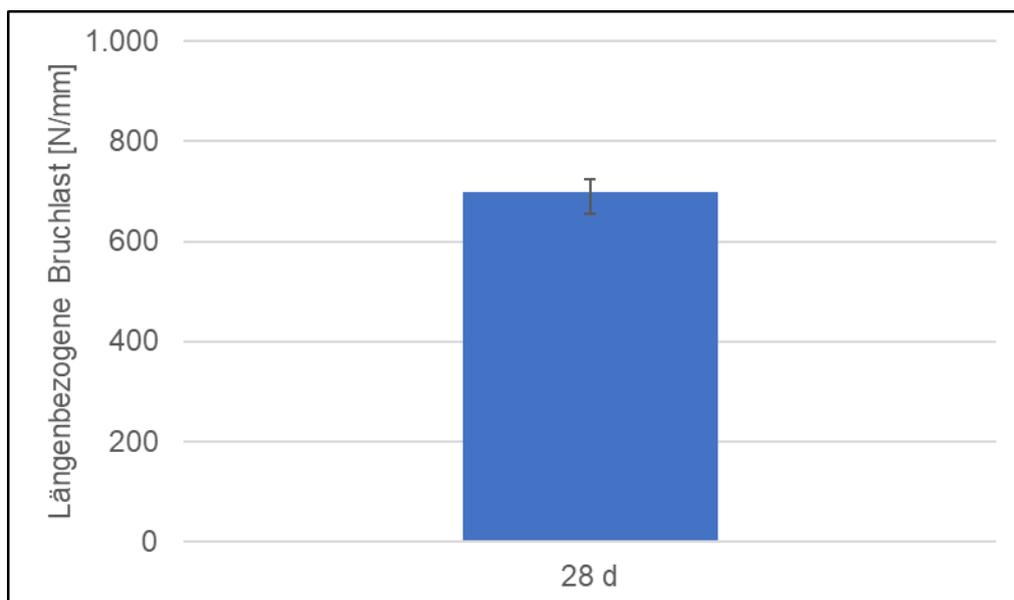


Abbildung 33: 28-d-längenbezogene Bruchlast des Betons Nr.3

Die längenbezogene Bruchlast erreichte mit 697 N/mm einen geringeren Wert als der Referenzbeton mit 805,35 N/mm, erfüllt aber deutlich die normativen Anforderungen von > 250 N/mm, vgl. Tabelle 14.

4.3.3.3.9 Bewertung der Ergebnisse und weitere Vorgehensweise

Zur besseren Übersicht werden in der Tabelle 28 die formulierten Anforderungen den Untersuchungsergebnissen für den Beton Nr.3 gegenübergestellt.

Als Beton Nr.3 wurde die Betonrezeptur vereinfachend bezeichnet, welche nach den Untersuchungen zur Konsistenz und Grünstandfestigkeit als aussichtsreich identifiziert und für die weiteren Prüfungen verwendet wurde (Rezeptur 1,9_40/60_0,9_6,0).

Tabelle 28: Gegenüberstellung des Anforderungsbereiches und den ermittelten Kennzahlen für den Beton Nr.3

Eigenschaft	Kriterium / Anforderung	Beton Nr.3	Kriterium erfüllt
1	2	3	4
Verarbeitbarkeit	rieselfähig und knetbar	rieselfähig und knetbar	ja
Verdichtungsmaß	$\geq 1,5$	1,43	nein
Grünstandfestigkeit	nach dem Ausschalen formstabil	nach dem Ausschalen formstabil	ja
Frischbetonrohddichte	2,2 bis 2,4 kg/dm ³	2,16 kg/dm ³	nein
28 d Druckfestigkeit	≥ 40 N/mm ²	28,5 N/mm ²	nein
28-d-Spaltzugfestigkeit	$\geq 3,4$ N/mm ² (normativ $\geq 3,6$ N/mm ²)	2,95 N/mm ²	nein
28-d-längenbezogene Bruchlast	≥ 805 N/mm (normativ ≥ 250 N/mm)	697 N/mm	nein
28-d-E-Modul	30.000 bis 36.000 N/mm ²	24.150 N/mm ²	nein

Der obigen Tabelle ist zu entnehmen, dass der Beton Nr.3 die maßgeblichen Werte des Anforderungsbereiches der Fa. REKERS nicht erreicht. Die zu geringe Rohddichte und das zu geringe Verdichtungsmaß sind im Kontext zu betrachten und könnten durch eine intensivere Verdichtung, wie sie im Werk stattfindet, gut erreicht werden.

Bei der geringeren Druckfestigkeit ist eine Verknüpfung zur Rohddichte abzuleiten. Ob diese aber durch eine intensivere Verdichtung von 28,5 N/mm² auf 40 N/mm² gesteigert werden kann, wird anhand der Prototypenherstellung auf der Einsteinmaschine geprüft werden.

Gleiches gilt für den ermittelten E-Modul. Anzumerken ist, dass die Betondruckfestigkeit kein normatives Kriterium für Betonpflastersteine darstellt und lediglich im Werk als Hilfsgröße für die normativ geforderten Spaltzugfestigkeiten herangezogen wird. Bei den normativ geforderten Spaltzugfestigkeiten erreichte der Beton Nr.3 mit 2,95 N/mm² nicht die geforderten 3,6 N/mm². Bei den längenbezogenen Bruchlasten nach DIN EN 1338 [Reg09] erreichte der alkalisch aktivierte Beton Nr.3 die geforderten und in Tabelle 21 aufgeführten Werte.

Aufgrund des normativ geforderten Mindestwertes für die Spaltzugfestigkeit ist der Einsatz von Betonrezepturen mit 40 % Betonbrechsand in der hier untersuchten Form als nicht zielführend einzustufen. Dennoch werden mit diesem Beton Steinprototypen hergestellt, um aufzuzeigen, welches Potenzial in diesem aus ökologischer Sicht optimierten Beton steckt.

Auf Basis der drei untersuchten Betone Nr.1 bis Nr.3 kann deutlich gezeigt werden, dass der Beton Nr.1 im Gegensatz zu den beiden anderen Rezepturen die wesentlichen Kriterien für die Herstellung und normativ geforderten Eigenschaftskennwerte erreicht, vgl. Tabelle 21. Bei Beton Nr.2 konnte bereits die Konsistenz und Grünstandfestigkeit nicht bedarfsgerecht eingestellt werden, weshalb auf weitere Untersuchungen verzichtet wurde.

Der Beton Nr.1 wird deshalb zur Herstellung von Betonprototypen auf der Einsteinmaschine, vgl. Kapitel 4.3.1, eingesetzt.

4.4 Herstellung und Prüfung von Steinprototypen

4.4.1 Herstellung und Lagerung

Zur Herstellung von Steinprototypen wurden die in Projektphase 2 entwickelten Betone verwendet. Diese weisen folgende Merkmale in der Zusammensetzung auf:

1. **Beton Nr.1** mit einem Betonbrechsand/Metakaolin-Verhältnis von 25/75, einem Aktivatorlösung/Pulver-Verhältnis von 1,2, einem Wasserglasmodul von 1,9 sowie einem Gesteinskörnungs/Leim-Verhältnis von 6,0.
2. **Beton Nr.3** mit einem Betonbrechsand/Metakaolin-Verhältnis von 40/60, einem Aktivatorlösung/Pulver-Verhältnis von 0,9, einem Wasserglasmodul von 1,9 sowie einem Gesteinskörnungs/Leim-Verhältnis von 6,0.

Damit stellt Beton Nr.1 eine auf die Festigkeit optimierte Zusammensetzung dar, während Beton Nr.3 durch den höheren Anteil an Betonbrechsand eine auf die Nachhaltigkeit optimierte Zusammensetzung repräsentiert.

Mit beiden Betonen wurden die Prototypen auf einer so genannten „Einsteinmaschine“, welche in der Lage ist, die Bedingungen der werkseitigen Großproduktion in guter Näherung abzubilden, hergestellt, vgl. Abbildung 34.

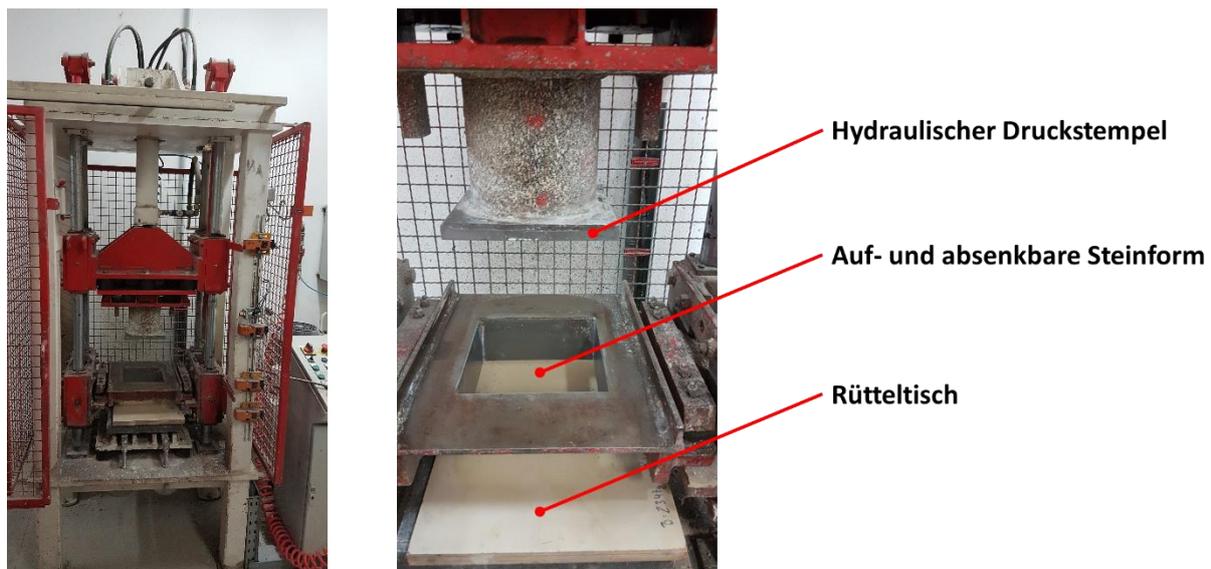


Abbildung 34: Vorderansicht (links) und Detailansicht (rechts) der Einsteinmaschine zur Prototypenherstellung

Nach der vollständigen Befüllung der Steinform durch Einrieseln des Betons wurde der Pflasterstein über eine Kombination aus Druck und Vibration 20 s lang verdichtet und direkt danach durch Anheben der Form ausgeschalt.

Die auf diese Weise produzierten Betonpflastersteine weisen eine Grundfläche von 20 x 20 cm² auf. Die Steinhöhe ergibt sich aus der erreichten, materialtypischen Verdichtung und liegt bei den verwendeten Betonen bei rd. 6,2 cm, vgl. Abbildung 35.



Abbildung 35: Auf- (links) und Seitenansicht (rechts) eines Pflastersteinprototyps direkt nach dem Ausschalen

Insgesamt wurden je Beton drei Pflastersteinprototypen hergestellt. Direkt nach der Herstellung wurden diese vermessen und die Frischbetonrohddichte bestimmt. Danach fand eine einwöchige Nachbehandlung in einer Folienummantelung statt, welche von einer dreiwöchigen Lagerung in Laborklima bei 20 °C und 65 % r. F. gefolgt wurde.

4.4.2 Prüfung und Ergebnisse

Nach der 28-tägigen Lagerung wurden aus den Steinprototypen je Beton 27 würfelförmige Prüflinge mit einer Seitenlänge von rd. 6 cm präpariert und nach 28 Tagen folgende Kennwerte identifiziert:

1. Bestimmung der Trockenrohddichte nach DIN EN 12390-7 [Reg11] an 27 Prüfkörpern je Beton
2. Bestimmung des Wassergehaltes in Anlehnung an DIN EN 12390-7 [Reg11] an 3 Prüfkörpern je Beton
3. Bestimmung der Druckfestigkeit in Anlehnung an DIN EN 12390-3 [Reg06] an 6 Prüfkörpern je Beton
4. Bestimmung der Spaltzugfestigkeit in Anlehnung an DIN EN 12390-6 [Reg07] an 6 Prüfkörpern je Beton

Die verbleibenden Prüfkörper wurden am 28. Tag für weitere 14 Tage unter Wasser bei einer Temperatur von 20 °C gelagert. Anschließend wurden an diesen Prüfkörpern folgende Kenngrößen ermittelt:

1. Bestimmung des Wassergehalts in Anlehnung an DIN EN 12390-7 [Reg11] an 3 Prüfkörpern je Beton
2. Bestimmung der Druckfestigkeit in Anlehnung an DIN EN 12390-3 [Reg06] an 3 Prüfkörpern je Beton
3. Bestimmung der Spaltzugfestigkeit in Anlehnung an DIN EN 12390-6 [Reg07] an 3 Prüfkörpern je Beton

Alle Einzelergebnisse zu den genannten Prüfungen finden sich in Anhang C, Tabelle C1 bis C7. Die ausgewerteten Ergebnisse in Form von Säulendiagrammen finden sich in der nachfolgenden Abbildung 36 bis Abbildung 37. Hierbei repräsentiert die Säule den arithmetischen Mittelwert der Stichprobe, während die Marker das Streuband der Ergebnisse widerspiegeln, welches sich aus dem jeweils minimalen und maximalen Messergebnis ergibt.

4.4.2.1 Trockenrohddichte

In der nachfolgenden Abbildung 36 sind die erzielten Ergebnisse zur Trockenrohddichte dargestellt. Zum Vergleich wird die Trockenrohddichte aus den Laborversuchen an der FH Münster ebenfalls angegeben.

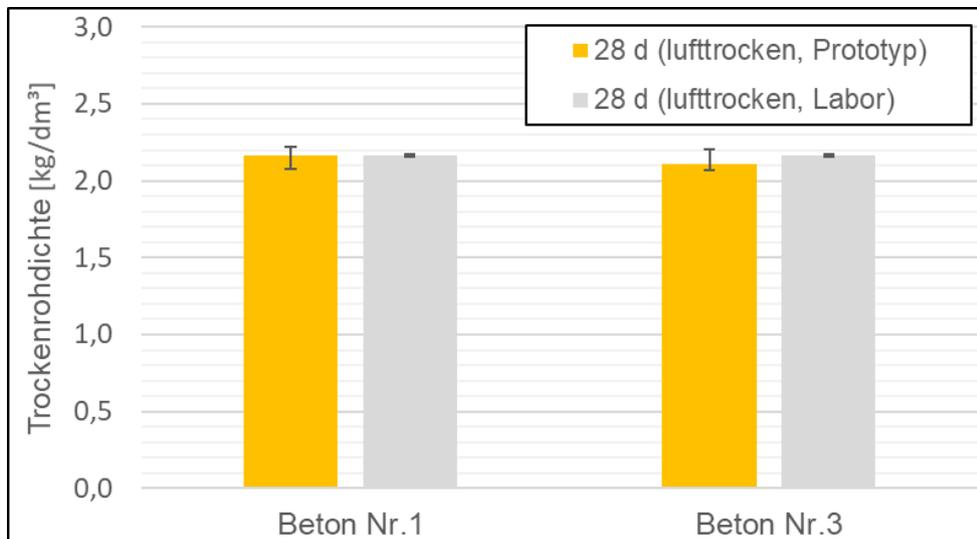


Abbildung 36: Mittlere Trockenrohddichten (Säulen) der Steinprototypen und aus den Laborversuchen, Marker: Streubereich aus minimalem und maximalem Messergebnis

Die Ergebnisse zeigen, dass die erzielte Verdichtung in der „Einsteinmaschine“ bei etwas höherer Streuung der Einzelergebnisse in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus den Laborversuchen steht. Nach 28 Tagen werden somit mittlere Trockenrohddichten im Bereich zwischen 2,1 und 2,2 kg/dm³ ermittelt.

4.4.2.2 Wassergehalt

Die im Darrversuch bestimmten Wassergehalte am Beton der Steinprototypen nach 28-tägiger Lagerung in Folie und Laborklima sowie nach einer weiteren 14-tägigen Wasserlagerung sind in Abbildung 37 visualisiert.

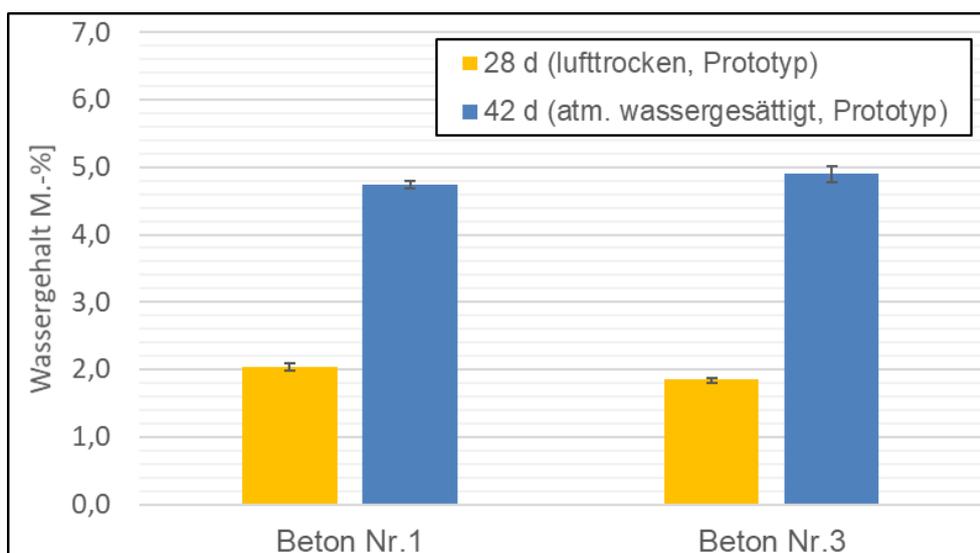


Abbildung 37: Mittlere Wassergehalte nach 28 Tagen (orange: lufttrocken), und nach 42 Tagen (blau: wassergesättigt), Marker: Streubereich aus minimalem und maximalem Messergebnis

Das Diagramm verdeutlicht, dass beide Betone nach 28 Tagen Wassergehalte um die 2 M.-% bei geringer Streubreite der Messergebnisse aufweisen. In der nachgeschalteten Lagerung der Betone im Wasserbad werden nahezu 3 M.-% an Wasser in das Porengefüge aufgenommen, was im atmosphärisch gesättigten Zustand zu Wassergehalten zwischen 4,7 und 4,9 M.-% führt.

Man erkennt, dass der mittlere Wassergehalt von Beton Nr.1 im lufttrockenen Zustand nach 28 Tagen etwas höher und im atmosphärisch gesättigten Zustand nach 42 Tagen etwas geringer ausfällt. Dies lässt darauf schließen, dass das Porengefüge dieses Betons bei vergleichbarer Porosität nicht so zugänglich ist wie das des Betons Nr.3. Dies kann in einer feineren Porenstruktur und/ oder einer stärkeren Tortuosität der Poren begründet liegen und ist ohne weiterführende Untersuchungen an dieser Stelle nicht eindeutig zu beantworten. Festzuhalten ist jedoch, dass Beton Nr.3 Wasser schneller abgeben und aufnehmen kann.

4.4.2.3 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit wurde an den Steinprototypen nach 28-tägiger Lagerung unter Folie und Luft sowie nach der anschließenden 14-tägigen Wasserlagerung bestimmt. Zur Orientierung werden in der nachfolgenden Abbildung 38 weiterhin die Druckfestigkeiten aus den Laborversuchen vergleichend dargestellt.

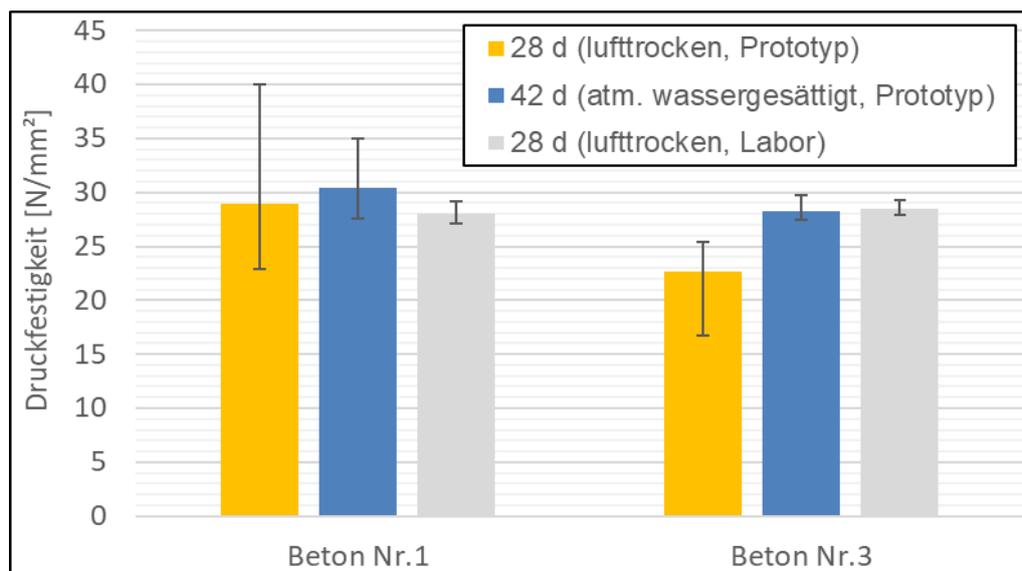


Abbildung 38: Mittlere Druckfestigkeiten nach 28 Tagen (orange: Prototyp, lufttrocken; grau: Laborbeton, lufttrocken), und nach 42 Tagen (blau: atmosphärisch wassergesättigt), Marker: Streubereich aus minimalem und maximalem Messergebnis

Die Ergebnisse zur Druckfestigkeit zeigen sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede zwischen den beiden Betonen auf. Beiden Betonen gemein ist die Tatsache, dass die Streuung der Messergebnisse bei den trockengelagerten Steinprototypen am größten ausfällt und augenscheinlich nach der 14-tägigen Wasserlagerung abnimmt. Die geringsten Streuungen werden an den Laborbetonen festgestellt, was ein Beleg dafür ist, dass das in Kap. 4.3.1 beschriebene Verdichtungsverfahren eine hohe Präzision aufweist.

Betrachtet man die erzielten Mittelwerte der untersuchten Betone, so fällt auf, dass bei den Steinprototypen sowohl nach der 28-tägigen Lagerung unter Folie und an der Luft als auch nach der anschließenden 14-tägigen Wasserlagerung höhere Druckfestigkeiten ermittelt werden. Letztere Serie erreicht hierbei mit rd. 30,5 N/mm² auch die höchste mittlere Druckfestigkeit im Gesamtvergleich.

Betrachtet man Beton Nr.1 für sich, so kann aufgrund der hohen Streuungen der Steinprototypen nicht von einem signifikanten Einfluss der Lagerungsbedingungen auf die Kenngröße gesprochen werden. Somit kann festgehalten werden, dass unabhängig von der Lagerungsart bei diesem Beton mit mittleren Festigkeiten zwischen 28 und 30,5 N/mm² gerechnet werden kann. Betrachtet man alle Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen als Grundgesamtheit, so kann hieraus eine 5 %-Fraktile und damit charakteristische Druckfestigkeit von rd. 23 N/mm² abgeleitet werden.

Führt man diese Betrachtung für den Beton Nr.3 durch, so fällt auf, dass die Ergebnisse für den Steinprototypen nach 28-tägiger Lagerung unter Folie und an der Luft signifikant geringer ausfallen als für den wassergesättigten Beton nach 42 Tagen sowie dem lufttrockenen Laborbeton nach 28 Tagen. Für den Beton des Steinprototypen wird hieraus geschlossen, dass es bei der nachgeschalteten 14-tägigen Wasserlagerung zu einer signifikanten Nacherhärtung im System kommt, die mit dem erhöhten Anteil an Betonbrechsand in Verbindung gebracht wird. In Betracht kommen für diesen Effekt ein ggf. vorhandenes hydraulisches Restpotenzial im Betonbrechsand oder aber eine CSH-Phasenbildung an den gebrochenen Oberflächen der Gesteinskörnung des ehemaligen Betons im hochalkalischen Milieu, vergleichbar jener Phasenbildung wie sie beim Kalksandstein zu beobachten ist. Aufgrund der fehlenden Temperatur und Drucks ist dieser Festigkeitszuwachs jedoch als geringfügig zu bezeichnen. Es erscheint daher interessant, den Effekt einer nachgeschalteten Temperatur-Druck-Behandlung weiter zu untersuchen, um das beobachtete Festigkeitspotenzial ggf. weiter auszunutzen. Um diese Frage abschließend zu klären, sind weiterführende Untersuchungen notwendig, die den Rahmen dieses Forschungsvorhabens überschreiten.

Zuletzt zeigt der Vergleich mit dem Laborbeton, dass dieser bereits nach 28 Tagen Luftlagerung ähnlich hohe Festigkeitswerte zeigt wie der Steinprototyp nach 42 Tagen. Da die erzielte Verdichtung der Betone vergleichbar ist, ist die Frage zu stellen, ob das auf der Einsteinmaschine erzeugte Gefüge ggf. Mikroschäden aufweist, die durch den zuvor beschriebenen Effekt bei der Wasserlagerung weitestgehend „repariert“ werden können, während Sie die Festigkeitseigenschaften nach einer Lagerung an der Außenluft signifikant negativ beeinflussen.

So lässt sich für den Steinprototypen nach 28-tägiger Lagerung eine 5 %-Fraktile von rd. 16,8 N/mm² abschätzen (sechs Prüfergebnisse), während für die beiden anderen Varianten eine 5 %-Fraktile von rd. 27,5 N/mm² (sechs Prüfergebnisse) abgeschätzt werden kann. Diese fällt aufgrund der geringen Streuungen gar höher aus als beim Beton Nr.1. Es sei an dieser Stelle jedoch darauf hingewiesen, dass sich diese Aussagen auf einen sehr geringen Stichprobenumfang beziehen, welcher zur Absicherung deutlich erhöht werden muss.

4.4.2.4 Spaltzugfestigkeit

Abschließend werden die Ergebnisse aus den Prüfungen zur Spaltzugfestigkeit dargestellt, vgl. Abbildung 39.

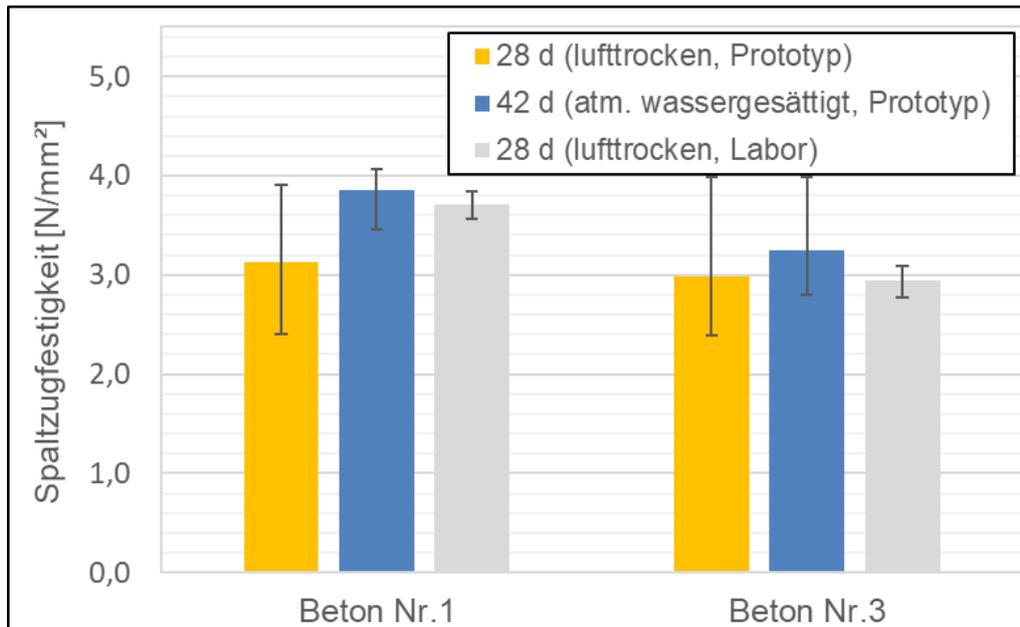


Abbildung 39: Mittlere Spaltzugfestigkeiten nach 28 Tagen (orange: Prototyp, lufttrocken; grau: Laborbeton, lufttrocken), und nach 42 Tagen (blau: atmosphärisch wassergesättigt), Marker: Streubereich aus minimalem und maximalem Messergebnis

Ähnlich wie bei den Druckfestigkeiten lassen sich auch hier Gemeinsamkeiten und Unterschiede bei beiden Betonen erkennen, wobei letztere nicht so stark ausgeprägt sind wie bei den Druckfestigkeiten.

Gemeinsam ist beiden Betonen, wie auch schon bei den Druckfestigkeiten, dass die Streuungen beim Beton nach 28-tägiger Lagerung in Folie und Laboratmosphäre am größten ausfallen. Die anschließende 14-tägige Wasserlagerung führt in beiden Fällen zu einer Verringerung der Streuung. Dieser Effekt ist beim Beton Nr.1 jedoch deutlich ausgeprägter. Am geringsten fallen bei beiden Betonen die Streuungen im Fall der Laborbetone aus, was sich ebenfalls mit den Beobachtungen aus den Druckfestigkeitsversuchen deckt.

In Bezug auf die Mittelwerte ergibt sich für die Betone der Steinprototypen eine Tendenz zu höheren Festigkeiten nach der 14-tägigen Wasserlagerung. Der höchste Mittelwert wird in Einklang mit den Druckfestigkeiten mit 3,9 N/mm² bei Beton Nr.1 nach 14-tägiger Wasserlagerung erzielt. Aufgrund der hohen Streuungen kann dieser Effekt jedoch nicht als signifikant identifiziert werden.

Vergleicht man die Mittelwerte der beiden Laborbetone miteinander, so fällt auf, dass diese mit 3,7 N/mm² bei Beton Nr.1 signifikant höher ausfallen als bei Beton Nr.3 mit rd. 3 N/mm², sodass hier die Aussage getroffen werden kann, dass ein metakaolinreicherer Leim zu einer erhöhten Spaltzugfestigkeit führt.

Aufgrund der hohen Streuungen unterscheiden sich die betrachteten Prüfreihen für die jeweiligen Betone nicht signifikant, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die erzielten Prüfergebnisse bei beiden Betonen einer Grundgesamtheit angehören. Unter dieser Annahme lassen sich für den Beton Nr.1 mittlere Spaltzugfestigkeiten von rd. 3,5 N/mm² und eine 5 %-Fraktile von 2,4 N/mm² abschätzen.

Bildet man den für mineralische Baustoffe typischen Quotienten aus Zugfestigkeit und Druckfestigkeit, so liegt dieser für den Mittelwert bei rd. 0,12 und bei Betrachtung der 5 %-Fraktile bei rd. 0,09. Damit unterscheidet sich der Beton Nr.1 nicht von der Festigkeitscharakteristik eines normalen zementär gebunden Betons.

Führt man diese Betrachtung für Beton Nr.3 durch, so erhält man eine mittlere Spaltzugfestigkeit von rd. 3 N/mm² bei einer 5 %-Fraktile von rd. 2,4 N/mm².

Der Quotient aus Spaltzug- und Druckfestigkeit ergibt hier für den Mittelwert rd. 0,12 und für die 5 %-Fraktile rd. 0,14. Auch hier lässt sich festhalten, dass sich die Festigkeitscharakteristika des Betons Nr. 3 sich nicht nennenswert von einem normalen zementär gebundenen Beton unterscheiden.

4.5 Nachhaltigkeitsaspekte

Vor dem in der Einleitung dieses Berichtes geschilderten Hintergrund zur derzeitigen Situation bezüglich der Verwertung zementär gebundener Abbruchmaterialien konnte eindrucksvoll gezeigt werden, dass es möglich ist, auch den Feinanteil zementären Betonbruchs als Bestandteil eines alternativen Bindemittels wieder in den Stoffkreislauf einzugliedern.

Grundsätzlich kann hierbei festgehalten werden, dass alkalisch aktivierte Betone gegenüber zementären Systemen nicht nur in technischer Hinsicht, sondern sich auch in Bezug auf eine nachhaltige Betrachtung eine wertvolle Alternative darstellen.

Zur besseren Veranschaulichung sind hierzu die CO₂-Äquivalente zur Herstellung eines Kubikmeters des Referenzbetons aus Zementbeton sowie den beiden alternativen Betonen 1 und 3 vergleichend gegenübergestellt, vgl. Abbildung 40. Die Berechnung und die hierfür zugrunde liegenden Daten sind Anhang D, Tabelle D1 bis D3 zu entnehmen.

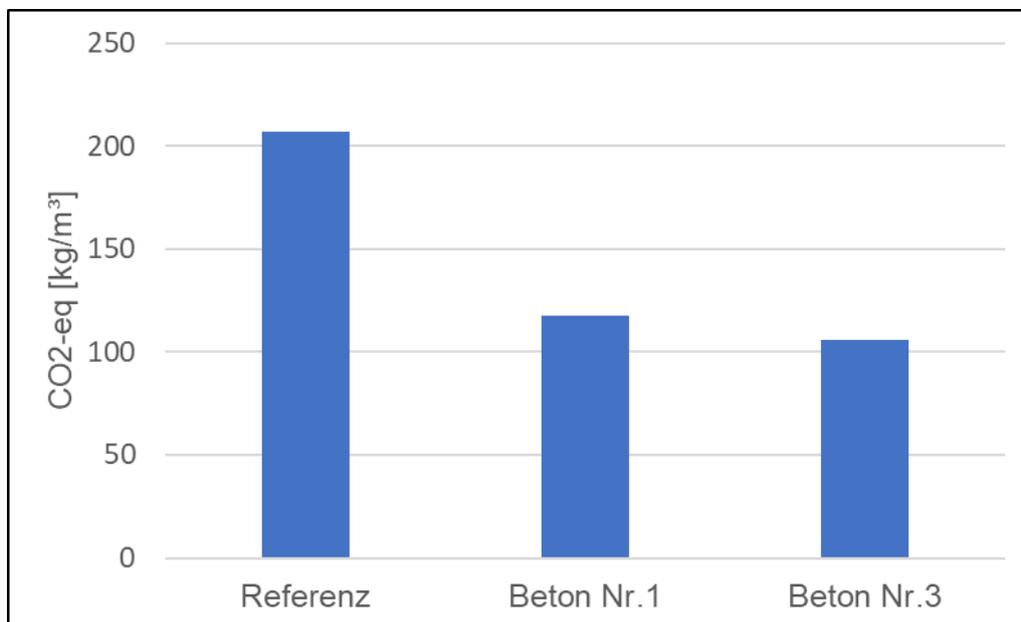


Abbildung 40: CO₂-Äquivalente in kg CO₂ pro Kubikmeter Beton

Die zementär gebundene Referenzrezeptur, welche derzeit im Werk der Fa. REKERS in Spelle primär als Kernbeton eingesetzt wird, erreicht gemäß Hersteller ein CO₂-Äquivalent von rund 207 kg/m³ Frischbeton. Bei den zementären Systemen wird der größte Anteil CO₂ über die Hauptbindemittelkomponente Zement mit rund 780 kg CO₂/t Zement eingetragen.

Bei den alkalisch aktivierten Betonen wird das CO₂-Äquivalent bei Beton Nr.1 mit einem Mischungsverhältnis von 1:3 (Betonbrechsand:Metakaolin) mit 118 kg CO₂-eq/m³ Frischbeton gegenüber der Referenzrezeptur bereits um rund 43 M.-% reduziert. Eine Steigerung des Betonbrechsandanteils auf ein Verhältnis von 1:1,5 bei Beton Nr.3 wirkt sich aufgrund der weiteren Reduzierung des CO₂-„intensiven“ Metakaolins (423 kg CO₂/t), [HEA 14], sehr positiv auf das CO₂-Äquivalent aus und bewirkt eine Reduzierung im Vergleich zur Referenz von rund 49 M.-% auf 106 kg CO₂/m³ Frischbeton.

5 Fazit und Ausblick

5.1 Fazit Stoffcharakterisierung und Mörtelentwicklung

Aus der in Phase 1 dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Untersuchungen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Aus der stofflichen Analyse zur chemischen und strukturellen Zusammensetzung des Betonbrechsandes mittels XRD und XRF kann geschlossen werden, dass hier im Sinne eines alkalisch aktivierbaren Stoffes ein kalkreiches System mit großen Anteilen an kristallinem Silizium (rd. 65 M.-%) sowie hydratisierten Calciumsilikaten, Calciumaluminaten sowie Calicualuminatferriten vorliegt, was sich in den hohen Calciumanteilen von rd. 17 M.-% widerspiegelt.
- Die Mörtelversuche zur alkalischen Aktivierung des reinen Betonbrechsandes zeigen, dass es möglich ist, technisch sinnvoll verarbeitbare Frischmörtel zu erzeugen. Die Festmörtel Eigenschaften belegen jedoch, dass sich der reine Betonbrechsand nur bedingt alkalisch aktivieren lässt, was sich in maximal erreichbaren Festigkeiten von 5,5 N/mm² widerspiegelt. Somit wird festgehalten, dass die alkalische Aktivierung des reinen Betonbrechsandes nicht zu einem technisch nutzbaren Baustoff führt.
- Die nachgeschaltete Mörtelentwicklung auf Basis von hybriden Systemen bestehend aus Betonbrechsand und Zement bzw. Betonbrechsand und Metakaolin zeigt, dass sich die zementbasierten Hybridsysteme nicht sinnvoll alkalisch aktivieren lassen, da die so erzeugten Systeme eine unzureichende Verarbeitbarkeit bei gleichzeitig geringen Druckfestigkeiten im Bereich von maximal 14 N/mm² aufweisen. Beides spricht gegen die Verwendung zur Herstellung von Betonpflastersteinen.
- Die Versuche an Kombinationen aus Metakaolin und dem Betonbrechsand ergeben, dass insbesondere das Metakaolin mit einem hohen Gehalt an reaktiven Aluminiumverbindungen (hier rd. 38 M.-%) zu technisch nutzbaren Ergebnissen führt.
- So zeigen alkalisch aktivierte Hybridmörtel mit einem Wasserglasmodul der Aktivatorlösung von 1,9, einem Verhältnis von Betonbrechsand zu Metakaolin von 1:1 und einem Verhältnis zwischen Feststoff und Aktivatorlösung von 1,1 28-Tage-Druckfestigkeiten von bis zu 46 N/mm² und Biegezugfestigkeiten von bis zu 6,9 N/mm².
- Bei Hybridmörteln mit veränderter Feststoffzusammensetzung (25 M.-% Betonbrechsand und 75 M.-% Metakaolin) lassen sich gar 28-Tage-Druckfestigkeiten von bis zu 69 N/mm² bei Biegezugfestigkeiten von 10,3 N/mm² erzielen.

5.2 Fazit Betonentwicklung

Basierend auf den identifizierten Mörtelsystemen wurden in Phase 2 dieses Forschungsvorhabens Pflastersteinbetone entwickelt, welche den Vorgaben an Verarbeitbarkeit und Festigkeit aus der Werksproduktion der Fa. REKERS genügen sollten. Die Untersuchungen führen zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Es ist möglich, alkalisch aktivierte Betone zu entwickeln, welche den Anforderungen an Verarbeitbarkeit und Grünstandfestigkeit der Großproduktion genügen.
- Die Verdichtungsarbeit einer Großsteinmaschine konnte anhand eines selbstentwickelten Verdichtungsverfahrens basierend auf dem Proctoropf-Versuch nachgestellt werden.
- Aus den Untersuchungen ergeben sich zwei Betonzusammensetzungen, die die zuvor beschriebenen Kriterien erfüllen. Diese werden nachfolgend kurz charakterisiert:

- **Beton Nr.1** mit einem Betonbrechsand/Metakaolin-Verhältnis von 1:3, einem Aktivatorlösungs/Feststoff-Verhältnis von 1,2, einem Wasserglasmodul von 1,9 sowie einem Gesteinskörnungs/Betonbrechsand-Metakaolin-Verhältnis von 6,0.
Beton Nr.3 mit einem Betonbrechsand/Metakaolin-Verhältnis von 1:1,5, einem Aktivatorlösungs/Feststoff-Verhältnis von 0,9, einem Wasserglasmodul von 1,9 sowie einem Gesteinskörnungs/Betonbrechsand-Metakaolin-Verhältnis von 6,0.
- Die so entwickelten Laborbetone zeigen nach 28-tägiger Luftlagerung (7 Tage in Folie eingeschlagen, 21 Tagen ohne Folie) mittlere Trockenrohdichten um $2,13 \text{ kg/dm}^3$ und liegen damit unterhalb der Trockenrohdichte des zementär gebundenen Referenzbetons der Fa. REKERS ($2,38 \text{ kg/dm}^3$).
- In Hinblick auf die erzielten Druckfestigkeiten nach 28 Tagen kann festgestellt werden, dass sowohl Beton Nr.3 als auch Beton Nr.1 mit mittleren Zylinderdruckfestigkeiten zwischen $28,5$ und 33 N/mm^2 und daraus abgeleiteten charakteristischen Zylinderdruckfestigkeiten von rd. 27 N/mm^2 im technisch nutzbaren Bereich liegen. Basierend auf den Versuchsergebnissen können die Betone damit in die Güteklasse C 25/30 eingeordnet werden.
- Im Vergleich zur geforderten Betongüte für die Pflastersteinproduktion der Fa. REKERS von C 35/45 wird festgehalten, dass die alkalisch aktivierten Laborbetone diese Anforderung nicht erfüllen. Die Hauptursache wird im Luftporenreichtum des Frischbetons gesehen.
- Die Spaltzugfestigkeiten liegen bei den alkalischen Laborbetonen mit Werten zwischen $2,8$ und $3,8 \text{ N/mm}^2$ bei rd. 10 % der Druckfestigkeit und sind damit vergleichbar mit dem mechanischen Verhalten zementärer Betone. Der Beton Nr.1 erreicht dabei im Mittel die normative Anforderung von $3,6 \text{ N/mm}^2$.
- Die normativ geforderten längenbezogenen Bruchlasten werden von den Betonen Nr. 1 und Nr. 3 deutlich überschritten.
- Der Verformungswiderstand der alkalisch aktivierten Laborbetone liegt mit Werten zwischen 21 und 26 GPa deutlich unterhalb mittlerer E-Moduln vergleichbarer zementärer Systeme mit Werten um 30,5 GPa. Diese erhöhte Verformungsfreudigkeit muss bei der bautechnischen Verwendung des Materials unbedingt berücksichtigt werden.
- Aus ökologischer Sicht sollte in weiteren Forschungsansätzen zu alkalisch aktivierten Bindemitteln die weitere Reduzierung des Metakaolingehaltes durch eine zielgerichtete Aufbereitung der Pulverkomponenten, der Einsatz neuer Nachbehandlungsstrategien sowie der Einsatz alternativer, alkalischer Aktivatorlösungen mit weiter optimiertem $\text{CO}_2\text{-eq}$ untersucht werden.
- In Bezug auf die derzeitig verwendete Rezeptur lässt sich neben dem deutlichen CO_2 -Einsparpotenzial auch festhalten, dass der Einsatz natürlicher und nicht nachwachsender Rohstoffe deutlich reduziert werden kann und der Einsatz von Recyclingmaterial den Gedanken der Kreislaufwirtschaft entspricht. Weiterhin ist festzuhalten, dass die hier entwickelten Alternativbetone vollständig ohne Flugaschen oder Hüttensandmehle auskommen, für die in Deutschland zukünftig keine ausreichenden Mengen mehr zur Verfügung stehen werden.

5.3 Fazit Herstellung von Steinprototypen

Mit den Laborbetonen wurden abschließend Steinprototypen auf einer so genannten „Einsteinmaschine“ hergestellt, welche die Randbedingungen bei der Großproduktion von Betonpflastersteinen realitätsnah abbildet. Diese Steinprototypen wurden nach 28-tägiger Lagerung unter Folie und an der Luft hinsichtlich physikalischer und mechanischer Kenngrößen untersucht. Folgende Schlussfolgerungen können festgehalten werden:

- Es zeigt sich, dass mit den entwickelten alkalisch aktivierten Betonzusammensetzungen eine Produktion von Betonpflastersteinen in der so genannten „Einsteinmaschine“ völlig problemlos möglich ist, was die Laborergebnisse zur Frischbetonverarbeitbarkeit und Grünstandfestigkeit (Formstabilität) bestätigt.

- Festbetonuntersuchungen an den Steinprototypen nach 28 Tagen bestätigen im Wesentlichen die Ergebnisse aus den Laborversuchen, wobei hier größere Messwertstreuungen zu verzeichnen sind. Auch hier werden die Laborergebnisse durch den Praxisversuch positiv bestätigt.
- Hinsichtlich des Verhaltens gegenüber Wasser in der Gas- bzw. Flüssigphase zeigen sich nach 28 Tagen Lagerung unter Folie und an der Luft Wassergehalte von rd. 2 M.-%. Eine nachgeschaltete atmosphärische Sättigung führt zu Wassergehalten von rd. 4,8 M.-%. Beide Ergebnisse sind vergleichbar mit typischen Werten für zementäre Betone und deuten darauf hin, dass bei den vorliegenden alkalisch aktivierten Betonen kein übermäßig großer, wasserzugänglicher Porenraum vorliegt.
- Eine nachgeschaltete 14-tägige Wasserlagerung führt bei den alkalisch aktivierten Betonen der Steinprototypen zu einer Steigerung der Festigkeiten, was insbesondere beim Beton Nr.3 zu beobachten ist. Hier steigen die mittleren Druckfestigkeiten signifikant von 22,5 N/mm² auf rd. 28 N/mm².
- Der Beton Nr.1 erreicht im Mittel mit 3,9 N/mm² die normativen Anforderungen an die Spaltzugfestigkeit von Pflastersteinbeton, wohingegen der Beton Nr.3 im Mittel 3,0 N/mm² erreicht.

5.4 Ausblick

Die Arbeiten im Rahmen dieses Forschungsprojektes haben eindeutig gezeigt, dass es möglich ist, alkalisch aktivierte Betone basierend auf Betonrezyklaten herzustellen, welche den Herstellungsrandbedingungen auf einer Großanlage genügen. Bezüglich der erreichten Betondruckfestigkeiten wurden zwar technisch sinnvoll nutzbare Größenordnungen generiert, jedoch konnte das hochgesteckte, Ziel die Anforderungen an einen Beton der Güte C35/45 zu erfüllen, nicht ganz erreicht werden.

Um diese Lücke zu schließen, sind weiterführende Untersuchungen an alkalisch aktivierten Betonen notwendig, die auf den Erkenntnissen dieses Forschungsvorhabens stringent aufbauen.

Grundsätzlich lässt sich die Festigkeit von Betonen durch folgende Maßnahmen positiv beeinflussen:

- Optimierung der Gesteinskörnungssieblinie zur Verbesserung des Korngerüstaufbaus.
- Optimierung des Leims durch Modifikation der Pulverkomponente und weitergehende Abstimmung mit ggf. alternativen Aktivatorlösungen.
- Optimierung des Verhältnisses zwischen Leim und Gesteinskörnung zur Verbesserung des Matrixgefüges.
- Optimierung der Nachbehandlung des Frischbetons.

Der in diesem Forschungsprojekt verwendete Betonbrechsand wurde „wie erhalten“ eingesetzt. In Bezug auf die Verbesserung der Gesteinskörnungssieblinie sowie der Optimierung des Leims im alkalisch aktivierten Betons erscheint es sinnvoll, den Brechsand in eine „Mehlkornkomponente“ mit einer Korngröße unter 0/0,064 mm und einer Feinsandkomponente der Korngruppe 0,064/0,5 aufzuteilen. Durch gezielte Variation der Feinsandkomponente in der Gesteinskörnungssieblinie können so die Packungsdichte und der Aufbau des Korngerüstes optimiert werden.

Mit der hochfeinen Mehlkornkomponente sollte ein neuer Leim entwickelt werden, der neben einer möglichst guten Verarbeitbarkeit im besten Fall mit noch höheren Betonrezyklanteilen technisch nutzbare Festigkeiten entwickelt. Die hohen Festigkeiten der Mörtelversuche mit Betonbrechsand deuten darauf hin, dass dieser Weg sehr erfolgsversprechend ist und Gegenstand der weiteren Forschung sein muss.

Da bei der Entwicklung der Pflastersteinbetone vor allem die Anforderungen an die Frischbetoneigenschaften berücksichtigt werden mussten, wurden eher leimarme, erdfeuchte Systemen entwickelt. Daher sollte in einem nächsten Schritt der Übergang vom Pflastersteinbeton zum Konstruktionsbeton vorgenommen werden. Dies bedeutet, dass nun Betone mit einer deutlich geringeren Viskosität hergestellt werden können, da hier keine Grünstandfestigkeit notwendig ist.

Diese ist durch die Optimierung der Sieblinie sowie die Erhöhung des Leimanteils im Beton erreichbar. Hierdurch wird die Umhüllung der Gesteinskörner mit dem alkalisch aktivierten Leimsystem deutlich verbessert, so dass am Ende eine kompakte, leistungsfähige Betonmatrix entsteht.

Wie auch bei den zementären Systemen spielt die betonspezifische Nachbehandlung in Bezug auf die erreichbaren Festigkeiten eine übergeordnete Rolle. Basierend auf der Erkenntnis, dass bereits eine Wasserlagerung nach 28 Tagen Festigkeitszuwächse erzeugen kann, ist in einem nächsten Schritt zu untersuchen, inwiefern dieser Effekt durch eine gezielte hygri-sche bzw. thermische Behandlung vollständig aktiviert werden kann.

Es wird daher von der Autorenschaft angestrebt, die Klärung der zuvor formulierten Fragestellungen im Rahmen eines Fortführungsprojektes zu realisieren.

6 Literaturverzeichnis

Schrifttum

- [Gir13] GIRMSCHEID, G.: Bauprozesse und Bauverfahren des Tunnelbaus, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2013
- [Har07] HARDJITO D.; SARAWAK, M.: The use of fly ash to reduce the environmental Impact of Concrete, in Proceedings of EmCon2007 1st Engineering Conference on Energy & Environments, 2007
- [HEA14] HEATH, A.; PAINE, K.; MCMANUS, M.: Minimising the global warming potential of clay based geopolymers; in Journal of Cleaner Production; Environmental Science 2017
- [Her15] HERRMANN, A., KÖNIG, A., DEHN, F.: Vorschlag zur Klassifizierung von alkalisch-aktivierten Bindemitteln und Geopolymer-Bindemitteln, in Cement International 13, Heft 3, S. 62-69, 2015
- [Kri03] KRIVENKO, P. V.: Role of alkalis in the formation of cement stone structure, in IBAUSIL 15. Internationale Baustofftagung Weimar, Tagungsband I, 2003
- [Kue12] KUENZEL, C.; VANDEPERRE, L. J.; DONATELLO, S.; BOCCACCINI, A. R.; CHEESEMAN, C.: Ambient temperature drying shrinkage and cracking in metakaolin-based geopolymers, in Journal of the American Ceramic Society, Vol. 95, Nr. 10, 2012
- [Mce11] MCLELLAN, B.C.; WILLIAMS, R.P.; LAY, J.; VAN RIESSEN, A.; CORDER, G.D.: Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement, in Journal of Cleaner Production, Nr. 19, 2011
- [Met01] METHA, P. K.: Reducing the environmental impact of concrete, in Concrete international, 2001
- [Neu73] NEUMANN, T.: Einfluss veränderter Brennbedingungen auf die Klinkerzwischenphase und die daraus resultierende Beeinflussung der Hydratation, Dissertation an der Martin-Luther-Universität Halle Witten-Berg, 1973
- [Pac08] PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S.: Alkali-activated binders: A review. Part 2: About materials and binders manufacture, in Construction and Building Materials, Jg. 22, Nr. 7, 2008
- [Pac15] PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J.A.; LEONELLI C.; PALOMO A.; CHINDAPRASIT, P.: Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes, Woodhead Publishing, ISBN 9781782422761, Page 62, 2015
- [Sch11] SCHUBERT, DR. S.; HOFFMANN, C.: Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton mit Mischgranulat, EMPA Abteilung Ingenieurstrukturen (Hrsg.), cemsuisse-Project 200602, 2011
- [Ste09] STEPHAN, D.; SCHMIDT, M.; TÄNZER, R.: Alternative Bindemittel auf Basis alkalisch angeregter Gemische aus Hüttensand und Flugasche, in IBAUSIL 17, Internationale Baustofftagung Weimar, Tagungsband I, 2009

[Str12] STRAUSS, M.: Beispiele und Erfahrungen zum Einsatz von RC-Beton in der Schweiz, Präsentation Eberhard, 14.06.2012

[Zai17] ZAIN, H.; ABDULLAH, M. M.; HUSSIN, K.; ARIFFIN, N.; RIDHO, B.: Review on Various Types of Geopolymer Materials with the Environmental Impact Assessment, EDP Sciences, 2017

Regelwerke

[Reg01] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2008) 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

[Reg01] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: 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

[Reg02] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN EN ISO 17892-4 Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung (ISO 17892-4:2016); Deutsche Fassung EN ISO 17892-4:2016

[Reg03] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN EN ISO 17892-3 Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 3: Bestimmung der Korndichte (ISO 17892-3:2015, korrigierte Fassung 2015-12-15); Deutsche Fassung EN ISO 17892-3:2015

[Reg04] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN EN 12350-4 Prüfung von Frischbeton - Teil 4: Verdichtungsmaß; Deutsche Fassung EN 12350-4:2019

[Reg05] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN EN 206/DIN 1045-2 Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A2:2021

[Reg06] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN EN 12390-3 Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2019

[Reg07] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN EN 12390-6 Prüfung von Festbeton - Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-6:2009

[Reg08] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN EN 12390-13 Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul); Deutsche und Englische Fassung prEN 12390-13:2019

[Reg09] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN EN 1338 Pflastersteine aus Beton - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 1338:2003

[Reg10] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN EN 1992-1-1/NA Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau

[Reg11] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN EN 12390-7 Prüfung von Festbeton - Teil 7: Rohdichte von Festbeton; Deutsche Fassung EN 12390-7:2019 + AC:2020

Internetquellen

[Int01] FORUM NACHHALTIGES BAUEN (FNB), www.nachhaltiges-bauen.de (abgerufen am 02.04.2018)

[Int02] WIRTSCHAFTSVERBAND MINERALISCHE NEBENPRODUKTE E.V. (WIN), <https://www.win-ev.org> (abgerufen am 04.05.2020)

[Int03] STAHLISEN, Stahlmarkt, Ausgabe April 2020

[Int04] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (BMBF), Artikel zum R-Beton, <http://www.r-beton.de> (abgerufen am 04.05.2020)

Anhang A

Ergebnisse der Mörtelversuche

Druckfestigkeiten

Mörtelsysteme mit Metakaolin „MetaVer“

Tabelle A 1: Prüfergebnisse zur Druckfestigkeit nach 7 Tagen an Mörtelsystemen bestehend aus Betonbrechsand und Metakaolin „MetaVer“

MK/B	WGM	A/BMG	Einzelwerte Druckfestigkeit 7d						Mittel
[M.-%/M.-%]	[-]	[-]	[N/mm ²]						[N/mm ²]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
75/25	2,0	1,1	21,49	22,4	22,62	22,38	20,57	20,39	21,64
50/50	2,0	1,1	13,93	15,43	14,53	14,34	13,97	13,84	14,34
25/75	2,0	1,1	4,65	4,93	4,73	4,53	4,59	4,75	4,70
100/0	2,0	1,1	41,92	41,43	38,94	41,45	35,6	39,04	39,73
75/25	1,9	1,1	26,29	26,62	27,61	25,5	28,03	29,39	27,24
50/50	1,9	1,1	13,52	13,28	14,07	14,12	14,48	14,58	14,01
25/75	1,9	1,1	4,22	4,29	4,06	4,17	4,3	4,47	4,25
100/0	1,9	1,1	40,25	39,88	39,86	39,74	39,53	39,48	39,79
75/25	1,8	1,1	29,47	22,89	24,68	24,6	25,34	23,55	25,09
50/50	1,8	1,1	11,97	11,5	12,44	12,46	11,88	12,34	12,10
25/75	1,8	1,1	2,97	3,02	3,17	3,08	2,88	2,93	3,01
100/0	1,8	1,1	44,68	43,59	42,64	44,16	44,21	42,43	43,62
75/25	1,7	1,1	23,14	22,83	22,86	22,15	22,73	22,76	22,75
50/50	1,7	1,1	11	11,33	10,83	11,06	11,02	10,92	11,03
25/75	1,7	1,1	3	2,79	2,82	2,7	2,91	2,73	2,83
100/0	1,7	1,1	45,68	43,7	43,87	44,04	45,11	45,62	44,67

Tabelle A 2: Prüfergebnisse zur Druckfestigkeit nach 14 Tagen an Mörtelsystemen bestehend aus Betonbrechsand und Metakaolin „MetaVer“

MK/B	WGM	A/BMG	Einzelwerte Druckfestigkeit 14d						Mittel
[M.-%/M.-%]	[-]	[-]	[N/mm²]						[N/mm²]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
75/25	2,0	1,1	18,13	18,19	19,26	18,88	19,62	18,9	18,83
50/50	2,0	1,1	10,34	11,56	10,82	11,16	10,74	10,4	10,84
25/75	2,0	1,1	6,49	6,1	6,27	6,1	6,46	6,08	6,25
100/0	2,0	1,1	38,04	38,56	37,75	38,89	37,94	38,59	38,30
75/25	1,9	1,1	14,84	13,87	14,59	13,91	14,69	14,09	14,33
50/50	1,9	1,1	9,97	10,06	10,83	9,89	9,8	10,42	10,16
25/75	1,9	1,1	6,27	6,1	6,48	6,14	6,03	5,95	6,16
100/0	1,9	1,1	30,06	31,47	32,05	31,55	31,24	32,58	31,49
75/25	1,8	1,1	17,05	16,81	15,76	15,29	16,24	15,79	16,16
50/50	1,8	1,1	9,94	10,25	10,47	10,41	10,29	9,93	10,22
25/75	1,8	1,1	5,47	5,5	5,23	5,06	5,71	5,62	5,43
100/0	1,8	1,1	32,05	32,07	33,34	33,58	31,57	34,05	32,78
75/25	1,7	1,1	15,5	14,8	15,13	15,59	14,97	15,14	15,19
50/50	1,7	1,1	9,52	9,44	9,38	9,14	9,25	9,14	9,31
25/75	1,7	1,1	3,88	4,02	3,91	3,76	4,29	4,51	4,06
100/0	1,7	1,1	25,98	25,55	27,2	27,01	24,99	27,24	26,33

Tabelle A 3: Prüfergebnisse zur Druckfestigkeit nach 28 Tagen an Mörtelsystemen bestehend aus Betonbrechsand und Metakaolin „MetaVer“

MK/B	WGM	A/BMG	Einzelwerte Druckfestigkeit 28d						Mittel
[M.-%/M.-%]	[-]	[-]	[N/mm²]						[N/mm²]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
75/25	2,0	1,1	15,12	14,69	14,97	14,47	15,49	13,95	14,78
50/50	2,0	1,1	8,62	8,75	9,51	8,8	8,89	8,11	8,78
25/75	2,0	1,1	9,12	8,42	8,73	8,59	9,33	8,77	8,83
100/0	2,0	1,1	35,24	36,94	36,95	36,39	35,83	37,35	36,45
75/25	1,9	1,1	11,42	11,82	10,73	11,37	10,86	11,51	11,29
50/50	1,9	1,1	9,15	9,18	9,2	8,96	8,47	8,83	8,97
25/75	1,9	1,1	9,77	10,09	10,1	10,14	10,31	10,01	10,07
100/0	1,9	1,1	26,5	27,16	26,51	26,67	26,64	25,91	26,57
75/25	1,8	1,1	11,23	11,93	11,74	11,73	11,75	11,69	11,68
50/50	1,8	1,1	9,04	8,96	8,74	8,37	8,37	8,15	8,61
25/75	1,8	1,1	8,13	8,08	8,82	8,38	8,48	8,02	8,32
100/0	1,8	1,1	23,5	23,67	24,58	23,9	23,28	24,22	23,86
75/25	1,7	1,1	11,3	11,01	10,53	11,04	10,74	11,38	11,00
50/50	1,7	1,1	8,73	8,77	8,89	8,64	8,7	8,9	8,77
25/75	1,7	1,1	8,29	8,14	7,58	7,52	7,51	7,55	7,77
100/0	1,7	1,1	20,67	19,79	19,23	20,28	19,17	19,77	19,82

Mörtelsysteme mit Metakaolin „Power Pozz“

Tabelle A 4: Prüfergebnisse zur Druckfestigkeit nach 7 Tagen an Mörtelsystemen bestehend aus Betonbrechsand und Metakaolin „PowerPozz“

MK/B	WGM	A/BMG	Einzelwerte Druckfestigkeit 7d						Mittel
[M.-%/M.-%]	[-]	[-]	[N/mm ²]						[N/mm ²]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
75/25	2,0	1,1	24,48	22,58	24,94	28,07	22,49	22,49	24,18
50/50	2,0	1,1	23,23	24,00	25,11	25,11	25,11	25,11	24,61
25/75	2,0	1,1	12,79	12,92	12,43	12,64	12,49	12,16	12,57
100/0	2,0	1,1	47,45	40,55	41,71	47,47	47,86	40,15	44,20
75/25	1,9	1,1	47,71	48,59	44,90	46,78	46,78	44,58	46,56
50/50	1,9	1,1	39,29	40,20	39,79	42,17	40,88	40,16	40,41
25/75	1,9	1,1	13,81	14,10	15,91	13,03	9,16	14,43	13,41
100/0	1,9	1,1	65,79	65,82	65,82	65,80	64,11	62,13	64,91
75/25	1,8	1,1	49,59	50,76	51,63	51,82	59,75	57,04	53,43
50/50	1,8	1,1	41,57	40,93	41,22	39,77	38,69	38,17	40,06
25/75	1,8	1,1	14,79	14,84	14,20	14,65	14,53	14,81	14,64
100/0	1,8	1,1	68,44	68,44	70,22	70,24	68,49	68,47	69,05
75/25	1,7	1,1	65,58	63,73	67,46	65,04	70,12	68,61	66,76
50/50	1,7	1,1	48,80	47,97	47,30	47,54	47,26	47,92	47,80
25/75	1,7	1,1	12,85	12,32	12,85	12,28	12,40	12,36	12,51
100/0	1,7	1,1	72,05	72,07	72,04	72,03	68,48	68,46	70,85

Tabelle A 5: Prüfergebnisse zur Druckfestigkeit nach 14 Tagen an Mörtelsystemen bestehend aus Betonbrechsand und Metakaolin „PowerPozz“

MK/B	WGM	A/BMG	Einzelwerte Druckfestigkeit 14d						Mittel
[M.-%/M.-%]	[-]	[-]	[N/mm ²]						[N/mm ²]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
75/25	2,0	1,1	60,10	59,40	55,96	57,42	60,11	60,84	58,97
50/50	2,0	1,1	44,00	43,56	45,04	45,35	43,73	44,77	44,41
25/75	2,0	1,1	13,34	14,25	13,36	13,01	14,67	13,77	13,73
100/0	2,0	1,1	49,26	52,19	55,25	49,91	55,34	50,93	52,14
75/25	1,9	1,1	54,48	59,61	64,11	63,15	62,51	62,51	61,06
50/50	1,9	1,1	46,18	45,16	47,21	47,14	46,33	45,21	46,20
25/75	1,9	1,1	13,46	13,04	13,30	12,56	13,62	13,05	13,17
100/0	1,9	1,1	69,27	70,21	72,04	67,22	68,49	68,46	69,28
75/25	1,8	1,1	68,17	66,82	64,48	63,10	62,66	67,59	65,47
50/50	1,8	1,1	39,53	40,80	37,46	37,33	42,59	40,30	39,67
25/75	1,8	1,1	13,05	14,27	13,01	13,62	14,23	13,48	13,61
100/0	1,8	1,1	68,44	68,46	68,44	68,45	68,43	68,47	68,45
75/25	1,7	1,1	67,12	68,31	70,15	70,16	68,40	68,01	68,69
50/50	1,7	1,1	45,10	43,66	45,97	45,39	45,50	44,64	45,05
25/75	1,7	1,1	13,51	13,89	13,53	14,02	14,41	14,28	13,94
100/0	1,7	1,1	70,28	70,29	70,23	70,20	72,08	72,09	70,86

Tabelle A 6: Prüfergebnisse zur Druckfestigkeit nach 28 Tagen an Mörtelsystemen bestehend aus Betonbrechsand und Metakaolin „PowerPozz“

MK/B	WGM	A/BMG	Einzelwerte Druckfestigkeit 28d						Mittel
[M.-%/M.-%]	[-]	[-]	[N/mm²]						[N/mm²]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
75/25	2,0	1,1	59,20	53,88	55,58	60,19	62,56	63,54	59,16
50/50	2,0	1,1	37,94	40,35	40,77	41,04	36,58	39,50	39,36
25/75	2,0	1,1	11,47	11,20	11,82	12,23	12,13	13,47	12,05
100/0	2,0	1,1	49,07	59,12	55,09	58,65	53,23	56,42	55,26
75/25	1,9	1,1	67,77	66,43	70,17	70,19	70,13	70,14	69,14
50/50	1,9	1,1	42,50	45,36	47,99	47,81	47,34	44,57	45,93
25/75	1,9	1,1	10,85	10,49	11,06	10,87	10,65	10,53	10,74
100/0	1,9	1,1	71,98	72,00	72,04	68,04	70,19	70,16	70,74
75/25	1,8	1,1	65,62	64,91	65,13	65,36	62,61	63,42	64,51
50/50	1,8	1,1	41,63	38,00	40,54	42,66	38,10	41,68	40,43
25/75	1,8	1,1	9,24	9,40	9,59	9,00	9,41	9,10	9,29
100/0	1,8	1,1	68,45	68,45	70,22	70,22	68,49	68,51	69,06
75/25	1,7	1,1	68,38	68,40	68,36	68,45	68,41	68,42	68,40
50/50	1,7	1,1	35,82	36,30	34,87	37,93	37,93	39,67	37,09
25/75	1,7	1,1	9,34	9,60	9,54	9,32	9,12	9,98	9,48
100/0	1,7	1,1	70,26	70,25	68,45	68,49	70,27	70,25	69,66

Biegezugfestigkeiten

Mörtelsysteme mit Metakaolin „MetaVer“

Tabelle A 7: Prüfergebnisse zur Biegezugfestigkeit nach 7 Tagen an Mörtelsystemen bestehend aus Betonbrechsand und Metakaolin „MetaVer“

MK/B	WGM	A/BMG	Einzelwerte Biegezug 7d			Mittel
[M.-%/M.-%]	[-]	[-]	[N/mm ²]			[N/mm ²]
1	2	3	4	5	6	7
75/25	2,0	1,1	3,19	3,29	3,5	3,33
50/50	2,0	1,1	2,7	2,8	2,73	2,74
25/75	2,0	1,1	1,57	1,5	1,49	1,52
100/0	2,0	1,1	5,98	6,36	6,29	6,21
75/25	1,9	1,1	4,1	4,21	5,38	4,56
50/50	1,9	1,1	2,42	2,96	2,79	2,72
25/75	1,9	1,1	1,52	1,7	1,42	1,55
100/0	1,9	1,1	5,38	6,24	5,16	5,59
75/25	1,8	1,1	3,39	3,88	4,03	3,77
50/50	1,8	1,1	2,63	2,48	2,72	2,61
25/75	1,8	1,1	1,57	1,49	1,39	1,48
100/0	1,8	1,1	5,29	6,11	6,2	5,87
75/25	1,7	1,1	3,45	3,72	3,5	3,56
50/50	1,7	1,1	2,39	2,53	2,4	2,44
25/75	1,7	1,1	1,41	1,5	1,62	1,51
100/0	1,7	1,1	5,9	6,18	5,46	5,85

Tabelle A 8: Prüfergebnisse zur Biegezugfestigkeit nach 14 Tagen an Mörtelsystemen bestehend aus Betonbrechsand und Metakaolin „MetaVer“

MK/B	WGM	A/BMG	Einzelwerte Biegezug 14d			Mittel
[M.-%/M.-%]	[-]	[-]	[N/mm²]			[N/mm²]
1	2	3	4	5	6	7
75/25	2,0	1,1	3,78	4,43	4,22	4,14
50/50	2,0	1,1	2,8	2,79	2,79	2,79
25/75	2,0	1,1	1,62	1,88	1,76	1,75
100/0	2,0	1,1	6,09	5,28	5,77	5,71
75/25	1,9	1,1	3,1	3,18	3,12	3,13
50/50	1,9	1,1	2,95	2,88	2,9	2,91
25/75	1,9	1,1	2,1	2,35	2,09	2,18
100/0	1,9	1,1	5,45	6,12	5,28	5,62
75/25	1,8	1,1	3,75	3,41	3,38	3,51
50/50	1,8	1,1	2,33	2,19	2,68	2,40
25/75	1,8	1,1	2,12	1,94	2,11	2,06
100/0	1,8	1,1	6,05	5,19	5,31	5,52
75/25	1,7	1,1	2,82	3,59	3,09	3,17
50/50	1,7	1,1	2,39	2,53	2,4	2,44
25/75	1,7	1,1	1,41	1,5	1,62	1,51
100/0	1,7	1,1	5,9	6,18	5,46	5,85

Tabelle A 9: Prüfergebnisse zur Biegezugfestigkeit nach 28 Tagen an Mörtelsystemen bestehend aus Betonbrechsand und Metakaolin „MetaVer“

MK/B	WGM	A/BMG	Einzelwerte Biegezug 28d			Mittel
[M.-%/M.-%]	[-]	[-]	[N/mm²]			[N/mm²]
1	2	3	4	5	6	7
75/25	2,0	1,1	4,68	4,97	3,7	4,45
50/50	2,0	1,1	2,62	2,79	2,43	2,61
25/75	2,0	1,1	2,56	2,41	2,67	2,55
100/0	2,0	1,1	7,89	7,44	7,05	7,46
75/25	1,9	1,1	3,36	3,02	3,1	3,16
50/50	1,9	1,1	2,31	2,64	2,67	2,54
25/75	1,9	1,1	2,7	2,77	2,38	2,62
100/0	1,9	1,1	5,6	6,38	6,57	6,18
75/25	1,8	1,1	3,12	2,94	2,7	2,92
50/50	1,8	1,1	2,31	2,4	2,4	2,37
25/75	1,8	1,1	2,21	2,39	2,32	2,31
100/0	1,8	1,1	5,73	5,37	5,43	5,51
75/25	1,7	1,1	2,8	2,89	2,7	2,80
50/50	1,7	1,1	2,3	2,72	2,97	2,66
25/75	1,7	1,1	2,93	2,56	2,7	2,73
100/0	1,7	1,1	4,68	4,69	5,02	4,80

Tabelle A 10: Prüfergebnisse zur Biegezugfestigkeit nach 7 Tagen an Mörtelsystemen bestehend aus Betonbrechsand und Metakaolin „PowerPozz“

MK/B	WGM	A/BMG	Einzelwerte Biegezug 7d			Mittel
[M.-%/M.-%]	[-]	[-]	[N/mm²]			[N/mm²]
1	2	3	4	5	6	7
75/25	2,0	1,1	4,57	4,61	4,7	4,63
50/50	2,0	1,1	4,47	4,38	4,29	4,38
25/75	2,0	1,1	2,82	2,94	2,68	2,81
100/0	2,0	1,1	7,99	6,68	7,19	7,29
75/25	1,9	1,1	7,09	7,12	7,55	7,25
50/50	1,9	1,1	5,37	5,79	5,68	5,61
25/75	1,9	1,1	2,78	3	2,95	2,91
100/0	1,9	1,1	7,32	10,09	8,39	8,60
75/25	1,8	1,1	7,32	8,52	7,6	7,81
50/50	1,8	1,1	6,2	5,62	5,92	5,91
25/75	1,8	1,1	2,41	2,86	2,38	2,55
100/0	1,8	1,1	9,05	9,99	11,4	10,15
75/25	1,7	1,1	8,69	8,2	10,22	9,04
50/50	1,7	1,1	6,43	6,83	6,06	6,44
25/75	1,7	1,1	2,34	2,3	2,53	2,39
100/0	1,7	1,1	9,15	9,92	11,22	10,10

Tabelle A 11: Prüfergebnisse zur Biegezugfestigkeit nach 14 Tagen an Mörtelsystemen bestehend aus Betonbrechsand und Metakaolin „PowerPozz“

MK/B	WGM	A/BMG	Einzelwerte Biegezug 14d			Mittel
[M.-%/M.-%]	[-]	[-]	[N/mm²]			[N/mm²]
1	2	3	4	5	6	7
75/25	2,0	8,5	9,09	8,95	8,5	8,85
50/50	2,0	7,24	7,08	7,11	7,24	7,14
25/75	2,0	2,62	2,51	2,89	2,62	2,67
100/0	2,0	8,7	9,69	9,31	8,7	9,23
75/25	1,9	9,15	9,5	8,57	9,15	9,07
50/50	1,9	6,79	6,57	6,81	6,79	6,72
25/75	1,9	2,2	2,16	2,38	2,2	2,25
100/0	1,9	9,4	9,72	10,65	9,4	9,92
75/25	1,8	9,81	9,28	8,88	9,81	9,32
50/50	1,8	5,91	5,79	6,4	5,91	6,03
25/75	1,8	2,39	2,68	2,28	2,39	2,45
100/0	1,8	10,52	11,08	9,18	10,52	10,26
75/25	1,7	9,32	10,51	9,77	9,32	9,87
50/50	1,7	6,12	5,32	5,98	6,12	5,81
25/75	1,7	2,97	2,78	2,55	2,97	2,77
100/0	1,7	11,19	9,99	10,3	11,19	10,49

Tabelle A 12: Prüfergebnisse zur Biegezugfestigkeit nach 28 Tagen an Mörtelsystemen bestehend aus Betonbrechsand und Metakaolin „PowerPozz“

MK/B	WGM	A/BMG	Einzelwerte Biegezug 28d			Mittel
[M.-%/M.-%]	[-]	[-]	[N/mm²]			[N/mm²]
1	2	3	4	5	6	7
75/25	2,0	8,9	9,1	8,44	8,9	8,81
50/50	2,0	6,79	6,42	6,08	6,79	6,43
25/75	2,0	2,76	2,55	2,71	2,76	2,67
100/0	2,0	10,21	10,59	11,19	10,21	10,66
75/25	1,9	10,42	10,12	10,3	10,42	10,28
50/50	1,9	6,99	7,22	6,48	6,99	6,90
25/75	1,9	2,52	2,47	2,02	2,52	2,34
100/0	1,9	6,83	9,69	9,49	6,83	8,67
75/25	1,8	8,46	8,69	9,12	8,46	8,76
50/50	1,8	6,29	7,3	6,48	6,29	6,69
25/75	1,8	2	2,12	2,08	2	2,07
100/0	1,8	12,97	12,02	12,88	12,97	12,62
75/25	1,7	8,1	10,3	9,89	8,1	9,43
50/50	1,7	6,12	5,39	6,45	6,12	5,99
25/75	1,7	2,32	2,36	2,41	2,32	2,36
100/0	1,7	10,33	9,21	9,7	10,33	9,75

Anhang B

Ergebnisse der Laborbetonversuche

Beton Nr. 1

Versuchsreihen und Zusammensetzung

Tabelle B 1: Übersicht der Versuchsreihe 01.01

Versuchsreihe	Probe Nr.	Datum der Prüfung [dd.mm.yy]	Anteile (BM/MK) [%/%]	WGM [-]	Verhältnis (AL/P) [-]	Verhältnis (G/L) [-]	Einwaage [g] Gesteinskörnung (G)			Einwaage [g] Leim (L)					Einwaage Gesamt [g]
							Sand 0/2	Kies 2/8	Gesamt	AL		P		Gesamtmenge L	
										WG	BM	MK	Gesamtmenge P		
01.01	-01	23.07.2020	25/75	1,9	1,1	5,0	1200	1800	3000	314,3	71,4	214,3	285,7	600	3600
01.01	-01	23.07.2020	25/75	1,9	1,1	4,8	1200	1800	3000	327,4	74,4	223,2	297,6	625	3625
01.01	-02	26.06.2020	25/75	1,9	1,1	6,5	1200	1800	3000	241,7	55	164,9	219,8	461,5	3461,5
01.01	-03	26.06.2020	25/75	1,9	1,1	6,0	1200	1800	3000	261,9	59,5	178,6	238,1	500	3500
01.01	-04	26.06.2020	25/75	1,9	1,1	5,7	1200	1800	3000	275,7	62,7	188	250,6	526,3	3526,3
01.01	-05	26.06.2020	25/75	1,9	1,1	5,5	1200	1800	3000	285,7	65	194,9	259,8	545,5	3545,5
01.01	-06	26.06.2020	25/75	1,9	1,1	5,4	1200	1800	3000	291	66,2	198,5	264,6	555,6	3555,6
01.01	-07	26.06.2020	25/75	1,9	1,1	5,3	1200	1800	3000	296,5	67,4	202,1	269,5	566	3566
01.01	-08	26.06.2020	25/75	1,9	1,1	5,2	1200	1800	3000	302,2	68,7	206	274,7	576,9	3576,9
01.01	-09	26.06.2020	25/75	1,9	1,1	5,1	1200	1800	3000	308,1	70	210,1	280,1	588,2	3588,2

Tabelle B 2: Übersicht der Versuchsreihe 01.02

Versuchsreihe	Probe Nr.	Datum der Prüfung [dd.mm.yy]	Anteile (BM/MK) [%/%]	WGM [-]	Verhältnis (AL/P) [-]	Verhältnis (G/L) [-]	Einwaage [g] Gesteinskörnung (G)			Einwaage [g] Leim (L)					Einwaage Gesamt [g]
							Sand 0/2	Kies 2/8	Gesamt	AL		P		Gesamtmenge L	
										WG	BM	MK	Gesamtmenge P		
01.02	-01	23.06.2020	25/75	1,9	0,9	6,5	1200	1800	3000	218,6	60,7	182,2	242,9	461,5	3461,5
01.02	-02	26.06.2020	25/75	1,9	0,9	6,3	1200	1800	3000	225,6	62,7	188	250,6	476,2	3476,2
01.02	-03	26.06.2020	25/75	1,9	0,9	6,1	1200	1800	3000	233	64,7	194,1	258,8	491,8	3491,8
01.02	-04	26.06.2020	25/75	1,9	0,9	5,9	1200	1800	3000	240,9	66,9	200,7	267,6	508,5	3508,5
01.02	-05	26.06.2020	25/75	1,9	0,9	5,5	1200	1800	3000	258,4	71,8	215,3	287,1	545,5	3545,5
01.02	-06	26.06.2020	25/75	1,9	0,9	5,0	1200	1800	3000	284,2	79	236,9	315,8	600	3600

Tabelle B 3: Übersicht der Versuchsreihe 01.03

Versuchsreihe	Probe Nr.	Datum der Prüfung [dd.mm.yy]	Anteile (BM/MK) [%/%]	WGM [-]	Verhältnis (AL/P) [-]	Verhältnis (G/L) [-]	Einwaage [g] Gesteinskörnung (G)			Einwaage [g] Leim (L)				Einwaage Gesamt [g]	
							Sand 0/2	Kies 2/8	Gesamt	AL			Gesamtmenge P		Gesamtmenge L
										WG	BM	MK			
01.03	-01	02.07.2020	25/75	1,9	1,3	6,5	1200	1800	3000	260,8	50,2	150,5	200,7	461,5	3461,5
01.03	-02	02.07.2020	25/75	1,9	1,3	6,3	1200	1800	3000	269,2	51,8	155,3	207	476,2	3476,2
01.03	-03	09.07.2020	25/75	1,9	1,3	8,0	1200	1800	3000	212	40,8	122,3	163	375	3375
01.03	-04	09.07.2020	25/75	1,9	1,3	7,5	1200	1800	3000	226,1	43,5	130,4	173,9	400	3400
01.03	-05	09.07.2020	25/75	1,9	1,3	7,3	1200	1800	3000	232,3	44,7	134	178,7	411	3411
01.03	-06	09.07.2020	25/75	1,9	1,3	7,1	1200	1800	3000	238,8	45,9	137,8	183,7	422,5	3422,5
01.03	-07	09.07.2020	25/75	1,9	1,3	6,9	1200	1800	3000	245,8	47,3	141,8	189	434,8	3434,8
01.03	-08	09.07.2020	25/75	1,9	1,3	6,7	1200	1800	3000	253,1	48,7	146	194,7	447,8	3447,8

Tabelle B 4: Übersicht der Versuchsreihe 01.04

Versuchsreihe	Probe Nr.	Datum der Prüfung [dd.mm.yy]	Anteile (BM/MK) [%/%]	WGM [-]	Verhältnis (AL/P) [-]	Verhältnis (G/L) [-]	Einwaage [g] Gesteinskörnung (G)			Einwaage [g] Leim (L)				Einwaage Gesamt [g]	
							Sand 0/2	Kies 2/8	Gesamt	AL			Gesamtmenge P		Gesamtmenge L
										WG	BM	MK			
01.04	-01	30.07.2020	25/75	1,9	1,2	7,0	1200	1800	3000	223,6	51,3	153,8	205	428,6	3428,6
01.04	-02	30.07.2020	25/75	1,9	1,2	6,5	1200	1800	3000	240,8	55,2	165,5	220,7	461,5	3461,5
01.04	-03	30.07.2020	25/75	1,9	1,2	6,3	1200	1800	3000	250,4	57,4	172,2	229,6	480	3480
01.04	-04	30.07.2020	25/75	1,9	1,2	6,0	1200	1800	3000	260,9	59,8	179,3	239,1	500	3500
01.04	-05	30.07.2020	25/75	1,9	1,2	5,8	1200	1800	3000	269,8	61,9	185,6	247,4	517,2	3517,2
01.04	-06	30.07.2020	25/75	1,9	1,2	5,6	1200	1800	3000	279,5	64,1	192,2	256,2	535,7	3535,7
01.04	-07	30.07.2020	25/75	1,9	1,2	5,4	1200	1800	3000	289,9	66,4	199,3	265,7	555,6	3555,6
01.04	-07	30.07.2020	25/75	1,9	1,2	5,2	1200	1800	3000	301	69	206,9	275,9	576,9	3576,9
01.04	-04	30.07.2020	25/75	1,9	1,2	5,0	1200	1800	3000	313	71,8	215,3	287	600	3600
01.04	-04	30.07.2020	25/75	1,9	1,2	4,8	1200	1800	3000	326,1	74,7	224,2	298,9	625	3625
01.04	-04	30.07.2020	25/75	1,9	1,2	4,6	1200	1800	3000	340,3	78	233,9	311,9	652,2	3652,2

Konsistenzversuche

Tabelle B 5: Übersicht über die Konsistenzversuche Versuchsreihen 01.01 und 01.02

01 Verhältnis Pulverkonstante BM/MK = 25% / 75%						Konsistenz	Standfestigkeit direkt nach dem Ausschalen	Scherfestig- keit [N/mm ²]	Reibungs- winkel [°]	Kohäsion [N/mm ²]	Grünstand- festigkeit [N/mm ²]	Frischbeton- rohddichte [kg/dm ³]	Dynamisches Verdichtungs- maß [mm]
Versuch Nr.	Probe Nr.	Bezeichnung	Verhältnis AL/P	Verhältnis G/L	Alter [d]								
01.01						Verhältnis AL/P = 1,1							
01.01	-01	WGM1,9_25/75_1,1_01	1,1	5,0	0	Es bilden sich etwa 2 cm große klebrige Schollen. Die Masse lässt sich nicht mit der Hand zerbröseln und ist sehr zusammenhängend	-	-	-	-	-	-	-
01.01	-02	WGM1,9_25/75_1,1_02	1,1	6,5	0	Es bilden sich weniger und kleinere bis zu 1,5 cm große Schollen. Beim Zusammendrücken in der Hand zerbröseln der Frischbeton schnell und ist lose.	-	-	-	-	-	-	-
01.01	-03	WGM1,9_25/75_1,1_03	1,1	6,0	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 6,5. Die Masse klebt aber nun leicht zusammen, zerbröseln beim Zusammenkneten aber noch schnell.	-	-	-	-	-	-	-
01.01	-04	WGM1,9_25/75_1,1_04	1,1	5,7	0	Bei der Leimzugabe bilden sich wieder bis zu 2,5 cm große Batzen bzw. Schollen. Beim Zusammenkneten in der Hand hält der Frischbeton gut zusammen und ist leicht rieselfähig	bleibt stehen (mind. 10 min)	0,22429	41,57	0,009	0,04	-	-
01.01	-05	WGM1,9_25/75_1,1_05	1,1	5,5	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 5,7. Die Masse klebt gut zusammen und ist leicht rieselfähig.	Die Probe bleibt stehen (mind. 10min)	0,24286	43,92	0,009	0,042	-	-
01.01	-06	WGM1,9_25/75_1,1_06	1,1	5,4	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 5,5. Die Masse klebt gut zusammen und ist leicht rieselfähig.	-	-	-	-	-	-	-
01.01	-07	WGM1,9_25/75_1,1_07	1,1	5,3	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 5,4. Die Masse klebt gut zusammen, ist aber nicht mehr so rieselfähig. Beim Zusammenkneten hat der Leim an den Körnern eine Konsistenz wie Honig. Die Batzen werden langsam kleiner.	Die Probe bleibt stehen (mind. 10min)	0,21762	40,6	0,015	0,065	-	-
01.01	-08	WGM1,9_25/75_1,1_08	1,1	5,2	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 5,3. Die Masse klebt gut zusammen, ist aber nicht mehr so rieselfähig.	-	-	-	-	-	-	-
01.01	-09	WGM1,9_25/75_1,1_09	1,1	5,1	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 5,2. Die Masse klebt immer mehr zusammen, ist aber nicht mehr rieselfähig.	Die Probe bleibt stehen (mind. 10min)	-	-	-	-	-	-
01.02						Verhältnis AL/P = 0,9							
01.02	-01	WGM1,9_25/75-01.02-01	0,9	6,5	0	Es bilden sich große klebrige, bis ca. 3 cm große Batzen. Die Gesteinskörnung wird nicht komplett gebunden und der Frischbeton fällt auseinander.	-	-	-	-	-	-	-
01.02	-02	WGM1,9_25/75-01.02-02	0,9	6,3	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 6,5. Die Gesteinskörnung wird immer noch nicht komplett gebunden.	-	-	-	-	-	-	-
01.02	-03	WGM1,9_25/75-01.02-03	0,9	6,1	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 6,3. Die Gesteinskörnung wird immer noch nicht komplett gebunden.	-	-	-	-	-	-	-
01.02	-04	WGM1,9_25/75-01.02-04	0,9	5,9	0	Die Betonbatzen werden größer. Es wird mehr Gesteinskörnung gebunden, aber es entsteht kein homogenes Gemisch.	-	-	-	-	-	-	-
01.02	-05	WGM1,9_25/75-01.02-05	0,9	5,5	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 5,9. Es entsteht kein homogener Frischbeton.	-	-	-	-	-	-	-
01.02	-06	WGM1,9_25/75-01.02-06	0,9	5,0	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 5,5. Es entsteht kein homogener Frischbeton.	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle B 6: Visualisierung der Konsistenzversuche an ausgewählten Varianten der Versuchsreihe 01.01 nach dem Anmischen (links) und im Knetversuch (rechts)

G/BMG 1	Nach dem Anmischen 2	Nach dem Knetversuch 3
5,0		
5,1		
5,5		
6,5		

Tabelle B 7: Visualisierung der Konsistenzversuche an ausgewählten Varianten der Versuchsreihe 01.02 nach dem Anmischen (links) und im Knetversuch (rechts)

G/BMG 1	Nach dem Anmischen 2	Nach dem Knetversuch 3
5,5		
6,1		
6,5		

Tabelle B 8: Übersicht über die Konsistenzversuche Versuchsreihen 01.03 und 01.04

01 Verhältnis Pulverkonstante BM/MK = 25% / 75%						Konsistenz	Standfestigkeit direkt nach dem Ausschalen	Scherfestigkeit [N/mm ²]	Reibungswinkel [°]	Kohäsion [N/mm ²]	Grünstandfestigkeit [N/mm ²]	Frischbetonrohddichte [kg/dm ³]	Dynamisches Verdichtungsmaß [mm]
Versuch Nr.	Probe Nr.	Bezeichnung	Verhältnis AL/P	Verhältnis G/L	Alter [d]								
01.03						Verhältnis AL/P = 1,3							
01.03	-01	WGM1,9_25/75-01.03-01	1,3	6,5	0	Es bilden sich keine Batzen oder Schollen. Der Leim ist flüssiger und der Frischbeton fühlt sich nass an. Er zerfällt leicht und klebt nur kurz zusammen.	-	-	-	-	-	-	-
01.03	-02	WGM1,9_25/75-01.03-02	1,3	6,3	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 6,5. Der Beton ist schon zu nass. Er zerfällt leicht und klebt nur kurz zusammen	-	-	-	-	-	-	-
01.03	-03	WGM1,9_25/75-01.03-03	1,3	8,0	0	Es bilden sich vereinzelt bis zu 2 cm große Schollen. Die Gesteinskörnung wird noch nicht komplett gebunden. Der Frischbeton fällt schnell auseinander und ist lose	-	-	-	-	-	-	-
01.03	-04	WGM1,9_25/75-01.03-04	1,3	7,5	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 8,0. Der Frischbeton fällt noch schnell auseinander.	-	-	-	-	-	-	-
01.03	-05	WGM1,9_25/75-01.03-05	1,3	7,3	0	Es wird mehr Gesteinskörnung gebunden. Der Beton fühlt sich allgemein wie nasser Sand an und hängt besser zusammen.	kippt nach 30 Sekunden um	-	-	-	-	-	-
01.03	-06	WGM1,9_25/75-01.03-06	1,3	7,1	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 7,3. Der Frischbeton leicht zusammen.	kippt nach 8 Sekunden um	-	-	-	-	-	-
01.03	-07	WGM1,9_25/75-01.03-07	1,3	6,9	0	Der Frischbeton wird noch nasser durch den flüssigeren Leim und fällt leichter auseinander als bei 7,1.	-	-	-	-	-	-	-
01.03	-08	WGM1,9_25/75-01.03-08	1,3	6,7	0	Der Frischbeton wird noch nasser durch den flüssigeren Leim und fällt leichter auseinander als bei 6,9.	-	-	-	-	-	-	-
01.04						Verhältnis AL/P = 1,2							
01.04	-01	WGM1,9_25/75_1,2_01	1,2	7,0	0	Wie beim AL/P-Verhältnis 1,1 bilden sich bis zu 2,5cm große Frischbetonbatzen. Teile der Gesteinskörnung werden noch nicht gebunden.	-	-	-	-	-	-	-
01.04	-02	WGM1,9_25/75_1,2_02	1,2	6,5	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 7,0. Der Frischbeton hält noch nicht zusammen.	-	-	-	-	-	-	-
01.04	-03	WGM1,9_25/75_1,2_03	1,2	6,3	0	Die großen Batzen werden weniger. Der Frischbeton hält jedoch immer noch nicht zusammen	-	-	-	-	-	-	-
01.04	-04	WGM1,9_25/75_1,2_04	1,2	6,0	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 6,3. Der Frischbeton hält besser zusammen.	bleibt stehen (mind. 10 min)	0,22429	41,35	0,016	0,071	2,16	1,43
01.04	-05	WGM1,9_25/75_1,2_05	1,2	5,8	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 6,0. Der Frischbeton hält besser zusammen.	-	-	-	-	-	-	-
01.04	-06	WGM1,9_25/75_1,2_06	1,2	5,6	0	Es sind nur noch wenige größere Frischbetonbatzen vorhanden. Der Beton fühlt sich klebriger an und hängt gut zusammen.	bleibt stehen (mind. 10 min)	0,22381	41,48	0,012	0,053	-	-
01.04	-07	WGM1,9_25/75_1,2_07	1,2	5,4	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 5,6.	-	-	-	-	-	-	-
01.04	-08	WGM1,9_25/75_1,2_08	1,2	5,2	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 5,4. Der Frischbeton hält gut zusammen und ist leicht rieselfähig.	bleibt stehen (mind. 10 min)	0,22905	42,08	0,013	0,059	-	-
01.04	-09	WGM1,9_25/75_1,2_09	1,2	5,0	0	Es sind keine größeren Batzen mehr vorhanden und der Frischbeton hält gut zusammen.	-	-	-	-	-	-	-
01.04	-10	WGM1,9_25/75_1,2_10	1,2	4,8	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 5,0.	bleibt stehen (mind. 10 min)	-	-	-	-	-	-
01.04	-11	WGM1,9_25/75_1,2_11	1,2	4,6	0	Der Frischbeton fühlt sich nasser an und hängt nicht mehr so gut zusammen beim Zusammenkneten in der Hand.	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle B 9: Visualisierung der Konsistenzversuche an ausgewählten Varianten der Versuchsreihe 01.03 nach dem Anmischen (links) und im Knetversuch (rechts)

G/BMG 1	Nach dem Anmischen 2	Nach dem Knetversuch 3
6,5		
7,1		
8,0		

Tabelle B 10: Visualisierung der Konsistenzversuche an ausgewählten Varianten der Versuchsreihe 01.04 nach dem Anmischen (links) und im Knetversuch (rechts)

G/BMG	Nach dem Anmischen	Nach dem Knetversuch
1	2	3
5,0		
5,6		
7,0		

Festbetonkennwerte

Tabelle B 11: Spaltzugfestigkeiten und langenbezogene Bruchlasten des Betons Nr.1 mit der Laborbezeichnung 1,9_25/75_1,2_6,0

Versuch Nr.	Bezeichnung	Probe Nr.	Verhaltnis AL/PK	Verhaltnis G/L	Alter [d]	Rohdichte [kg/dm ³]		Verdichtungsmaß [mm]		Spaltzugfestigkeit [N/mm ²]		Langenbez. Bruchlast [N/mm]	
02	Pulverkonstante Verhaltnis B/M = 25% / 75%												
Power Pozz White	WGM1,9/25/75_10	10	1,2	6,0	14	2,17	2,16	1,43	1,43	2,61	2,76	614,97	650,31
	WGM1,9/25/75_11	11	1,2	6,0	14	2,15		1,43		2,91		685,65	
	WGM1,9/25/75_12	12	1,2	6,0	14	2,18	-	1,43	-	0,99	-	233,26	-
	WGM1,9/25/75_13	13	1,2	6,0	28	2,16	2,16	1,43	1,43	3,57	3,32	840,45	780,78
	WGM1,9/25/75_14	14	1,2	6,0	28	2,16		1,43		3,06		721,12	
	WGM1,9/25/75_15	15	1,2	6,0	28	2,17		1,43		3,21		756,11	
Metaver O	WGM1,9/25/75_16	16	1,2	6,0	28	2,16	2,16	1,43	1,43	3,72	3,78	872,88	884,44
	WGM1,9/25/75_17	17	1,2	6,0	28	2,16		1,43		3,84		896,00	
	WGM1,9/25/75_18	18	1,2	6,0	28	2,17		1,43		1,74		-	

Tabelle B 12: Druckfestigkeiten und E-Moduln des Betons Nr.1 mit der Laborbezeichnung 1,9_25/75_1,2_6,0

Versuch Nr.	Bezeichnung	Probe Nr.	Verhältnis AL/PK	Verhältnis G/L	Alter [d]	Rohdichte [kg/dm³]		Verdichtungsmaß [mm]		Druckfestigkeit [N/mm²]	E-Modul [MPa]		
02	Pulverkonstante Verhältnis B/M = 25% / 75%												
Power Pozz White	WGM1,9/25/75_10	10	1,2	6,0	14	2,12	2,15	1,43	1,43	21,360	22,18	-	
	WGM1,9/25/75_11	11	1,2	6,0	14	2,16		1,43		24,430			
	WGM1,9/25/75_12	12	1,2	6,0	14	2,18		1,43		20,750			
	WGM1,9/25/75_13	13	1,2	6,0	28	2,16	2,16	1,43	1,43	29,220	28,04	-	
	WGM1,9/25/75_14	14	1,2	6,0	28	2,16		1,43		27,810		22.584,67	21.089,39
	WGM1,9/25/75_15	15	1,2	6,0	28	2,16		1,43		27,090		19.594,11	
Metaver O	WGM1,9/25/75_16	16	1,2	6,0	28	2,16	2,16	1,43	1,43	17,23	33,04	44.803,66	
	WGM1,9/25/75_17	17	1,2	6,0	28	2,16		1,43		33,04		26.715,12	26.715,12
	WGM1,9/25/75_18	18	1,2	6,0	28	2,16		1,43		15,22		44.633,17	

Beton Nr. 3

Versuchsreihen und Zusammensetzung

Tabelle B 13: Übersicht der Versuchsreihe 03.01

Versuchsreihe	Probe Nr.	Datum der Prüfung [dd.mm.yy]	Anteile (BM/MK) [%/%]	WGM [-]	Verhältnis (AL/P) [-]	Verhältnis (G/L) [-]	Einwaage [g] Gesteinskörnung (G)			Einwaage [g] Leim (L)				Einwaage Gesamt [g]	
							Sand 0/2	Kies 2/8	Gesamt	AL	P		Gesamtmenge L		
										WG	BM	MK			Gesamtmenge P
03.01	-01	20.08.2020	40/60	1,9	1,1	7,0	1200	1800	3000	224,5	81,6	122,5	204,1	428,6	3428,6
03.01	-02	20.08.2020	40/60	1,9	1,1	6,5	1200	1800	3000	241,7	87,9	131,9	219,8	461,5	3461,5
03.01	-03	20.08.2020	40/60	1,9	1,1	6,3	1200	1800	3000	249,4	90,7	136,1	226,8	476,2	3476,2
03.01	-04	20.08.2020	40/60	1,9	1,1	6,0	1200	1800	3000	261,9	95,2	142,9	238,1	500	3500

Tabelle B 14: Übersicht der Versuchsreihe 03.02

Versuchsreihe	Probe Nr.	Datum der Prüfung [dd.mm.yy]	Anteile (BM/MK) [%/%]	WGM [-]	Verhältnis (AL/P) [-]	Verhältnis (G/L) [-]	Einwaage [g] Gesteinskörnung (G)			Einwaage [g] Leim (L)				Einwaage Gesamt [g]	
							Sand 0/2	Kies 2/8	Gesamt	AL	P		Gesamtmenge L		
										WG	BM	MK			Gesamtmenge P
03.02	-01	20.08.2020	40/60	1,9	0,9	7,0	1200	1800	3000	203	90,2	135,4	225,6	428,6	3428,6
03.02	-02	20.08.2020	40/60	1,9	0,9	6,5	1200	1800	3000	218,6	97,2	145,7	242,9	461,5	3461,5
03.02	-03	20.08.2020	40/60	1,9	0,9	6,0	1200	1800	3000	236,8	105,3	157,9	263,2	500	3500
03.02	-04	20.08.2020	40/60	1,9	0,9	5,8	1200	1800	3000	245	108,9	163,3	272,2	517,2	3517,2
03.02	-04	20.08.2020	40/60	1,9	0,9	5,5	1200	1800	3000	258,4	114,8	172,3	287,1	545,5	3545,5
03.02	-05	20.08.2020	40/60	1,9	0,9	5,2	1200	1800	3000	273,3	121,4	182,2	303,6	576,9	3576,9
03.02	-06	20.08.2020	40/60	1,9	0,9	5,0	1200	1800	3000	284,2	126,3	189,5	315,8	600	3600
03.02	-07	20.08.2020	40/60	1,9	0,9	4,8	1200	1800	3000	296,1	131,6	197,3	328,9	625	3625
03.02	-08	20.08.2020	40/60	1,9	0,9	4,6	1200	1800	3000	308,9	137,3	206	343,3	652,2	3652,2
03.02	-09	20.08.2020	40/60	1,9	0,9	4,4	1200	1800	3000	323	143,5	215,3	358,8	681,8	3681,8
03.02	-10	20.08.2020	40/60	1,9	0,9	4,2	1200	1800	3000	338,4	150,4	225,5	375,9	714,3	3714,3
03.02	-11	20.08.2020	40/60	1,9	0,9	4,0	1200	1800	3000	355,3	157,9	236,8	394,7	750	3750
03.02	-12	20.08.2020	40/60	1,9	0,9	3,8	1200	1800	3000	374	166,2	249,3	415,5	789,5	3789,5

Tabelle B 15: Übersicht der Versuchsreihe 03.03

Versuchsreihe	Probe Nr.	Datum der Prüfung [dd.mm.yy]	Anteile (BM/MK) [%/%]	WGM [-]	Verhältnis (AL/P) [-]	Verhältnis (G/L) [-]	Einwaage [g] Gesteinskörnung (G)			Einwaage [g] Leim (L)					Einwaage Gesamt [g]
							Sand 0/2	Kies 2/8	Gesamt	AL		P		Gesamtmenge L	
										WG	BM	MK	Gesamtmenge P		
03.03	-01	20.08.2020	40/60	1,9	1,0	7,0	1200	1800	3000	214,3	85,7	128,6	214,3	428,6	3428,6
03.03	-02	20.08.2020	40/60	1,9	1,0	6,8	1200	1800	3000	220,6	88,2	132,4	220,6	441,2	3441,2
03.03	-03	20.08.2020	40/60	1,9	1,0	6,6	1200	1800	3000	227,3	90,9	136,3	227,2	454,5	3454,5
03.03	-04	20.08.2020	40/60	1,9	1,0	6,4	1200	1800	3000	234,4	93,8	140,6	234,4	468,8	3468,8
03.03	-05	20.08.2020	40/60	1,9	1,0	6,2	1200	1800	3000	242	96,8	145,1	241,9	483,9	3483,9
03.03	-06	20.08.2020	40/60	1,9	1,0	6,0	1200	1800	3000	250	100	150	250	500	3500
03.03	-07	20.08.2020	40/60	1,9	1,0	5,5	1200	1800	3000	272,8	109,1	163,6	272,7	545,5	3545,5
03.03	-08	20.08.2020	40/60	1,9	1,0	5,0	1200	1800	3000	300	120	180	300	600	3600

Konsistenzversuche

Tabelle B 16: Übersicht über die Konsistenzversuche Versuchsreihe 03.01

03 Verhältnis Pulverkonstante BM/MK = 40% / 60%							Standfestigkeit direkt nach dem Ausschalen	Scherfestigkeit [N/mm ²]	Reibungswinkel [°]	Kohäsion [N/mm ²]	Gründstandfestigkeit [N/mm ²]	Frischbetonrohddichte [kg/dm ³]	Dynamisches Verdichtungsmaß [mm]	
Versuch Nr.	Probe Nr.	Bezeichnung	Verhältnis AL/P	Verhältnis G/L	Alter [d]	Konsistenz								
03.01		Verhältnis AL/P = 1,1												
03.01	-01	WGM1,9_40/60_1,1_01	1,1	7,0	0	Es bilden sich kleine, bis zu 2 cm große Frischbetonbatzen. Die Gesteinskörnung ist noch nicht vollständig gebunden. Der Frischbeton hält nach dem Zusammenkneten in der Hand nicht zusammen.	-	-	-	-	-	-	-	
03.01	-02	WGM1,9_40/60_1,1_02	1,1	6,5	0	Die Batzen werden weniger. Die Konsistenz ist sehr sandig und feucht. Der Frischbeton hält nicht zusammen und die Gesteinskörnung ist noch nicht komplett gebunden.	-	-	-	-	-	-	-	
03.01	-03	WGM1,9_40/60_1,1_03	1,1	6,3	0	Es sind nur noch vereinzelt größere Batzen vorhanden. Die Konsistenz ist sehr sandig und feucht. Der Frischbeton ist leicht zusammenhängend beim Zusammenkneten.	Die Probe bleibt nicht stehen.	-	-	-	-	-	-	
03.01	-04	WGM1,9_40/60_1,1_04	1,1	6,0	0	Es sind keine größeren Frischbetonbatzen mehr vorhanden. Der Beton fühlt sich nasser an und hält nicht mehr zusammen.	-	-	-	-	-	-	-	

Tabelle B 17: Visualisierung der Konsistenzversuche an ausgewählten Varianten der Versuchsreihe 03.01 nach dem Anmischen (links) und im Knetversuch (rechts)

G/BMG	Nach dem Anmischen	Nach dem Knetversuch
1	2	3
6,3		
6,5		
7,0		

Tabelle B 18: Übersicht über die Konsistenzversuche Versuchsreihe 03.02

03 Verhältnis Pulverkonstante BM/MK = 40% / 60%													
Versuch Nr.	Probe Nr.	Bezeichnung	Verhältnis AL/P	Verhältnis G/L	Alter [d]	Konsistenz	Standfestigkeit direkt nach dem Ausschalen	Scherfestigkeit [N/mm ²]	Reibungswinkel [°]	Kohäsion [N/mm ²]	Grünstandfestigkeit [N/mm ²]	Frischbetonrohichte [kg/dm ³]	Dynamisches Verdichtungsmaß [mm]
03.02 Verhältnis AL/P = 0,9													
03.02	-01	WGM1,9_40/60_0,9_01	0,9	7,0	0	Es bilden sich kleine, bis zu 2,5 cm große Frischbetonbatzen. Die Gesteinskörnung ist noch nicht vollständig gebunden. Der Frischbeton hält nach dem Zusammenkneten in der Hand nicht zusammen.	-	-	-	-	-	-	-
03.02	-02	WGM1,9_40/60_0,9_02	0,9	6,5	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 7,0. Der Frischbeton hält aber etwas besser zusammen beim Zusammenkneten.	-	-	-	-	-	-	-
03.02	-03	WGM1,9_40/60_0,9_03	0,9	6,0	0	Die Frischbetonbatzen werden kleiner. Die Gesteinskörnung ist größtenteils gebunden. Der Beton hält etwas besser zusammen und ist rieselfähig	Die Probe bleibt mind. 10min stehen	0,23286	42,61	0,012	0,055	2,16	1,43
03.02	-04	WGM1,9_40/60_0,9_04	0,9	5,8	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 6,0. Der Beton ist aber weniger rieselfähig und hält beim Zusammenkneten gut zusammen.	Die Probe bleibt mind. 10min stehen	0,23048	42,18	0,014	0,063	-	-
03.02	-05	WGM1,9_40/60_0,9_05	0,9	5,5	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 5,8.	Die Probe bleibt mind. 10min stehen	0,23333	42,61	0,012	0,055	-	-
03.02	-06	WGM1,9_40/60_0,9_06	0,9	5,2	0	Die Klumpen werden weniger. Die Gesteinskörnung ist gebunden. Hält gut zusammen aufgrund der Klebrigkeit. Der Beton ist aber nicht gut rieselfähig	Die Probe bleibt mind. 10min stehen	-	-	-	-	-	-
03.02	-07	WGM1,9_40/60_0,9_07	0,9	5,0	0	Die Gesteinskörnung ist gebunden. Der Frischbeton hält gut zusammen aufgrund der Klebrigkeit. Der Beton ist aber nicht gut rieselfähig.	-	-	-	-	-	-	-
03.02	-08	WGM1,9_40/60_0,9_08	0,9	4,8	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 5,0.	-	-	-	-	-	-	-
03.02	-09	WGM1,9_40/60_0,9_09	0,9	4,6	0	Die Frischbetonbatzen werden weniger und kleiner. Der Beton hält sehr gut zusammen, ist aber nicht gut rieselfähig.	-	-	-	-	-	-	-
03.02	-10	WGM1,9_40/60_0,9_10	0,9	4,4	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 4,6.	-	-	-	-	-	-	-
03.02	-11	WGM1,9_40/60_0,9_11	0,9	4,2	0	Der Frischbeton wird immer klebriger und schwerer in der Hand. Er ist sehr schlecht rieselfähig.	-	-	-	-	-	-	-
03.02	-12	WGM1,9_40/60_0,9_12	0,9	4,0	0	Der Frischbeton wird immer klebriger und schwerer in der Hand. Er ist sehr schlecht rieselfähig.	-	-	-	-	-	-	-
03.02	-13	WGM1,9_40/60_0,9_13	0,9	3,8	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 4,0.	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle B 19: Visualisierung der Konsistenzversuche an ausgewählten Varianten der Versuchsreihe 03.02 nach dem Anmischen (links) und im Knetversuch (rechts)

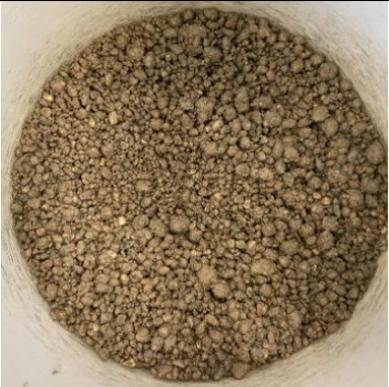
G/BMG	Nach dem Anmischen	Nach dem Knetversuch
1	2	3
5,5		
6,0		
7,0		

Tabelle B 20: Übersicht über die Konsistenzversuche Versuchsreihe 03.03

03 Verhältnis Pulverkonstante BM/MK = 40% / 60%						Konsistenz	Standfestigkeit direkt nach dem Ausschalen	Scherfestigkeit [N/mm ²]	Reibungswinkel [°]	Kohäsion [N/mm ²]	Grünstandfestigkeit [N/mm ²]	Frischbetonrohddichte [kg/dm ³]	Dynamisches Verdichtungsmaß [mm]
Versuch Nr.	Probe Nr.	Bezeichnung	Verhältnis AL/P	Verhältnis G/L	Alter [d]								
03.03 Verhältnis AL/P = 1,0													
03.03	-01	WGM1,9_40/60_1,0_01	1,0	7,0	0	Es bilden sich kleine, bis zu 2 cm große Frischbetonbatzen. Die Gesteinskörnung ist noch nicht vollständig gebunden. Der Frischbeton hält nach dem Zusammenkneten in der Hand leicht zusammen.	-	-	-	-	-	-	-
03.03	-02	WGM1,9_40/60_1,0_02	1,0	6,8	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 7,0. Es wird aber mehr Gesteinskörnung gebunden.	Die Probe bleibt nur ca. 1 Min stehen. Danach fällt sie auseinander.	-	-	-	-	-	-
03.03	-03	WGM1,9_40/60_1,0_03	1,0	6,6	0	Die Frischbetonbatzen werden weniger und der Beton fühlt sich feuchter an. Er hält gut zusammen und ist rieselfähig.	Die Probe bleibt mind. 10min stehen	0,23476	42,83	0,013	0,060	-	-
03.03	-04	WGM1,9_40/60_1,0_04	1,0	6,4	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 6,6.	Die Probe bleibt mind. 10min stehen	0,23524	42,71	0,017	0,078	-	-
03.03	-05	WGM1,9_40/60_1,0_05	1,0	6,2	0	Der Frischbeton fühlt sich nasser an und die Klumpen werden weniger. Der Beton hält weniger zusammen und wird schwerer	-	-	-	-	-	-	-
03.03	-06	WGM1,9_40/60_1,0_06	1,0	6,0	0	Die Proben werden feuchter und es sind kaum noch größere Frischbetonbatzen vorhanden. Der Beton hält weniger gut zusammen beim Kneten und fühlt sich schwerer an.	-	-	-	-	-	-	-
03.03	-07	WGM1,9_40/60_1,0_07	1,0	5,5	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 6,0.	-	-	-	-	-	-	-
03.03	-08	WGM1,9_40/60_1,0_08	1,0	5,0	0	Ähnliche Konsistenz wie bei 5,5. Der Frischbeton fühlt sich sehr nass an.	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle B 21: Visualisierung der Konsistenzversuche an ausgewählten Varianten der Versuchsreihe 03.03 nach dem Anmischen (links) und im Knetversuch (rechts)

G/BMG	Nach dem Anmischen	Nach dem Knetversuch
1	2	3
5,0		
6,6		
7,0		

Festbetonkennwerte

Tabelle B 22: Spaltzugfestigkeiten und langenbezogene Bruchlasten des Betons Nr.3 mit der Laborbezeichnung 1,9_40/60_0,9_6,0

Versuch Nr.	Bezeichnung	Probe Nr.	Verhaltis AL/PK	Verhaltis G/L	Alter [d]	Rohdichte [kg/dm ³]		Verdichtungsmaß [mm]		Spaltzugfestigkeit [N/mm ²]		Max. Bruchlast [N/mm]	
03	Pulverkonstante Verhaltis B/M = 40% / 60%												
	WGM1,9/40-60_03.4.04	1	0,9	6,0	28	2,16	2,16	1,43	1,43	2,77	2,95	654,98	697,54
	WGM1,9/40-60_03.4.05	2	0,9	6,0	28	2,17		1,43		2,98		712,34	
	WGM1,9/40-60_03.4.06	3	0,9	6,0	28	2,16		1,43		3,09		725,32	

Tabelle B 23: Druckfestigkeiten und E-Moduln des Betons Nr.3 mit der Laborbezeichnung 1,9_40/60_0,9_6,0

Versuch Nr.	Bezeichnung	Probe Nr.	Verhaltis AL/PK	Verhaltis G/L	Alter [d]	Rohdichte [kg/dm ³]		Verdichtungsmaß [mm]		Druckfestigkeit [N/mm ²]		E-Modul [kN/mm ²]	
03	Pulverkonstante Verhaltis B/M = 40% / 60%												
	WGM1,9/40-60_03.5.04	1	0,9	6,0	28	2,16	2,16	1,43	1,43	27,94	28,51	23.849,03	24.154,83
	WGM1,9/40-60_03.5.05	2	0,9	6,0	28	2,16		1,43		29,29		24.119,82	
	WGM1,9/40-60_03.5.06	3	0,9	6,0	28	2,17		1,43		28,29		24.495,64	

Anhang C
Ergebnisse Steinprototypen

Festbetonkennwerte nach 28d Trockenlagerung

Tabelle C 1: Trockenrohdichten der Prüfkörper aus den Prototypensteinen nach 28d

Trockenrohdichte 28d		
Prüfkörper	Beton Nr.1	Beton Nr.3
[-]	[kg/dm³]	[kg/dm³]
1	2	3
1.1	2,22	2,11
1.2	2,18	2,10
1.3	2,18	2,15
1.4	2,21	2,09
1.5	2,17	2,11
1.6	2,14	2,14
1.7	2,20	2,08
1.8	2,16	2,11
1.9	2,13	2,11
2.1	2,17	2,12
2.2	2,15	2,09
2.3	2,16	2,14
2.4	2,14	2,09
2.5	2,13	2,07
2.6	2,17	2,09
2.7	2,14	2,10
2.8	2,15	2,12
2.9	2,15	2,11
3.1	2,19	2,17
3.2	2,19	2,11
3.3	2,18	2,21
3.4	2,16	2,15
3.5	2,17	2,10
3.6	2,17	2,09
3.7	2,08	2,13
3.8	2,15	2,08
3.9	2,15	2,07
Mittelwert	2,16	2,11
Stabw.	0,03	0,03

Tabelle C 2: Wassergehalte ausgewählter Prüfkörper nach 28d

Wassergehalt lufttrocken 28d		
Prüfkörper	Beton Nr.1	Beton Nr.3
[-]	[M.-%]	[M.-%]
1	2	3
1.5	2,07	1,81
2.5	1,98	1,86
3.5	2,09	1,87
Mittelwert	2,05	1,85
Stabw.	0,06	0,03

Tabelle C 3: Druckfestigkeiten ausgewählter Prüfkörper nach 28d

Druckfestigkeit lufttrocken 28d		
Prüfkörper	Beton Nr.1	Beton Nr.3
[-]	[N/mm²]	[N/mm²]
1	2	3
1.1	39,99	16,72
1.2	31,02	23,37
1.3	22,88	23,47
2.1	25,01	22,72
2.2	25,93	25,45
2.3	28,85	24,35
Mittelwert	28,95	22,68
Stabw.	6,13	3,07

Tabelle C 4: Spaltzugfestigkeiten ausgewählter Prüfkörper nach 28d

Spaltzugfestigkeit lufttrocken 28d		
Prüfkörper	Beton Nr.1	Beton Nr.3
[-]	[N/mm²]	[N/mm²]
1	2	3
1.3	3,97	5,12
1.4	5,17	3,74
2.3	6,11	4,20
2.4	3,75	4,37
3.3	4,75	4,28
3.4	5,54	6,23
Mittelwert	4,88	4,66
Stabw.	0,91	0,89

Festbetonkennwerte nach 28d Trockenlagerung und 14 Tage Wasserlagerung

Tabelle C 5: Wassergehalte ausgewählter Prüfkörper nach 42d

Wassergehalt wassergesättigt 42d		
Prüfkörper	Beton Nr.1	Beton Nr.3
[-]	[M.-%]	[M.-%]
1	2	3
1.8	4,69	5,02
2.8	4,79	4,78
3.8	4,72	4,91
Mittelwert	4,73	4,90
Stabw.	0,05	0,12

Tabelle C 6: Druckfestigkeiten ausgewählter Prüfkörper nach 42d

Druckfestigkeit wassergesättigt 42d		
Prüfkörper	Beton Nr.1	Beton Nr.3
[-]	[N/mm²]	[N/mm²]
1	2	3
1.6	27,61	27,50
2.6	28,52	29,70
3.6	35,03	27,61
Mittelwert	30,39	28,27
Stabw.	4,05	1,24

Tabelle C 7: Spaltzugfestigkeiten ausgewählter Prüfkörper nach 42d

Spaltzugfestigkeit wassergesättigt 42d		
Prüfkörper	Beton Nr.1	Beton Nr.3
[-]	[N/mm²]	[N/mm²]
1	2	3
1.7	6,32	4,59
2.7	5,41	4,38
3.7	6,35	6,24
Mittelwert	6,03	5,07
Stabw.	0,53	1,01

Anhang D

Berechnungen zum CO₂ - Äquivalent

Tabelle D 1: Berechnungen zu CO₂-Emissionen für einen Kubikmeter des Referenzbetons

Referenzbeton			
Komponente	Einwaage	CO ₂ Emission pro Tonne Komponente	CO ₂ Emission pro m ³ Frischbeton
[-]	[kg/m ³] oder [Vol.-%/m ³]	[kg/t]	[kg/m ³]
1	2	3	4
Wasser	122	0,4	0,0
Zement	260	781	203,1
Kalksteinmehl	45	6,2	0,3
Luft	6,5	-	-
Zusatzmittel	-	-	-
Gesteinskörnung 0/8	1874	1,8	3,4
Frischbetonrohddichte	2301	CO₂ Emission gesamt	207

Tabelle D 2: Berechnungen zu CO₂-Emissionen für einen Kubikmeter des Betons Nr. 1

Beton Nr.1			
Komponente	Einwaage	CO ₂ Emission pro Tonne Komponente	CO ₂ Emission pro m ³ Frischbeton
[-]	[kg/m ³] oder [Vol.-%/m ³]	[kg/t]	[kg/m ³]
1	2	3	4
Wasserglaslösung	161	420	67,6
Betonbrechsand 0/0,5	37	0,5	0,0
Metakaolin	111	423	46,8
Luft	12	-	-
Zusatzmittel	-	-	-
Gesteinskörnung 0/8	1851	1,8	3,3
Frischbetonrohddichte	2160	CO₂ Emission gesamt	118

Tabelle D 3: Berechnungen zu CO₂-Emissionen für einen Kubikmeter des Betons Nr. 3

Beton Nr.3			
Komponente	Einwaage	CO₂ Emission pro Tonne Komponente	CO₂ Emission pro m³ Frischbeton
[-]	[kg/m³] oder [Vol.-%/m³]	[kg/t]	[kg/m³]
1	2	3	4
Wasserglaslösung	147	420	61,7
Betonbrechsand 0/0,5	65	0,5	0,0
Metakaolin	98	423	41,5
Luft	13	-	-
Zusatzmittel	-	-	-
Gesteinskörnung 0/8	1860	1,8	3,3
Frischbetonrohddichte	2170	CO₂ Emission gesamt	106

Anhang E

Produktdatenblätter und chemisch-physikalische Analysen

Zement

Environmental Product Declaration

according to ISO 14025 and EN 15804



This declaration is for:
Portland cement CEM I 52,5 R

Provided by:
**Portlandzementwerk Wittekind Hugo
Miebach Söhne KG**

Portlandzementwerk

Wittekind

Hugo Miebach Söhne KG



program operator
Stichting MRPI®
publisher
Stichting MRPI®
www.mrpi.nl

MRPI® registration
1.1.00111.2020
EPD registration
00001152
date of first issue
28-02-2020
date of this issue
28-02-2020
expiry date
28-02-2025





PROGRAM OPERATOR
 Stichting MRPI®
 Kingsfordweg 151
 1043GR
 Amsterdam

COMPANY INFORMATION
 Portlandzementwerk

Wittekind

Hugo Miebach Söhne KG
 Portlandzementwerk Wittekind Hugo Miebach Söhne KG
 Hüchtchenweg 1
 59597
 Erwitte
 0049 2943 / 893-0
 info@wittekindzement.de
 www.wittekindzement.de

SCOPE OF DECLARATION

This MRPI®-EPD certificate is verified by **Ulbert Hofstra, SGS Intron**.
 The LCA study has been done by **Jochen Reiners, VDZ gGmbH**.
 The certificate is based on an LCA-dossier according to ISO14025 and NEN-EN15804+A1. It is verified according to the 'EPD-MRPI® verification protocol May 2017.v3.1'. EPDs of construction products may not be comparable if they do not comply with NEN-EN15804+A1. Declaration of SVHC that are listed on the 'Candidate List of Substances of Very High Concern for authorisation' when content exceeds the limits for registration with ECHA.

VISUAL PRODUCT



PRODUCT
 Portland cement CEM I 52,5 R

MRPI® REGISTRATION
 1.1.00111.2020

EPD REGISTRATION
 00001152

DATE OF ISSUE
 28-02-2020

EXPIRY DATE
 28-02-2025

DECLARED UNIT/FUNCTIONAL UNIT
 1 ton

DESCRIPTION OF PRODUCT
 Portland cement

MORE INFORMATION
 www.wittekindzement.de

DEMONSTRATION OF VERIFICATION	
CEN standard EN15804 serves as the core PCR[a]	
Independent verification of the declaration and data, according to EN ISO 14025:2010: internal: external: X	
(where appropriate[b]) Third party verifier:  Ulbert Hofstra, SGS Intron B.V.	
[a] Product Category Rules [b] Optional for B-to-B communication, mandatory for B-to-C communication (see EN ISO 14025:2010, 0.4).	

DETAILED PRODUCT DESCRIPTION

The main constituent of CEM I 52,5 R is Portland cement clinker. It is produced from limestone which is crushed and sintered in a rotary kiln at a temperature of 1450°C. Portland cement is produced by intergrinding Portland cement clinker and gypsum from flue gas desulfurisation (setting time regulator). Also, a small amount of fly ash, production dust from the clinker production process and low amounts of additives (chromate reduction agent and grinding aid) are added.

COMPONENT (> 1%)	[kg / %]
Portland cement clinker	88%
Limestone	4%
Calicum sulfate	6%
Minor additional constituents	2%

(*) > 1% of total mass

SCOPE AND TYPE

The cement in this EPD is produced at the Wittekind cement plant in Erwitte, Germany. Cement is a hydraulic binder, mainly used for concrete, mortar and cement screed. Since cement is an intermediate product, only the production phase is included in the LCA. The LCA was developed using the "Bepalingsmethode Milieuprestatie Gebouwen en GWW werken" (January 2019), Ecoinvent 3.4 for background processes and the GaBi Software (version 9.1). The environmental indicators have been calculated with the characterisation factors "SBK Bepalingsmethode, version 25 May 2018".

PRODUCT STAGE	CONSTRUCTION				USE STAGE							END OF LIFE			BENEFITS AND	
	PROCESS											STAGE			LOADS BEYOND THE	
	STAGE														SYSTEM BOUNDARIES	
Raw material supply	Transport	Manufacturing	Transport gate to site	Assembly	Use	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	De-construction demolition	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse-Recovery-Recycling-potential
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
x	x	x	MNA	MNA	MNA	MNA	MNA	MNA	MNA	MNA	MNA	MNA	MNA	MNA	MNA	MNA

X = Module assessed

MNA = Module not assessed

REPRESENTATIVENESS

Not applicable, in this study a specific product is considered produced at a specific production site.

ENVIRONMENTAL IMPACT per functional unit or declared unit

	UNIT	A1	A2	A3	A1-A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
ADPE	kg Sb-eq.	3.71 E -5	9.14 E -6	4.03 E -7	4.68 E -5	INA													
ADPF	MJ	3.49 E +3	4.86 E +1	1.62 E +1	3.55 E +3	INA													
GWP	kg CO2-eq.	1.19 E +2	3.39 E +0	7.70 E +2	8.93 E +2	INA													
ODP	kg CFC11-eq.	6.39 E -6	5.90 E -7	2.18 E -7	7.20 E -6	INA													
POCP	kg ethene-eq.	2.13 E -2	1.74 E -3	2.74 E -1	2.97 E -1	INA													
AP	kg SO2-eq.	3.70 E -1	1.42 E -2	3.69 E -1	7.53 E -1	INA													
EP	kg (PO4)3-eq.	1.92 E -1	2.56 E -3	7.80 E -2	2.73 E -1	INA													
Toxicity indicators (Dutch market)																			
HTP	kg DCB-eq.	1.10 E +1	1.29 E +0	1.18 E +1	2.41 E +1	INA													
FAETP	kg DCB-eq.	6.36 E -1	3.67 E -2	2.26 E -2	6.95 E -1	INA													
MAETP	kg DCB-eq.	2.24 E +3	1.35 E +2	1.03 E +2	2.48 E +3	INA													
TETP	kg DCB-eq.	8.94 E -2	4.40 E -3	1.05 E +0	1.14 E +0	INA													
Environmental Cost Indicator (Dutch market)																			
ECI	Euro	1.50 E +1	3.73 E -1	3.81 E +1	5.35 E +1	INA													

INA = Indicator Not Assessed
 ADPE = Abiotic Depletion Potential for non-fossil resources
 ADPF = Abiotic Depletion Potential for fossil resources
 GWP = Global Warming Potential
 ODP = Depletion potential of the stratospheric ozone layer
 POCP = Formation potential of tropospheric ozone photochemical oxidants
 AP = Acidification Potential of land and water
 EP = Eutrophication Potential

HTP = Human Toxicity Potential
 FAETP = Fresh water aquatic ecotoxicity potential
 MAETP = Marine aquatic ecotoxicity potential
 TETP = Terrestrial ecotoxicity potential
 ECI = Environmental Cost Indicator

RESOURCE USE per functional unit or declared unit

	UNIT	A1	A2	A3	A1-A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
PERE	MJ	1.63 E +2	6.67 E -1	9.53 E -2	1.64 E +2	INA													
PERM	MJ	0.00	0.00	0.00	0.00	INA													
PERT	MJ	1.63 E +2	6.67 E -1	9.53 E -2	1.64 E +2	INA													
PENRE	MJ	3.29 E +3	5.33 E +1	1.84 E +1	3.36 E +3	INA													
PENRM	MJ	0.00	0.00	0.00	0.00	INA													
PENRT	MJ	3.29 E +3	5.33 E +1	1.84 E +1	3.36 E +3	INA													
SM	kg	0.00	0.00	0.00	0.00	INA													
RSF	MJ	5.31 E +2	0.00	0.00	5.31 E +2	INA													
NRSF	MJ	1.24 E +3	0.00	0.00	1.24 E +3	INA													
FW	m3	1.99 E +0	9.50 E -3	1.05 E -1	2.11 E +0	INA													

INA = Indicator Not Assessed

PERE = Use of renewable energy excluding renewable primary energy resources

PERM = Use of renewable energy resources used as raw materials

PENRE = Use of non-renewable primary energy resources excluding non-renewable energy resources used as raw materials

PENRM = Use of non-renewable primary energy resources used as raw materials

SM = Use of secondary materials

NRSF = Use of non renewable secondary fuels

PERT = Total use of renewable primary energy resources

PENRT = Total use of non-renewable primary energy resources

RSF = Use of renewable secondary fuels

FW = Use of net fresh water

OUTPUT FLOWS AND WASTE CATEGORIES per functional unit or declared unit

	UNIT	A1	A2	A3	A1-A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
HWD	kg	3.33 E -2	3.66 E -4	1.77 E -3	3.55 E -2	INA													
NHWD	kg	1.45 E +1	3.04 E +0	9.23 E -1	1.85 E +1	INA													
RWD	kg	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA
CRU	kg	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA
MFR	kg	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA
MER	kg	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA
EEE	MJ	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA
ETE	MJ	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA	INA

INA = Indicator Not Assessed

HWD = Hazardous Waste Disposed

RWD = Radioactive Waste Disposed

MFR = Materials for recycling

EEE = Exported Electrical Energy

NHWD = Non Hazardous Waste Disposed

CRU = Components for reuse

MER = Materials for energy recovery

ETE = Exported Thermal Energy

CALCULATION RULES

No materials or processes have been excluded from the study. The LCA is based on data for the year 2018. The emissions from the incineration of waste have been allocated to the cement production. Biogenic CO₂ emissions are not included. Infrastructure processes in Ecoinvent processes have been included. Longterm emissions in Ecoinvent processes have been excluded from the LCA calculations.

SCENARIOS AND ADDITIONAL TECHNICAL INFORMATION

Module A1:

This module includes the supply of raw materials and fuels.

Module A2:

This module includes the transport of raw materials and fuels to the cement plant.

Module A3:

This module includes the grinding of the raw materials, the production of the clinker and the processing and blending of the cement constituents.

DECLARATION OF SVHC

No substances that are listed in the latest "Candidate List of Substances of Very High Concern for authorisation" are included in the product that exceeds the limit for registration.

REFERENCES

- EN 15804:2012+A1:2013 Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products, of 11/2013.
- ISO 14040/14044 on Life Cycle Assessments
- CEN/TC 51 PCR for cement en building lime, 2015

REMARKS

The abiotic depletion potential (fuel), expressed in kg Sb. eq., of the production of 1 ton of this cement (A1-A3) is: 1.91E+00

Abbildung E 1: Umweltproduktdeklaration für den Zement des R

Prüfzeugnis				
Zementart: Portlandzement CEM I 52,5 N Sondereigenschaft: CP2 NF				
EN 197 / EN 196				
Ergebnisse der internen Überwachungsprüfungen: Jan 2021 bis Mrz 2021				
Chemische Eigenschaften:			Mittelwerte	Normanforderungen
C ₂ A	%		7,3	
SO ₃	%		3,0	≤ 4,0
Na ₂ O-Äquiv.:	%		0,57	
Cl:	%		0,04	≤ 0,10
Glühverlust:	%		1,8	≤ 5,0
unlöslicher Rückstand:	%		1,3	≤ 5,0
Mechanische und physikalische Eigenschaften:				
Spez. Oberfläche:	cm ² /g		3919	
Raumbeständigkeit:	mm		0,2	≤ 10
Wasseranspruch:	%		28,7	
Erstarrungsbeginn:	Min.		190	≥ 45
Erstarrungsende:	Min.		251	
Druckfestigkeiten:				
1 d	MPa		20,4	
2 d	MPa		36,5	≥ 20,0
7 d	MPa			
28 d	MPa		69,3	≥ 52,5
<p>Die oben aufgeführten Prüfergebnisse sind Mittelwerte aus unseren internen Überwachungsprüfungen. Sie stellen keine Rechtsverbindlichkeit dar. Bitte beachten Sie die Hinweise auf unseren Sicherheitsdatenblättern. Es gelten unsere allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen.</p> <p>Portlandzementwerk Wittekind Hüchtchenweg 1 D- 59597 Erwitte</p> <p>ppa. Dr. Werner Cordes Werksleitung: Qualitätswesen, Labor, Entwicklung</p>				

Abbildung E 2: Prüfzeugnis des Zements für den Referenzbeton

**Leistungserklärung
Nr. 0840-CPR-4210-120001-18**

1. Eindeutiger Kenncode des Produkttyps: **CEM I 52,5 N (1)**
2. Verwendungszweck(e): **Herstellung von Beton, Mörtel, Einpressmörtel etc.**
3. Hersteller: **Portlandzementwerk Wittekind Hugo Miebach Söhne KG
Hüchtchenweg 1, 59597 Erwitte**
4. System(e) zur Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit: **1+**
5. Harmonisierte Norm: **EN 197-1:2011**
6. Notifizierte Stelle(n): **Forschungsinstitut der Zementindustrie GmbH, NB 0840**
7. Erklärte Leistung(en):

Wesentliche Merkmale	Leistung
Normalzemente (Unterfamilien) Bestandteile und Zusammensetzung	CEM I
Druckfestigkeit (Anfangs- und Normfestigkeit)	52,5 N
Erstarrungsbeginn	bestanden
Unlöslicher Rückstand	bestanden
Glühverlust	bestanden
Raubeständigkeit	
- Dehnungsmaß	bestanden
- Sulfatgehalt	bestanden
Chloridgehalt	bestanden

Die Leistung des vorstehenden Produkts entspricht der erklärten Leistung. Für die Erstellung der Leistungserklärung im Einklang mit der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 ist allein der oben genannte Hersteller verantwortlich.

Unterzeichnet für den Hersteller und im Namen des Herstellers von:

Name: Dr. Werner Cordes, Werksleitung: Qualitätswesen, Labor, Entwicklung

Ort: Erwitte Datum: 01.03.2018

Unterschrift: 

Abbildung E 3: Leistungserklärung des Herstellers

Betonbrechsand

Tabelle E 1: Kornrohndichte des Betonbrechsandes

FACHHOCHSCHULE MÜNSTER Labor für Geotechnik Corrensstraße 25 48149 Münster				Bericht:	
				Anlage:	
<u>Bestimmung der Korndichte mittels Pyknometer in Anlehnung an DIN EN ISO 17892-3</u>					
Auftraggeber: J. Volke		Probenbezeichnung: Big-Bag 0-4 VI		Materialart: Betonmehl	
Vorgehensweise: Koch- u. Unterdruckbehandlung zur Schaumreduzierung.		Bemerkung: Etwas größere Unsicherheit wg. starker Neigung zum Schäumen.		Bearbeiter / Datum: St. / 02-19	
Bestimmung des Pyknometervolumens					
Pyknometer-Nummer		K2	K4		
Masse des leeren Pyknometers	g	262,26	259,80		
Masse des mit Wasser gefüllten Pyknometers	g	579,10	580,97		
Masse des Wassers	g	316,84	321,17		
Temperatur des Wassers	°C	21,8	21,6		
Dichte des Wassers	g/cm³	0,99781	0,99786		
Volumen des Pyknometers	cm³	317,54	321,86		
Bestimmung der Korndichte					
Masse des Pyknometers inkl. Probe	g	412,26	409,80		
Masse des Pyknometers inkl. Probe und Wasser	g	673,40	675,33		
Masse des Wassers	g	261,14	265,53		
Temperatur des Wassers	°C	21,8	21,8		
Dichte des Wassers	g/cm³	0,99781	0,99781		
Volumen des Wassers	cm³	261,71	266,11		
Volumen des Pyknometers	cm³	317,54	321,86		
Volumen der Probe	cm³	55,82	55,75		
Trockenmasse der Probe	g	150,00	150,00		
Korndichte der Probe	g/cm³	2,69	2,69		

Tabelle E 2: Bestimmung des Calciumgehaltes im Betonbrechsandes

FH MÜNSTER Labor für Geotechnik Corrensstraße 25 48149 Münster		Bericht:		
		Anlage:		
<u>Bestimmung des Kalkgehalts nach DIN 18129</u>				
Vorgang:	Versuche mit Betonmehl	Eingangs-Datum:		
durchgeführt:	St. / 11-'20	Bemerkung:	Orientierungsversuche	
Bezeichnung		Ausgangs- material	Fraktion < 125 µm	Fraktion < 63 µm
Zeitpunkt der Ablesung	min	20	15	15
Luftdruck	hPa	1010	1011	1002
Temperatur	°C	22,2	22,2	22,0
Einwaage	g	1,044	0,999	1,029
CO ₂ -Volumen (Ablesung)	cm ³	30,4	41,5	47,2
CO ₂ -Vol. im Normzustand	cm ³	27,9	38,1	43,0
Calcitgehalt, berechnet als CaCO₃	%	12,0	17,2	18,8
<p>Die Masse des vorhandenen Karbonatanteils m_{Ca} ergibt sich aus der Gleichung</p> $m_{Ca} = V_0 \cdot \rho_a \cdot M$ <p>Dabei ist</p> <p>V_0 das Volumen des CO₂-Gases bei $p_n = 1\,000$ hPa und bei $T_n = 0$ °C (Normzustand)</p> $V_0 = \frac{p_{abs} \cdot V_G}{p_n \cdot (273 + T) \cdot \beta}$ in cm ³ <p>Dabei ist</p> <p>p_{abs} der absolute Luftdruck an der Versuchsstelle, in hPa;</p> <p>V_G das abgelesene Gasvolumen, in cm³;</p> <p>T die Temperatur des Versuchs, in °C;</p> <p>β der Ausdehnungskoeffizient für CO₂, in K⁻¹ mit $\beta = \frac{1}{268,4} \text{ K}^{-1}$;</p> <p>$\rho_a$ die Dichte des CO₂-Gases bei $p_n = 1\,000$ hPa und bei $T_n = 0$ °C (Normzustand) $\rho_a = 0,001\,977$ g/cm³;</p> <p>M die Verhältniszahl der molaren Massen von CaCO₃ und CO₂ $M = 2,274$.</p>				
(Quelle: DIN 18129)				

Metakaoline



Product information

Metaver® O

Metakaolin -
pozzolanic hardening admixture for hydraulic building materials

Description

Metaver® O is produced by calcination of concentrated kaolin and is a mostly amorphous aluminium silicate reacting with Portlandite (calcium hydroxide) to build cementitious CSH-phases.

Chemical composition (M.-%, approx.)

SiO ₂	53 - 54
Al ₂ O ₃	41 - 44
Fe ₂ O ₃	< 0,5
K ₂ O	< 1,0

Physical characteristics (approx.)

<i>Appearance:</i>		
Colour	whitish beige	
Specific density	2,6 g/cm ³	
Bulk density	380 - 520 kg/m ³	
Particle size distribution	d ₅₀	3,2 µm
	d ₉₀	15 µm

Function

Portland cement develops ca. 25 % calcium hydroxide (free lime) in its hydration. This alkaline by-product is very soluble and is primarily attacked and dissolved in the presence of acids or sulphates.

Metaver® O special feature is its capacity to bind large amount of free lime in the form of stable CSH-phases. Reactivity and amount of this reaction may be controlled through chemical and construction adequate methods.

In relation to its reactivity Metaver® O can be qualified as „rapid“.



Application

Metaver® O is a pozzolanic mineral additive that may improve many performances of hydraulic cementitious mortars, concrete and analogous products.

Metaver® O is easily mixed in. It gives a soft plastic consistence with good workability in the final product. Through its particle size distribution, no big increase in water demand is

Metaver® O has shown its advantages in applications where strength, density and resistance are requested.

Metaver® O is approved for usage in concrete according to NF 18-513.

In the following applications Metaver® O has been shown to be very useful:

Plasticity	shotcrete, repair mortars, coatings
Stability	self-compacting concrete and mortars, selfleveling compounds
Strength	renders based on lime and cement
Lime binding	tile adhesive, coating of water pipes and reservoirs, shotcrete
Resistance	coatings of waste water or see water constructions
Pigmentation	better dispersion in precast or visible concrete
Efflorescence	roofing tiles, facade precast
Durability	reduced alkali silicate reaction

Dosage

5 to 15 % replacement of cement by weight.

Stability

Unlimited in dry conditions.

Storage

In protected and dry rooms.

Packaging

In bags of 25 kg, or big bags of 1000 kg.

The above information and recommendations are based upon our experience and are offered merely for advice. They do not absolve the consumer from making his own tests. Responsibility for damage arising from the use of our products cannot be derived from the recommendations given. The observance of any intellectual property rights of third parties is the responsibility of the consumer in each case.

MDS Metaver® O 2019

Newchem GmbH, Flamminggasse 79, A-2500 Baden, Austria – www.newchem.info

Abbildung E 4: Produktinformationen zum Metakaolin MetaVer

Tabelle E 3: Chemische Analyse des Metakaolins MetaVer (Quelle: mpa Leipzig)

Element Line	Net Counts	K-Ratio	ZAF	Atom %	Parameter	Gew.-%
O K	19027	---	3.240	64.23	---	---
Mg K	424	0.01	1.936	0.34	MgO	0.66
Al K	16764	0.23	1.575	9.50	Al2O3	23.22
Si K	38619	0.58	1.566	22.70	SiO2	65.38
K K	499	0.01	1.261	0.25	K2O	0.56
Ca K	2085	0.05	1.185	1.07	CaO	2.88
Ti K	626	0.02	1.241	0.37	TiO2	1.42
Fe K	1860	0.10	1.212	1.54	Fe2O3	5.89
Total				100.00		100.00



Product information

PowerPozz® white

Thermal treated pure kaolin (metakaolin)
pozzolanic hardening admixture for cementitious building materials

Description

PowerPozz® white is produced by calcination of purified kaolin and is a white, mostly amorphous aluminosilicate reacting with Portlandite (calcium hydroxide) to build cementitious CSH-phases.

PowerPozz® conforms to ASTM C-618 (Specifications for Natural and Calcined Pozzolans)

Chemical composition (M.-%, approx.)

SiO ₂	54-56	CaO	< 0,1	SO ₃	< 0,05
Al ₂ O ₃	40-42	MgO	< 0,1	P ₂ O ₅	< 0,2
Fe ₂ O ₃	< 1,4	Na ₂ O	< 0,05	LOI	< 1,0
TiO ₂	< 3,0	K ₂ O	< 0,4		

Physical characteristics

Specific density		2,6 g/cm ³
Particle size distribution	D 10	~2 µm
	D 50	~ 5 µm
	D 90	~ 25 µm
Specific surface (Blaine)		ca. 26 000 cm ² /g
Specific surface (BET)		ca. 20 m ² /g
Colour		white
Whiteness (Dr. Lange)		ca. 77
Apparent density freely settled		0,3 – 0,4 g/cm ³
	tapped	ca. 0,5 g/cm ³

Function

PowerPozz® is mostly composed of the mineral Kaolinit – a layered silicate mineral with a distance of 7,2 Å between the layers. Between the layers of SiO₂ and Al₂O₃ in proportions of 1:2 water is imbedded in the layers that can be evaporated through heat treatment by calcination. The kaolin is then activated.

Portland cement develops 25 % calcium hydroxide (free lime) in its hydration. This alkaline by-product is very soluble and is primarily attacked and dissolved in the presence of acids or sulphates.

PowerPozz® special feature is its capacity to bind large amount of free lime in the form of stable CSH-phases. Speed and amount of this reaction may be controlled through chemical and construction adequate methods



In relation to its reactivity PowerPozz™ can be qualified as „rapid“. Together with lime and water the setting will occur in about 7 hours (method Newchem).

Application

PowerPozz® is a pozzolanic mineral additive that may improve many performances of hydraulic cementitious mortars, concrete and analogous products.

PowerPozz® is easily mixed in and gives a soft plastic consistence that is easy to work (buttery effect).

PowerPozz® has shown its advantages in applications where strength, density and resistance are requested. Because of the finesse, high specific surface and reactivity it is well suited to replace silica fume.

In the following applications PowerPozz® has been shown to be very useful:

Plasticity	shotcrete, repair mortars, coatings
Stability	self-compacting mortar and concrete, self-levelling compounds
Strength	high performance concrete (HPC) or mortars (HPM)
Lime binding	tile adhesive, coating of water pipes, precast
Resistance	coatings of waste water or sea water constructions
Pigmentation	better dispersion in precast or visible concrete
Efflorescence	roofing tiles, facade precast
Durability	improved alkali silicate reaction

Dosage

5 to 15 % replacement of cement by weight.

Stability

unlimited in dry conditions.

Storage

in protected and dry rooms.

Packaging

in bags of 20 kg or in big bags of 1000 kg.

The above information and recommendations are based upon our experience and are offered merely for advice. They do not absolve the consumer from making his own tests. Responsibility for damage arising from the use of our products cannot be derived from the recommendations given. The observance of any intellectual property rights of third parties is the responsibility of the consumer in each case.

MDS PowerPozz® 2019

Newchem GmbH, Flamminggasse 79, A-2500 Baden, Austria – www.newchem.info

Abbildung E 5: Produktinformationen zum Metakaolin PowerPozz

Tabelle E 4: Chemische Analyse des Metakaolins PowerPozz (Quelle: mpa Leipzig)

Element Line	Net Counts	K-Ratio	ZAF	Atom %	Parameter	Gew.-%
O K	20661	---	2.917	63.79	---	---
Mg K	166	0.00	1.874	0.12	MgO	0.23
Al K	30967	0.41	1.535	15.56	Al ₂ O ₃	38.44
Si K	32097	0.47	1.713	18.77	SiO ₂	54.67
Ca K	286	0.01	1.184	0.13	CaO	0.36
Ti K	819	0.03	1.234	0.44	TiO ₂	1.69
Fe K	1585	0.08	1.210	1.19	Fe ₂ O ₃	4.61
Total				100.00		100.00

Wasserglas

Berechnung der flüssigen Bindemittelkomponente

Stoffeigenschaften

PQ Corporation Crystal 0079

	Gew.-%	g/kg	Mol.-Masse g/mol	mol/kg	mol/l
SiO ₂ :Na ₂ O	3,33				
Na ₂ O	8,80%	88,00	61,97	1,420041956	2,0164596
SiO ₂	29,30%	293,00	60,1	4,875207987	6,9227953
H ₂ O	61,90%	619,00	18,01	34,36979456	3,4331436
	100,00%	1000,00			
Dichte		1,39			
Molverhältnis		3,43			
Massenverhältnis		3,33			

Ätznatron 100%

Dichte	2,13 kg/l
Molgewicht	40,00 g/mol
	0,04 kg/mol
Molare Masse	25,00 mol/kg
Mol/Liter	53,25 mol/l

Mischungsberechnungen zur Wasserglasmodifizierung

Einstellen eines WGM mittels Ätznatron

Stammlösung

Wasserglas	1000,00 g		
Wasserglas	719,42 ml		
Stoffmenge Na ₂ O aus NaOH	1,42 Mol	88 g	
Stoffmenge SiO ₂	4,88 Mol	293,00 g	
H ₂ O-Anteil	34,37 Mol	619,00 g	

Zugabe von Ätznatron

NaOH 100%-Zugabemenge	92,00 g
NaOH 100%-Zugabemenge	43,19 ml
Stoffmenge Na ₂ O aus NaOH	1,15 Mol
Stoffmenge H ₂ O aus NaOH	1,15 Mol

Volumenverhältnisse

Summe (ml)	762,62
Anteil W.-glas (Vol.%)	94,34 (ca. 80)
Anteil N.-lauge (Vol.%)	<u>5,66 (ca. 20)</u>
Summe (%)	100,00

Summen

Masse	1092,00 g
Volumen	762,62 ml
Stoffmenge (Na ₂ O)	2,570 Mol
Stoffmenge (Na ₂ O)	3,370 Mol/Liter
Verhältnis (WG/Na ₂ O)	g/g

Zugabe von Wasser 0,00 g

Modifiziertes Wasserglas

SiO ₂ /Na ₂ O	1,90 (-)	bis 1,60 nicht ätzend
Σ H ₂ O-Anteil (IST)	639,71 (g) (ml)	
WGG	0,71 (-)	

Abbildung E 6: Informationen zur Herstellung der verwendeten Wasserglaslösungen