

R-ZIEMENT

vdz

Gesamtbericht (Teil II des Sachberichtes)

R-ZIEMENT (FKZ: 033R263 A-E)

Ziegelhaltige Recyclingbaustoffe als Rohstoff für ressourceneffiziente Zemente in dauerhaften Betonen



VDZ Technology gGmbH

Postfach 30 10 63
40410 Düsseldorf

Toulouser Allee 71
40476 Düsseldorf

T +49 (0)211 45 78 0
F +49 (0)211 45 78 296

info@vdz-online.de
www.vdz-online.de

Sitz: Düsseldorf
Amtsgericht Düsseldorf
HRB-Nr. 66898

Hauptgeschäftsführer VDZ e.V.:
Dr. Martin Schneider

Geschäftsführer:
Dr. Christoph Müller

Ziegelhaltige Recyclingbaustoffe als Rohstoff für ressourceneffiziente Zemente in dauerhaften Betonen

Gemeinsamer Schlussbericht zum ReMin-Verbundvorhaben R-ZIEMENT (FKZ: 033R263 A-E)

Eingehende Darstellung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

Projektlaufzeit: 01. Februar 2021 – 31. Januar 2024 (36 Monate zuzüglich 6 Monate Verlängerung)

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Teilvorhaben 1: Dauerhaftigkeit ziegelhaltiger Betone FKZ 033R263 A	VDZ Technology gGmbH (Koordination) (kurz: VDZ) Christoph Müller, Katrin Severins
Teilvorhaben 2: Ziegel als Hauptbestandteil für Zement FKZ 033R263 B	Institut für Ziegelforschung Essen e. V. (kurz: IZF) Alexander Winkel
Teilvorhaben 3: Ziegelaufbereitung und Prozessanalyse FKZ 033R263 C	Leipfinger-Bader GmbH (kurz: LB) Benjamin Walter
Teilvorhaben 4: Stoffstrommanagement für ziegelhaltige RC-Baustoffe FKZ 033R263 D	Scherer & Kohl GmbH (kurz: S+K) Natalie Gross, Stephan Kreßler
Teilvorhaben 5: Ressourceneffiziente Zementherstellung FKZ 033R263 E	Spenner GmbH & Co. KG (kurz: SP) Volker Butters, Martin Franzke, Thomas Schuster
Ausgestellt am:	21.02.2025
Berichtsumfang:	152 Seiten



Quelle: Scherer & Kohl GmbH, Natalie Gross

Inhaltsverzeichnis

1	Gesamtziel des Vorhabens R-ZiEMENT	7
2	Ressourceneffiziente Zemente in Herstellung und Anwendung – Normative, umweltanalytische und zulassungsrelevante Entwicklungen vor und während der Projektlaufzeit	7
2.1	Neue Ausgangsstoffe aus dem Bauschuttrecycling und dem Ziegelrecycling für ziegelhaltige R-Zemente	7
2.2	Rezyklierte Feinstoffe als Ausgangsstoffe für Zemente im Kontext zur EN 197-6	8
2.3	Ziegel als natürliche getemperte Puzzolane „Q“ im Kontext zur DIN EN 197-1	10
2.4	Angabe von Herstellverfahren als Bestandteil von Anwendungszulassungen	10
2.5	Umweltverträglichkeitsuntersuchungen (UVU) an RC-Materialien bzw. RC-haltigen Zementen sowie am Beton	11
2.5.1	Umweltanalytik von „R-Beton“ bis „R-ZiEMENT“	11
2.5.2	DAfStb-Richtlinie zur Verwendung von siliciumreicher Flugasche und Kesselsand	11
2.5.3	Prüfplan für Zulassungsprüfungen am Zement mit RC-Material als Hauptbestandteil	12
2.5.4	UVU am Beton	12
2.6	CLP und REACH – Status Quo zum Laufzeitende	13
	Themenschwerpunkt A: Charakterisierung der RC-Stoffströme	14
3	Stoffströme, Probenahmen und Untersuchungen in den Ziegelwerken der Leipfinger-Bader GmbH (LB)	14
3.1	Nutzbare Stoffströme	14
3.2	Probenahmen in den Ziegelwerken	15
3.3	Untersuchungen mittels Sensortechnik in Zusammenarbeit mit der HeiQ RAS AG	16
3.3.1	Auswahl geeigneter Sensortypen	16
3.3.2	Laborversuche zur Sensortechnik	17
3.3.3	Technikums- und Feldversuche zur Farberkennung unter Realbedingungen im Werk	17
3.3.4	Prozess- und Stoffstromoptimierung	18
3.4	Analytik	19
3.4.1	REM- und EDX-Analysen	19
4	Stoffströme, Probenahmen und Untersuchungen in den Recyclingwerken der Scherer & Kohl GmbH (S+K)	20
4.1	Motivation	20
4.2	Stoffströme und Ausgangsmaterialien	21
4.3	Aufbereitung von ziegelhaltigem Abbruch- und Bauschutt	21
4.3.1	Die trockene Aufbereitung von RC-Materialien	21
4.3.2	Die nasse Aufbereitung von RC-Materialien	22
4.4	Probenahmen	23
4.4.1	Ziegelhaltige Proben der ersten Kampagne	23
4.4.2	Ziegelhaltige Proben der zweiten Kampagne	25
4.5	Umweltverträglichkeitsuntersuchungen am Mauerwerksbruch	25
4.6	Auswertungen der Analysen	26
5	Von der großtechnischen Aufbereitung im Recycling- oder Ziegelwerk zur Analysenprobe in den Forschungsinstituten (LB, S+K)	27
	Themenschwerpunkt B: Ziegel als puzzolanischer Zementhauptbestandteil	29

6	Charakterisierung ziegelhaltiger RC-Baustoffe (VDZ Technology gGmbH, Institut für Ziegelforschung Essen e.V., IZF)	29
6.1	Charakterisierung der puzzolanischen Reaktivität ziegelhaltiger RC-Baustoffe mittels Hydratationswärme (VDZ)	29
6.2	Charakterisierung ziegelhaltiger RC-Baustoffe mittels Farbmessung - Bestimmung der L*a*b-Werte und Entwicklung eines Modells zur Bestimmung des Ziegelgehalts (IZF)	32
6.3	Chemische Charakterisierung ziegelhaltiger RC-Baustoffe (IZF, VDZ)	38
6.4	Vorhersage der Hydratationswärme auf Basis von Farbmessung und chemischen Parametern (IZF, VDZ)	40
6.5	Mineralogische Charakterisierung ziegelhaltiger RC-Baustoffe (IZF, VDZ)	42
6.6	Umweltverträglichkeitsuntersuchungen am Ziegelbruch (IZF, LB)	43
7	Mechanische Aufbereitungsverfahren und granulometrische Analysen im Labor (VDZ)	44
7.1	Siebanalysen an zerkleinerten Recyclingmaterialien aus Mauerwerksbruch Mab	44
7.2	Mechanische Aufbereitung der ziegelhaltigen RC-Baustoffe durch Chargenmahlung	45
7.3	Mechanische Aufbereitung durch Siebung und selektive Mahlung von Ziegelschleifstaub	46
7.4	Granulometrische Modellierung von mehlfinen Mischungen	47
8	Portlandzemente, Kalkstein und Portlandkalksteinzemente als Ausgangsstoffe für die Herstellung ziegelhaltiger Laborzemente (Spenner GmbH & Co. KG, SP)	48
8.1	Portlandzemente als Klinkerkomponente	48
8.2	Portlandkalksteinzemente als Klinker- und Kalksteinkomponenten	49
8.3	Kalkstein Spenner als weiterer Hauptbestandteil	49
9	Zusammensetzung und Herstellung ziegelhaltiger Laborzemente (VDZ)	50
9.1	Zemente mit Zusammensetzungen innerhalb und außerhalb der aktuellen Zementnormenreihe EN 197	50
9.2	Zusammensetzung der im Labor hergestellten Versuchszemente	50
10	Leistungsfähigkeit ziegelhaltiger R-Zemente - Untersuchungen der Zement- und Normmörteleigenschaften (VDZ)	52
10.1	Vorrangige Untersuchungsmethoden	52
10.2	Zemente mit bis zu 30 M.-% Ziegel-Material in Kombination mit 70 M.-% CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente	52
10.2.1	Zemente mit Ziegelbruch bzw. Schleifstaub aus den Ziegelwerken	52
10.2.2	Zemente mit Ziegelschleifstaub aus den Ziegelwerken (LB) in Kombination mit Kalkstein (SP)	54
10.3	Zemente mit bis zu 10 M.-% Ziegelschleifstaub aus den Ziegelwerken sowie ≥ 90 M.-% Portlandkalksteinzement CEM II/A-LL als Klinker- und Kalksteinkomponente	56
10.4	Zemente mit 10 M.-% bzw. 20 M.-% Ziegelschleifstaub aus den Ziegelwerken sowie Portlandkalksteinzement CEM II/A-LL als Klinker- und Kalksteinkomponente	57
10.5	Zemente mit 30 M.-% ziegelhaltigem Mauerwerksbruch aus den Recyclingwerken in Kombination mit 70 M.-% CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente	58
10.6	Zemente mit 30 M.-% gemahlenem Ziegel- bzw. Mauerwerksbruch und 70 M.-% CEM II/A-LL 42,5 N als Klinker- und Kalksteinkomponente	59

10.7	R-Zemente mit 30 M.-% gemahlenem Ziegel- bzw. Mauerwerksbruch in Kombination mit Portlandzement CEM I bzw. mit Portlandkalksteinzement CEM II/A-LL	61
10.8	Auswirkungen der Reaktivität des RC-Materials auf Zement- und Mörtel­eigenschaften	62
10.9	Auswirkungen von Packungsdichte und Wasseranspruch der Zemente auf die Eigenschaften der Normmörtel	65
10.10	Zusammenhang zwischen Porosität und Normfestigkeit	68
10.11	Poren­größen­verteilungen ziegelhaltiger R-Zementmörtel im Vergleich sowie in Vorbereitung der Betriebsversuche	69
MEILENSTEIN: Großtechnische Betriebsversuche zur Herstellung ziegelhaltiger R-Zemente		73
11	Vorbereitung großtechnischer Betriebsversuche zur Herstellung ziegelhaltiger R-Zemente im Zementwerk	73
11.1	Festlegung der Zusammensetzung der Werkzemente	73
11.1.1	Zusammensetzung der Zemente aus getrenntem Aufbereiten und anschließendem Mischen (BV1)	73
11.1.1.1	Druckfestigkeiten im Vergleich (in Vorbereitung der Betriebsversuche)	74
11.1.1.2	Poren­größen­verteilungen im Vergleich (in Vorbereitung der Betriebsversuche)	75
11.1.2	Zusammensetzung der Zemente aus gemeinsamer Mahlung der Ausgangsstoffe (BV2)	76
11.2	Festlegung der Verfahrenstechnik zur Herstellung der Werkzemente (SP)	78
11.3	Planung und Vorbereitung in den Ziegelwerken (LB) für BV1	79
11.3.1	Probenahme und Versand von Schleifstaub	79
11.3.2	Schleifstaubsiebung und Versand von klassiertem Schleifstaub	79
11.4	Planung und Vorbereitung in den Recyclingwerken (S+K) für BV2	80
11.4.1	Mauerwerksbruch: Monochargen vs. Regelbetrieb	80
11.4.2	Herstellung und Versand einer Monocharge mit gezielt eingestelltem Ziegelgehalt	80
11.5	Planung und Vorbereitung im Zementwerk (SP)	82
11.5.1	Planung BV1 - Einsatz von Ziegelschleifstaub im Zement (SP, LB)	82
11.5.2	Planung BV2 - Einsatz von RC-Feinstoffen aus Mauerwerksbruch im Zement (SP, S+K)	83
12	Durchführung großtechnischer Betriebsversuche zur Herstellung ziegelhaltiger R-Zemente im Zementwerk (SP) (Meilenstein)	84
12.1	Erster Betriebsversuch zur getrennten Aufbereitung der Ausgangsstoffe mit anschließendem Mischen (BV1)	84
12.1.1	Großtechnischer Mischversuch im Zementwerk Erwitte	84
12.1.2	Untersuchungen des ziegelhaltigen Mischzements im Werkslabor	85
12.2	Zweiter Betriebsversuch zur gemeinsamen Mahlung der Ausgangsstoffe (BV2)	85
13	Nachbereitung der Betriebsversuche und Probenmanagement (SP)	88
13.1	Werkzemente zur Betonherstellung im Labor Herkules – Vergleich zum CEM III/A-Standardbeton (Unterauftrag SP)	88
13.2	Werkzemente zur Herstellung von Herkules Transportbeton im Vergleich zum Referenzbeton mit Portlandkalksteinzement und Flugasche als Zusatzstoff (Unterauftrag SP)	89
13.3	Werkzemente in der Fertigung von Betonrohren (Erfahrungen aus dem Betonwerk Bieren) (SP)	92

14	Ziegelhaltige Laborzemente mit gesteigertem Recyclingfaktor sowie reduziertem Klinkerfaktor – Herstellung auf Grundlage der im Betriebsversuch hergestellten Werkzemente (VDZ, SP)	92
15	Betrachtung von Schad- und Störstoffen (zu Themenschwerpunkt D)	96
15.1	Ziegelwerke der Leipfinger-Bader GmbH	96
15.2	Recyclingwerke der Scherer & Kohl GmbH	97
	Themenschwerpunkt C: Leistungsfähigkeit ziegelhaltiger R-Zemente im Beton	98
16	Untersuchungen an Betonen unter Verwendung ziegelhaltiger R-Zemente (VDZ)	98
16.1	Forschungsergebnisse "von dritter Seite"	98
16.2	Erste ziegelhaltige Laborzemente CEM II/C-M (Q-LL) in der Anwendung: Frostprüfungen bei abgesenktem w/z-Wert - Erfahrungen aus dem DBU-Projekt (VDZ, SP)	98
16.3	Herstellung der Betone und Frischbetoneigenschaften im R-ZiEMENT-Projekt	99
16.4	Frostwiderstand der Betone im Würfelverfahren	100
16.5	Frost-Tausalz-Widerstand der Betone im CDF-Verfahren	104
16.6	Chlorideindringwiderstand der Betone im Migrationsschnelltest	105
16.7	Carbonatisierungswiderstand an Feinbetonen gemäß DIBt-Prüfplan	105
16.8	Umweltverträglichkeitsuntersuchungen am Beton	107
	Themenschwerpunkt D: Ökobilanzielle und sozioökonomische Betrachtungen, Praxispartner und Transfer, Kommunikation und Veröffentlichungen	110
17	Ökobilanzielle Betrachtungen: Treibhauspotenziale von labortechnisch und großtechnisch hergestellten R-Zementen (VDZ)	110
18	Aspekte der Ressourceneffizienz, der Umweltverträglichkeit, der Dauerhaftigkeit und der Nachhaltigkeit im Praxisüberblick	112
19	Sozioökonomische und sozioökologische Betrachtungen	115
20	Transfer in die Praxis, Kommunikation und Veröffentlichungen	116
21	Verwendung der Zuwendung, Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten sowie voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	119
22	Zusammenfassung	121
23	Literaturverzeichnis	125
24	Anhang	135
A	Tabellen	135
B	Bilder	147

1 Gesamtziel des Vorhabens R-ZiEMENT

Ziel des Projektes war es, Verwertungsmöglichkeiten ziegelhaltiger Materialien aus dem Recycling (RC) mineralischer Bauabfälle, Bauschutt und Baustellenrückläufer sowie von Produktionsausschuss und Schleifstäuben aus der Ziegelproduktion zu untersuchen. Diese Produktgruppe wird im Titel des Verbundvorhabens sowie nachstehend in diesem Bericht als „ziegelhaltige Recyclingbaustoffe“ bezeichnet. Die technischen Möglichkeiten der Herstellung ressourceneffizienter Zemente mit verringertem Klinkeranteil unter Verwendung aufbereiteter, ziegelhaltiger Recyclingbaustoffe sollten erschlossen werden. Hierdurch könnten weitere prozessbedingte CO₂-Emissionen in der Zementherstellung reduziert werden.

Im Aufbereitungsprozess von RC-Baustoffen sollten insbesondere die ziegelhaltigen und ziegelreichen **RC-Feinstoffe** generiert und als puzzolanisch reagierende Hauptbestandteile im Zement eingesetzt und untersucht werden. Die Leistungsfähigkeit von Zementen, deren Zusammensetzungen neben dem Hauptbestandteil Klinker auch unterschiedliche ziegelhaltige Materialien aufweisen, sowie die Dauerhaftigkeit der unter Verwendung dieser Zemente hergestellten Betone sollten den derzeit relevanten Beurteilungskriterien in Zulassungsprüfungen entsprechen.

Die Zemente mit gemahlener, ziegelhaltigen oder ziegelreichen RC-Baustoffen aus dem Bauschutt- bzw. Ziegelrecycling werden nachfolgend „R-Zemente“ genannt (in Anlehnung an das BMBF-Projekt „R-Beton“, FKZ 13N13125, [1] [2] [3]). Für die Zemente mit selektiv gemahlenem oder gesiebttem Ziegelschleifstaub wurde diese Bezeichnung ebenfalls übernommen.

Die ökologische und ökonomische Bedeutung des Projektes basiert auf der Erarbeitung eines branchenübergreifenden Konzeptes zur Bereitstellung technisch und ökologisch optimierter Bauprodukte durch Schließen von Stoffkreisläufen.

2 Ressourceneffiziente Zemente in Herstellung und Anwendung – Normative, umweltanalytische und zulassungsrelevante Entwicklungen vor und während der Projektlaufzeit

2.1 Neue Ausgangsstoffe aus dem Bauschuttrecycling und dem Ziegelrecycling für ziegelhaltige R-Zemente

Ziegelhaltige R-Zemente, z. B. Versuchszemente aus den Projekten R-Beton oder R-ZiEMENT, sind bis dato von keiner deutschen Norm erfasst. Die Zemente können nicht für die Herstellung von Beton nach DIN EN 206-1 / DIN 1045-2 verwendet werden, da diese Zemente dort nicht aufgeführt sind.

Ist eine Anwendung eines „neuen“, ziegelhaltigen Zements im Beton geplant, müssen der Zement und seine Verwendung in einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung geregelt werden.

Die Erteilung einer Zulassung ist i. d. R. an Prüfungen gemäß „DIBt-Prüfplan“ geknüpft. Die Prüfergebnisse müssen vom DIBt festgelegte Beurteilungskriterien einhalten.

Zulassungsprüfungen für „neue“ Zemente, d. h. mit „neuen“ Ausgangsstoffen und/oder Zementzusammensetzungen außerhalb der Zementnorm DIN EN 197-1 sowie außerhalb der inzwischen geltenden Produktnormen EN 197-5 (für Portlandkompositzemente CEM II/C-M) bzw. EN 197-6 (für Zemente mit rezyklierten Baustoffen), beinhalten unter anderem:

- Analysen und Prüfungen am „neuen“ Ausgangsstoff für die Herstellung von Zement,
- Analysen und Prüfungen am „neuen“ Zement mit Blick auf seine Anwendung im Beton,
- Herstellung und Prüfung von Beton unter Verwendung „neuer“ ziegelhaltiger Zemente.

2.2 Rezyklierte Feinstoffe als Ausgangsstoffe für Zemente im Kontext zur EN 197-6

Im VDZ-Arbeitsausschuss „Betontechnik“ sowie im VDZ-Arbeitskreis „Regelwerke und Dauerhaftigkeit“ wurden die Arbeiten des VDZ in den nationalen und europäischen Normungsgremien gespiegelt. Die Berichte und Ergebnisse aus den Normungsgremien, wie z. B. zu der im Juli 2021 veröffentlichten Zementnorm DIN EN 197-5 „Zement – Teil 5: Portlandkompositzement CEM II/C-M und Kompositzement CEM VI“ [4] bildeten wichtige Säulen in der Entwicklung neuer, klinkereffizienter Zemente sowie in der Erforschung neuer ressourcenschonender Zemente, wie z. B. Zement mit „rezykliertem Feinstoff“ (sog. „Recyclingmehl“).

Bild 1 stellt die zeitliche Entwicklung der Projektplanung bzw. -durchführung (oben) und der Normung nachhaltiger Zemente mit rezyklierten Baustoffen (unten) schematisch dar.

Parallel zum Entwurf (ReMin-Skizze) bzw. zur Einreichung (ReMin-Antrag) des Projektes wurden auf europäischer Ebene Vorbereitungen für eine neue Norm „Zement mit rezyklierten Baustoffen“ getroffen. Nachdem 2021 das CEN/TC 51 der Normung grundsätzlich zugestimmt hat, gab es bereits 2022 das Formal Vote für den aktualisierten Normenentwurf. Schon in 2023 waren der Abschluss des Normungsverfahrens und die Veröffentlichung möglich.



Bild 1 Schematische Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Projektarbeit (z. B. Forschung für Nachhaltigkeit - ReMin) und der Normung nachhaltiger Zemente mit rezyklierten Baustoffen

Die neue Produktnorm EN 197-6 (Dezember 2023) sieht die Anwendung von sog. Betonrecyclingmehlen (recycled concrete fines „F“) in CEM II-F-, CEM II/M- und in CEM VI-Zusammensetzungen vor [5]. Je nach Zementart variieren die Anteile dieser rezyklierten Feinstoffe zwischen 6 M.-% im CEM II/A-F und 35 M.-% im CEM II/B-F. Bislang nicht enthalten sind ziegelreiche Recyclingmehle oder ziegelhaltige Recyclingmehle, die aus gemischten Recyclingbaustoffen bzw. gemischten rezyklierten Feinstoffen hergestellt werden.

Im Vergleich zur Schweizer Zementnorm SIA (vgl. SN EN 197-1:2011) sind aktuell in Deutschland noch nicht alle Zemente mit mineralischen Recyclingbaustoffen als Hauptbestandteile genormt. Für ihre Anwendung im Konstruktionsbeton ist zudem – unabhängig ihrer Normung - ein Nachweis der Eignung erforderlich, der anhand einer bauaufsichtlichen Anwendungszulassung zu erbringen ist (vgl. Abschnitt 2.1). Im Projekt R-ZiEMENT sollten ziegelhaltige Zemente hergestellt und untersucht werden,

- die sowohl rezyklierten Feinstoff enthalten,

- als auch einen deutlich reduzierten Klinkeranteil aufweisen.

Ziegelhaltige Recyclingbaustoffe bieten aufgrund ihrer puzzolanischen Reaktivität und - im Vergleich zu Klinker - leichten Mahlbarkeit [6] hervorragende Verwertungspotenziale sowie eine Möglichkeit, Klinker bis zu 30 M.-% und mehr zu substituieren, die Zemente energieeffizienter zu mahlen sowie CO₂-Emissionen (Prozessemissionen) in der Zementherstellung zu senken. Da in der Zementmahlung neben der mechanischen Aufbereitung keine zusätzliche thermische Aufbereitung für die Aktivierung ziegelhaltiger Recyclingbaustoffe erforderlich ist, kann der spezifische Energieeintrag gesenkt werden.

Der Einsatz von Primärressourcen kann somit deutlich verringert und ein Beitrag zur Kreislaufwirtschaft geleistet werden. Zudem lassen sich leistungsstarke Zemente effizienter in Mörtel- und Betonprodukten einsetzen, die neben den Anforderungen an die Druckfestigkeit auch den dauerhaftigkeitsrelevanten und ökobilanziellen Anforderungen entsprechen.

Bereits im Projekt „R-Beton“ (FKZ 13N13125) wurden feine RC-Gesteinskörnungen, die im Recyclingwerk bzw. in der mechanischen Aufbereitung von Betonbruch oder Bauschutt (z.B. im Brecher) entstehen, als „Brechsande“ bzw. „Recyclingbrechsande“ bezeichnet [7] [8] [9]. Im Rahmen des Projektes IGF-Nr. 20920 N (Verbesserung der Energieeffizienz und Reaktivität durch separate Mahlung von Ziegelbrechsand für den Einsatz in Portlandpuzzolanementen) [6] wurden die ziegelhaltigen Ausgangsstoffe aus der Ziegelproduktion (z. B. Produktionsabfälle aus Ziegelwerken, Ziegelbruch) bzw. aus dem Bauschuttrecycling (z. B. ziegelhaltiger Mauerwerksbruch) als „Ziegelbrechsande“ bzw. ziegelhaltige „Recyclingbrechsande“ bezeichnet. Zum Ende der Projektlaufzeit wurden die in der Recyclingindustrie relevanten Bezeichnungen durch Bezeichnungen wie „Recyclingfeinstoff“, „rezyklierter Feinstoff“ bzw. „RC-Feinstoff“ ergänzt (vgl. Abschnitt 2.2).

Zemente, die gemahlene RC-Gesteinskörnungen bzw. gemahlene RC-Brechsande aus Ziegelbruch (Zib), Mauerwerk (Mab) oder gemischtem Bauschutt als Hauptbestandteil enthalten, werden in diesem Bericht (ebenfalls in Anlehnung an das Projekt „R-Beton“) als "R-Zemente" bezeichnet.



Bild 2 Ausgangsstoffe, Stoffströme und Recyclingprodukte aus Recyclingwerken und Ziegelwerken, Quelle: „Herstellung und Anwendung klinkereffizienter R-Zemente“, VDZ-Arbeitsausschuss Bonteknik, 26.04.2023, vgl. auch [6] und [9]

Die Übersicht im **Bild 2** erklärt gängige und neu eingeführte Bezeichnungen für Ausgangsstoffe und Stoffströme, für Produkte aus Aufbereitung und Recycling sowie für rezyklierte Feinstoffe bzw. Recyclingmehle, die als Hauptbestandteil in Zementen eingesetzt werden können.

2.3 Ziegel als natürliche getemperte Puzzolane „Q“ im Kontext zur DIN EN 197-1

Weisen ziegelhaltige Recyclingbaustoffe einen Massenanteil von mindestens 25 M.-% an reaktionsfähigem Siliciumdioxid auf, erreichen sie das wesentliche Kriterium der in DIN EN 197-1, Abschnitt 5.2.3.1 bzw. 5.2.3.3 geforderten Eigenschaften für natürliche getemperte Puzzolane. Mit dem Kriterium „reaktionsfähiges SiO₂ ≥ 25 M.-%“ erfüllen natürliche getemperte Puzzolane bzw. thermisch aktivierte Tone, grundsätzlich die technische Voraussetzung für die Herstellung eines Portlandpuzzolanzements (z. B. CEM II/A-Q, CEM II/B-Q) nach DIN EN 197-1. Auch Portlandkompositzemente, z. B. in Kombination mit Kalkstein (CEM II/A-M (Q-LL), CEM II/B-M (Q-LL)) sind denkbar.

2.4 Angabe von Herstellverfahren als Bestandteil von Anwendungszulassungen

Mit der Einführung von Prüfplänen für klinkereffiziente Portlandkompositzemente wurden vom DIBt Angaben zum entsprechenden Herstellverfahren als Teil der bauaufsichtlichen Anwendungszulassungen gefordert. Folgende mechanische Aufbereitungsverfahren können zur Herstellung ziegelhaltiger R-Zemente herangezogen werden:

- **Gemeinsame Mahlung:** Die ziegelhaltigen RC-Baustoffe sind - unabhängig ihres im Recyclingwerk (Brecher-/Siebanlagen) erreichten Zerkleinerungsgrades - im Frischgutmassenstrom einer Zementmahlanlage, d. h. über die Bandwaagendosierung einsetzbar.
Alle Ausgangsstoffe des R-Zements, inkl. stückiger RC-Baustoffe, werden vollständig gemeinsam gemahlen (Mahlgut = Fertiggut). Die Massenströme werden i.d.R. in einer Umlaufmahlung mit Mühle und Sieb zu einem Zement aufbereitet.
- **Selektive Mahlung:** Feiner vorzerkleinerte Ausgangsstoffe (z. B. Ziegelschleifstäube) lassen sich alternativ – je nach logistischen und technischen Voraussetzungen im Zementwerk – auch an anderen Aggregaten des Mahlkreislaufs zudosieren (vgl. Aufgabe von Hüttensand oder Flugasche am Sieb bei Umlaufmahlung von drei Hauptbestandteilen).
Während der gröbere Anteil des RC-Baustoffs gemeinsam mit allen anderen Ausgangsstoffen des R-Zements (Mühlenaufgabegut) vollständig gemahlen wird, gelangt der feinere Anteil des RC-Baustoffs nach Klassierung im Sieb (ohne Mahlung) direkt in den Fertiggutmassenstrom.
- Weisen große Anteile der Ausgangsstoffe bereits eine „Zementfeinheit“ bzw. einen entsprechenden Durchgang ihrer Korngrößenverteilung (z. B. < 63 µm) auf, eignen sich getrennte Aufbereitungs-/Mahlverfahren mit anschließendem Mischen der mehlfeinen Zementbestandteile (z. B. Mehlkammermischsilo). Schleifstaub aus der Planziegelherstellung weist auf der einen Seite sehr hohe Feinheiten auf, auf der anderen Seite sog. „Abplatzer“ in Millimetergröße, die vor einem Zementmischprozess durch Sieben oder Sichten sicher zu entfernen sind.

Während der Projektlaufzeit sind von deutschen Zementwerken keine Anträge auf Zulassungen derartiger Zemente gestellt worden.

2.5 Umweltverträglichkeitsuntersuchungen (UVU) an RC-Materialien bzw. RC-haltigen Zementen sowie am Beton

2.5.1 Umweltanalytik von „R-Beton“ bis „R-ZiEMENT“

Im Nachgang zum BMBF-Projekt „R-Beton“ (FKZ 13N13125, [1] [2] [3]) sowie mit Blick auf die im Projekt „R-ZiEMENT“ geplanten Umweltverträglichkeitsuntersuchungen wurde zu Beginn der Projektlaufzeit ein Status quo erarbeitet.

Seit Abschluss des Projektes „R-Beton“ wurden seitens der Bauaufsicht, in den VDZ-Gremien sowie in Forschungsprojekten unterschiedliche Ansätze diskutiert, wie die Umweltverträglichkeit von RC-Materialien aus Recyclingwerken zu untersuchen und zu bewerten ist, wenn die RC-Materialien weder als Gesteinskörnung noch als Zusatzstoff, sondern als gemahlene Zementhauptbestandteile eingesetzt werden sollen.

Im Projekt R-ZiEMENT war vorgesehen, ziegelhaltige Recyclingbaustoffe (z. B. rezyklierte Feinstoffe), die als mineralischer Bestandteil ressourceneffizienter Zemente eingesetzt werden sollten, nach jeweils aktuell geltenden Anforderungen umweltanalytisch zu untersuchen und einzuordnen. Insofern wurde der projektbezogene Prüfplan für Umweltverträglichkeitsuntersuchungen bis zum Ende der Projektlaufzeit regelmäßig aktualisiert (vgl. z.B. Abschnitt 4.5). Vormals an RC-Materialien verwendete Prüfverfahren und Grenzwerte für Feststoffe und Eluate (vgl. LAGA-Mitteilung 20 bzw. LAGA Eckpunktemapier [10]) wurden abgelöst.

2.5.2 DAfStb-Richtlinie zur Verwendung von siliciumreicher Flugasche und Kesselsand

Im ersten Projektjahr orientierten sich die Umweltverträglichkeitsuntersuchungen an ziegelhaltigen RC-Baustoffen an den folgenden Kriterien, die im Technischen Ausschuss des DAfStb „Nachhaltigkeit“, Unterausschuss „Freisetzung von gefährlichen Stoffen aus Beton“ vorgeschlagen wurden:

- Bezug auf die aktualisierte DAfStb-Richtlinie „Verwendung von siliciumreicher Flugasche und Kesselsand in Betonbauteilen in Kontakt mit Boden, Grundwasser oder Niederschlag“ des DEUTSCHEN AUSSCHUSSES FÜR STAHLBETON, Ausgabe Juni 2020
- Bestimmung der Feststoffgehalte an Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Thallium, Vanadium, Zink, PAK16, PCB6, PCDD/PCDF, vgl. Tabelle 1 der o. g. Richtlinie.
- Die Obergrenzen (Tabelle 1 der Richtlinie) waren vollständig einzuhalten.
(Im Einzelfall durfte maximal ein Parameter um maximal 30 % überschritten werden.)

Die Untersuchungen bezogen sich auf rezyklierte Feinstoffe aus Recyclingwerken und ihre Anwendung im Bauprodukt. Insofern sollten sie ausschließlich gebunden eingesetzt werden (d. h. im Bindemittel/ im Beton).

R-ZIEMENT - Umweltkriterien im Vergleich

Nachtrag 4.2.2022

DIN 4226-101 2017-08: „Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620, Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen“ (*R-Beton*)

Eigenschaft / Parameter	Höchstwerte	
Feststoff		
Mineralölkohlenwasserstoffe	1000 ^{b)}	mg/kg
PAK nach EPA	25	mg/kg
EOX	10	mg/kg
PCB	1	mg/kg

b) Überschreitungen, die auf Asphaltanteile zurückzuführen sind, stellen kein Ausschlusskriterium dar.

Eigenschaft / Parameter	Höchstwerte	
Eluat		
pH-Wert	12,5 ^{a)}	
Elektrische Leitfähigkeit	3000 ^{a)}	µS/cm
Chlorid	150	mg/l
Sulfat	600	mg/l
Arsen	50	µg/l
Blei	100	µg/l
Cadmium	5	µg/l
Chrom gesamt	100	µg/l
Kupfer	200	µg/l
Nickel	100	µg/l
Quecksilber	2	µg/l
Zink	400	µg/l
Phenolindex	100	µg/l

a) kein Ausschlusskriterium

DAfStb-Richtlinie: „Verwendung von siliciumreicher Flugasche und Kesselsand in Betonbauteilen in Kontakt mit Boden, Grundwasser oder Niederschlag“ (*R-ZIEMENT*)

Eigenschaft / Parameter	Höchstwerte	
Feststoff		
Mineralölkohlenwasserstoffe		
PAK ₁₆	30	mg/kg
EOX		
PCB ₆	0,5	mg/kg
PCDD/PCDF	100	ng TEQ/kg

Toxizitätsäquivalent

Eigenschaft / Parameter	Höchstwerte	
Feststoff		
Arsen	150	mg/kg
Blei	700	mg/kg
Cadmium	10	mg/kg
Chrom gesamt	600	mg/kg
Kupfer	400	mg/kg
Nickel	500	mg/kg
Quecksilber	5	mg/lg
Thallium	7	mg/kg
Vanadium	1500	mg/kg
Zink	1500	mg/kg

Bild 3 Umweltverträglichkeitsuntersuchungen im Vergleich, Höchstwerte nach DIN 4226-101 sowie nach DAfStb-Richtlinie

2.5.3 Prüfplan für Zulassungsprüfungen am Zement mit RC-Material als Hauptbestandteil

Zu Beginn des Projektjahres 2023 wurde im Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) ein erster Prüfplan für eine Zulassungsprüfung eines Zements mit RC-Material als Hauptbestandteil erstellt (vgl. [5]). Der Prüfplan enthält den Nachweis der Umweltverträglichkeit. An den Recyclingbaustoffen sind die Eluat- und Feststoffwerte gemäß DIN 4226-101, Abschnitt 4.5, zu bestimmen. Die Angaben im Prüfplan wurden vom zuständigen Referat für Umwelt freigegeben. Je nach Ergebnis der Analysen kann ggf. noch ein zusätzlicher Festbetonversuch nach CEN/TS 16637-2 durchzuführen sein.

Die Übersicht im **Bild 3** stellt den Übergang zwischen DAfStb-Richtlinie (vgl. Abschnitt 2.5.2) und DIBt-Prüfplan gemäß DIN 4226-101 dar und listet die zulässigen Höchstwerte für Feststoffe und Eluate auf.

2.5.4 UVU am Beton

DIBt-Prüfpläne für Anwendungszulassungen von Zementen mit rezyklierten Feinstoffen (F) sehen nur im Ausnahmefall, z. B. wenn die Analysen der Recyclingmaterialien zum Teil nicht den Normgrenzwerten entsprechen, Untersuchungen zum Auslaugverhalten entsprechender Betone vor.

Zum Ende des Projektes wurden – unabhängig der Analysen am Recyclingmaterial - Prüfungen zur Umweltverträglichkeit am Beton geplant. Unter der Verwendung eines im Betriebsversuch hergestellten Werkzements mit möglichst hohem Recyclingfaktor sollte ein Beton im sog. Tank-Leaching-Test (gemäß CEN/TS 16637-2) untersucht werden. Für die Durchführung und Auswertung dieser Prüfungen gelten die DAfStb-Richtlinien:

- "Verwendung von siliziumreicher Flugasche und Kesselsand in Betonbauteilen in Kontakt mit Boden, Grundwasser oder Niederschlag"
- „Bestimmung der Freisetzung umweltrelevanter Stoffe aus zementgebundenen Baustoffen in der dynamischen Oberflächenauslaugprüfung“.

Die Prüfergebnisse müssen vom DIBt festgelegte Beurteilungskriterien einhalten.

2.6 CLP und REACH – Status Quo zum Laufzeitende

Die CLP-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 regelt die Einstufung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe. Ob thermisch aktivierte Tone und RC-Materialien darunterfallen, hängt im Wesentlichen von zwei Eigenschaften ab. Zum einen, ob die Materialien mehr als 1 M.-% feinteiligen (alveolengängigen) Quarz enthalten und zum anderen, wie hoch die Alkalität (pH-Wert) der Materialien ist, die durch Anteile an CaO oder Klinkerphasen hervorgerufen wird. Sofern sie hohe Quarzgehalte aufweisen, wird eine Einstufung mit H373 vermutlich unumgänglich sein. Eine Einstufung als „reizend“ mit H315 wird hingegen als weniger erforderlich angesehen.

Betrachtet man aktivierte Tone als nicht chemisch modifizierte Mineralien (Naturstoffe) gemäß REACH-Verordnung (Anhang V, Nr. 7), sind sie von der Registrierungspflicht ausgenommen. Zu den chemisch nicht modifizierten Naturstoffen zählen z.B. auch Erze und Erzkonzentrate.

Da mineralische RC-Materialien ebenfalls aus chemisch nicht modifizierten Mineralien (Naturstoffen) sowie hydratisierten Stoffen (z.B. Zementstein) bestehen, sollten auch diese von der Registrierungspflicht ausgenommen sein (Anhang V, Nr.1, Nr. 6).

Anmerkung: *Nach intensiven Diskussionen auf europäischer und nationaler Ebene steht nun fest, wie aktivierte Tone und Betonrecyclingmehl als Zementbestandteile und die damit hergestellten Zemente gemäß REACH- und CLP-Verordnung einzustufen sind. Nun besteht Klarheit, über Sicherheitsdatenblätter und Kennzeichnungen auf Verpackungen. Ob es einer modifizierten Einstufung oder Kennzeichnung bedarf, hängt vom Quarzfeinanteil im Zement ab. Bei Quarzfeinanteilen im Zement zwischen 1 und 10 M.-% wäre zusätzlich der Gefahrenhinweis H372 auf dem Kennzeichnungsetikett anzugeben. Zudem wird für aktivierte Tone keine REACH-Registrierung benötigt. Gleiches gilt für mechanisch aufbereitetes Betonrecyclingmehl, wenn es keiner aktiven Carbonatisierung ausgesetzt ist. (Quelle: VDZ Mitteilungen Nr. 187, Dezember 2024, www.vdz-online.de)*

Themenschwerpunkt A: Charakterisierung der RC-Stoffströme

3 Stoffströme, Probenahmen und Untersuchungen in den Ziegelwerken der Leipfing-Bader GmbH (LB)

3.1 Nutzbare Stoffströme

Zu Beginn des Projekts konzentrierte sich die Arbeit bei LB auf die Analyse und Nutzung von Stoffströmen aus der Ziegelproduktion, insbesondere Schleifstaub, Produktionsausschuss und Baustellenrücklauf. Eine grundlegende Analyse der Stoffströme zeigte, dass nur Teilmengen der relevanten Stoffströme zur Verfügung stehen könnten. Beispielsweise besteht eine hohe Nachfrage nach sortenreinem Ziegelsplitt für technische Böden, insbesondere für Gründächer. Die Prozesse bei Leipfing-Bader wurden analysiert, um die Stoffströme zu charakterisieren und zu quantifizieren. Dabei wurden Parameter wie die Menge des Schleifstaubs, die Bruchquote des Produktionsausschusses und die Menge des Baustellenrücklaufs erfasst. **Tabelle 1** enthält eine Zusammenfassung dieser Parameter.

Tabelle 1 Relevante Parameter der Stoffströme

Stoffstrom	Parameter	Beschreibung
Schleifstaub	Menge (gravimetrisch)	Quasikontinuierliche Erfassung der Schleifstaub-Mengen; Verwiegung von Ziegeln jeweils vor und nach dem Planschleifen zu vorgegebenen Zeiten mehrmals je Charge nach vorgegebenem Schema
Produktionsausschuss	Menge (anteilig)	Automatisierte Erfassung der sog. Bruchquote je Charge über Differenzbildung der Stückzahlen nach dem Trocknen und nach der Qualitätskontrolle nach dem Brennen. Basis der Erfassung der Stückzahlen: Takte der Roboter
Baustellenrücklauf	Menge volumetrisch, Menge gravimetrisch, Feuchte	Anzahl der BigBags aus Baustellenrücklauf Erfassung der Mengen-Durchsätze im Leitsystem der Anlage Manuelle Bestimmung der Materialfeuchte, mehrmals täglich

Nachfolgende **Tabelle 2** quantifiziert produktionsnahe Stoffströme, die zu Beginn des Projektes auf einem ähnlichen Niveau wie nach Abschluss des Projektes lagen. Es wurden Daten ausgewertet, verglichen und auf die in Deutschland jährlich anfallenden Mengen Ziegelbruch und Ziegelschleifstaub aus Ziegelwerken sowie aus ziegelhaltigem Mauerwerksbruch aus dem Rückbau sowie aus Recyclingwerken bezogen. Aufgrund der schlechten Konjunktur während der Jahre 2022 und 2023 sind die aufkommenden Mengen erheblich zurückgegangen. Im Jahr 2024 haben die Mengen wieder zugenommen und erreichten einen vergleichbaren Stand von 2020/2021.

Tabelle 2 Produktionsnahe Stoffströme (Quelle: Leipfing-Bader GmbH) und in Deutschland, Daten aus der Zeit des Projektbeginns 2021 vergleichbar mit Daten aus der Zeit des Projektendes 2024

Stoffstrom	Mengen LB	Hochrechnung Mengen Deutschland	Für die Verwendung im Zement zur Verfügung stehende Anteile
Projektbeginn 2021 Projektende 2024			
	[t/a]	[t/a]	[%]
Schleifstaub	6.000 – 8.000	70.000 – 120.000	70 – 100
Produktionsausschuss	2.500 – 5.000	80.000 – 150.000	20 – 40
Baustellenrücklauf	Stufe 1: 3.000 – 5.000 Stufe 2: 5.000 – 10.000	80.000 – 150.000	20 – 40

3.2 Probenahmen in den Ziegelwerken

Im ersten Projektlaufjahr wurden sieben Proben aus den Ziegelwerken und der Aufbereitungsanlage entnommen. Sie sind in der folgenden **Tabelle 3** zusammengefasst.

Anmerkung: Die Proben aus den Ziegelwerken wurden im Projekt als „Ziegelbruch“ mit der Abkürzung „Zib“ bezeichnet und umfassten verschiedene Fraktionen und Aufbereitungsstufen.

Die Stoffströme bei Leipfinger-Bader wiesen eine entsprechende Homogenität auf, da sie vollständig aus Ziegelmaterial bestanden. Um die Verwertbarkeit des Materials sicherzustellen, wurden Maßnahmen wie die Schulung der Kunden zur Sortenreinheit und die Rücknahme über verschleißbare Big-Bags implementiert.

Tabelle 3 Probenahmen Ziegelbruch (LB)

Kurzbezeichnung Ziegelbruch	Beschreibung der Probe	Werkstandort	Beschreibung des Ausgangsstoffes vor Aufbereitung	Beschreibung von Aufbereitung bzw. Probenahme	Beschreibung des RC-Produktes
Zib 1	ohne Aufschrift Ziegelrecycling PU	Leipfinger-Bader Werk Puttenhausen	Ausgangsmaterial Baustellenrückläufer und Produktionsausschuss	Vorzerkleinerung Schaufelseparator; Windsichtung; Siebung; ggf. Nachzerkleinerung	Entnahme aus Fraktion 0-2 mm
Zib 2	Schleifstaub Werk Puttenhausen	Leipfinger-Bader Werk Puttenhausen	Stichprobe aus der Regelproduktion; Schleifstaub aus der Planziegelherstellung; Entnahme am Silo	keine weitere Aufbereitung	keine weitere Aufbereitung
Zib 3	Schleifstaub Werk Schönwind	Leipfinger-Bader Werk Schönwind	Stichprobe aus der Regelproduktion; Schleifstaub aus der Planziegelherstellung; Entnahme an Schleifanlage	keine weitere Aufbereitung	keine weitere Aufbereitung
Zib 4	Schleifstaub Werk Vatersdorf	Leipfinger-Bader Werk Vatersdorf	Stichprobe aus der Regelproduktion; Schleifstaub aus der Planziegelherstellung; Entnahme am Silo	keine weitere Aufbereitung	keine weitere Aufbereitung
Zib 5	Feinfraktion 0-2 mm Ziegelrecycling PU 16.06.2021	Leipfinger-Bader Werk Puttenhausen	Ausgangsmaterial Baustellenrückläufer und Produktionsausschuss	Vorzerkleinerung Schaufelseparator; Windsichtung; Siebung; ggf. Nachzerkleinerung	Entnahme aus Fraktion 0-2 mm
Zib 6	Schleifstaub Werk Puttenhausen 16.06.2021	Leipfinger-Bader Werk Puttenhausen	Stichprobe aus der Regelproduktion; Schleifstaub aus der Planziegelherstellung; Entnahme am Silo	keine weitere Aufbereitung	keine weitere Aufbereitung
Zib 7	Feinfraktion 0-2 mm Versuch Dachziegel 29.06.2021	Leipfinger-Bader Werk Puttenhausen	Spezielle Versuchsanordnung; Aufbereitung von Dachziegel mit definierter Herkunft aus der Produktion von Leipfinger-Bader Vatersdorf, ca. 1930; Aufbereitung in der Anlage am Standort Puttenhausen; Probenahme aus der Fraktion 0-2 mm	Vorzerkleinerung Schaufelseparator; Windsichtung; Siebung; ggf. Nachzerkleinerung	Entnahme aus Fraktion 0-2 mm

Im Jahr 2022 wurden weitere Ziegelmaterialproben sowie zwei Dämmstoffproben entnommen (vgl. **Bild 4**):



Bild 4

Bereitgestellte Materialproben

- 4 x Schleifstaub
- 3 x Ziegel aus Produktion
- 2 x Material Test Dachziegel-Recycling
- 3 x Material Ziegelrecycling Baustellenrücklauf)

Die Erfassung und Charakterisierung dieser Stoffströme wurden abgeschlossen und durch eine umfassende Foto-Dokumentation (**Bild 5**) ergänzt, die die Bandbreite der Eigenschaften der Proben optisch wiedergibt.

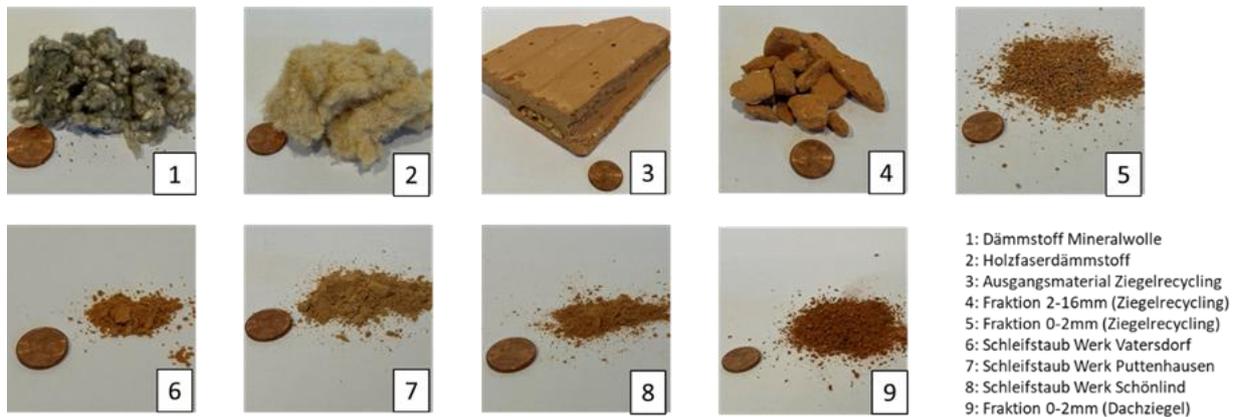


Bild 5 Foto-Dokumentation der zur Verfügung stehenden Stoffströme

3.3 Untersuchungen mittels Sensortechnik in Zusammenarbeit mit der HeiQ RAS AG

3.3.1 Auswahl geeigneter Sensortypen

Ein wichtiger Aspekt des Projekts war die Erarbeitung von Methoden zur Erfassung relevanter Parameter der Materialien durch Sensortechnik. In Zusammenarbeit mit der HeiQ RAS AG wurden z.B. Schleifstaubproben untersucht, um Unterschiede zwischen den Standorten festzustellen. Sensortypen wurden für die spätere Entwicklung eines Prototyps zur Stoffstromanalyse recherchiert. Optische Verfahren wie die Farbsortierung erwiesen sich als besonders vielversprechend, da sie eine effektive Trennung von Bestandteilen wie rotem Ziegel und grauem Beton ermöglichen. Nahinfrarotsensoren wurden ebenfalls erfolgreich eingesetzt, um Baustoffgemische aus Beton, Porenbeton, Kalksandstein, Ziegel und Gips voneinander zu unterscheiden.

Ein weiterer wesentlicher Teil des Projekts bestand in der Erarbeitung theoretischer Grundlagen zur Stofftrennung der zur Verfügung gestellten Proben. Hierbei wurden verschiedene Sortierverfahren untersucht, insbesondere die Einzelkornsortierung, die auf der Erfassung physikalischer oder chemischer Merkmale jedes einzelnen Partikels basiert. Für eine erfolgreiche Sortierung ist es notwendig, dass die Partikel eine ausreichende Größe aufweisen und ihre Oberfläche sauber ist, um eine

zuverlässige Erkennung zu gewährleisten. Eine Reinigung der Partikeloberfläche vor der Sortierung, beispielsweise durch Wäsche oder trockene bzw. nasse Attrition, wurde als notwendig erachtet.

3.3.2 Laborversuche zur Sensortechnik

Im Rahmen von Laborversuchen wurden verschiedene Sensoren getestet, darunter ein NIR-Sensor (**Bild 6**), der erfolgreich Ziegel von anderen Materialien unterscheiden konnte. Ein dynamischer Prototyp zur gezielten Erfassung von Störstoffen in einer definierten Probe wurde entwickelt. Dieser Prototyp nutzt eine Kombination aus optischer Kamera und 3D-Scanner, um die Farbe und Struktur der Partikel zu erfassen und zu klassifizieren (**Bild 7**).



Bild 6 NIR-Sensor mit verschiedenen Proben (links). NIR-Sensor beim Vermessen eines Ziegels (rechts)

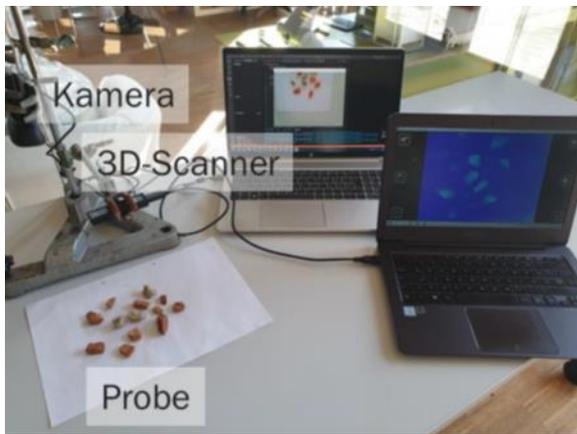


Bild 7

Darstellung mittels 3D-Scanner und RGB-Kamera

3.3.3 Technikums- und Feldversuche zur Farberkennung unter Realbedingungen im Werk

Die Durchführung umfangreicher Technikumversuche zur Klassifizierung und Charakterisierung von Stoffströmen aus Recyclingmaterial wurde in den Arbeitspaketen AP 11.2 und AP 11.3 weiter vorangetrieben und ausgearbeitet. Ein bedeutender Fortschritt war die Entwicklung eines auf Computer Vision basierenden Farberkennungssystems für das Ziegelrecycling in der Recyclinganlage von LB. Zunächst wurde die Problemstellung klar definiert und der Umfang des zu analysierenden Themenbereichs festgelegt. Dies umfasste die genaue Definition der zu erkennenden Farben der einzelnen Bruchstücke in den RC-Materialien sowie die Spezifikation der Anforderungen an das System, einschließlich der Art der Ziegel, der Lichtverhältnisse und der erforderlichen Messgenauigkeit. Die Datenerfassung spielte eine zentrale Rolle im Entwicklungsprozess. Es wurde ein vielfältiger Datensatz von Ziegelbruch mit unterschiedlichen Körnungen und Zusammensetzungen der Störstoffe unter

verschiedenen Lichtverhältnissen erstellt. Anschließend wurden diese Datensätze quantifiziert, um das Mischungsverhältnis, die Art und die Farbe der Störstoffe genau zu bestimmen.

Nach der Datenerfassung folgte die Vorverarbeitung der Daten. Dabei wurden die Videos auf ein einheitliches Format bezüglich Länge, FPS und Beleuchtung normiert. Zudem wurden Rauschen, Artefakte und irrelevanter Hintergrund durch Bildverarbeitung entfernt, um eine präzise Analyse zu ermöglichen. Die Merkmalsextraktion erfolgte durch die Extraktion relevanter Merkmale aus den Bildern, insbesondere farbbasierte Merkmale wie RGB-Werte, HSV-Komponenten oder Farbhistogramme. Anschließend wurden die RGB-Bilder aus der Kamera in einen anderen Farbraum (HSV) konvertiert, um die Farbtrennbarkeit zu verbessern. Die Durchführung und Auswertung des Systems unter Realbedingungen fanden in der RC-Anlage von LB statt. Dabei wurde die Genauigkeit des Modells anhand des Mischungsverhältnisses bewertet und verschiedene reale Szenarien wie unterschiedliche Beleuchtung und Ziegelvariationen berücksichtigt. Zur Optimierung des Systems sind laufend weiterführende Realtests geplant. Das System wird fortlaufend in der Produktion getestet, und die Parameter wie Beleuchtungsbedingungen und Kamerawinkel werden weiter optimiert. Zudem sollen zukünftige Änderungen wie neue Ziegelfarben, verbesserte Störstoffidentifizierung und Beleuchtungsverbesserungen berücksichtigt werden.

Die Anwendbarkeit der in diesem Projekt entwickelten Farberkennung für eine mögliche Sortierung, wurde in einem Feldversuch demonstriert. Für den Versuchsaufbau wurden zunächst 15 Liter Ziegelbruch und 10 Liter Störstoffe als Ausgangsmaterialien vorbereitet. Diese beiden Materialien wurden gründlich gemischt, um eine homogene Mischung zu erzielen. Anschließend wurde die Mischung auf ein Förderband aufgebracht (**Bild 8**).



Bild 8 Workflow zur Bestimmung der Farbanteile im Ziegelbruch

3.3.4 Prozess- und Stoffstromoptimierung

Parallel zu den Entwicklungsarbeiten wurden vorgeschaltete Untersuchungen in der LB-Recyclinganlage durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Parameter wie Partikelgrößenverteilung, Partikelform und Partikelfarben untersucht, um die besten Ansätze für die Anwendung des Messsystems zu finden. Insgesamt bietet die stoffliche Erkennungssoftware vielfältige Potenziale für die Anwendung in Recyclinganlagen für Ziegel. Sie ermöglicht die Sortierung von Abbruchmaterialien, die Trennung von Ziegelbruch und Störstoffen sowie die Quantifizierung der Volumenanteile an reinem Ziegel. Durch spezifische Hardware kann die Genauigkeit des Systems weiter verbessert werden.

Im Hinblick auf die Prozess- und Stoffstromoptimierung wurde der Schleifprozess eingehend betrachtet, da dieser für die gleichmäßige Ziegelmehlqualität von entscheidender Bedeutung ist. Derzeit erfolgt der Schleifprozess in einer zweistufigen, nacheinander geschalteten Schleifscheibenanordnung. Hier können die Prozessparameter der Schleifscheibendrehzahl, Körnungsstufe der Scheiben, Vor- und nachgeschaltete Robotertechnik zur Be- und Entladung der Schleifanlage. Eine Anpassung einzelner Prozessparameter zieht demnach eine Anpassung des gesamten vor- und nachgelagerten Prozesses mit sich.

Sollten sich nach den Analysen am IZF und nach den Untersuchungen im VDZ aus den großtechnischen Versuchen veränderte Anforderungsprofile an den Ausgangsstoff „Ziegelmehl aus Schleifprozess“ ergeben, muss hier detailliert der Gesamtprozess tiefer angepasst werden. Mögliche Aspekte sind hier die Korngrößenverteilung des Ziegelmehls und das Entstehen von Abplatzern durch straff eingestellte Schleifparameter.

Innerhalb des Konsortiums wurde zu dieser Thematik die Frage diskutiert, wie sich die puzzolanische Reaktivität der Ziegelmaterialien für den potenziellen Einsatz in Zementen verhält und ob eine finale Mahlung größerer Fraktionen direkt vor der Zementherstellung bessere Eigenschaften aufweist. Aktuell sind hierzu weitere Analysen in Bearbeitung. Seitens LB wurden neue Stoffproben aus der Recyclinganlage bereits angestoßen. Des Weiteren wurde die werksinterne Stoffführung des Ziegelmehls zur Verbesserung des Materialflusses und der Ausschleusung untersucht und Optimierungspotentiale festgemacht. Insbesondere die Zwischenlagerung von Ziegelmehl ohne anfallende Staubentwicklung beim Abfüllen in Transportbehältnisse wurde hier berücksichtigt.

Im Rahmen des Arbeitspakets AP 12.1 wurde die Bereitstellung größerer Stoffmengen von Ziegelmehl aus dem Schleifprozess der Planziegel im Werk Schönlind durchgeführt. Des Weiteren erfolgte eine Prozessanalyse der Recyclinganlage in Puttenhausen, um die Materialreinheit im Bereich geringer Korngrößen zu verbessern. Dabei lag ein Schwerpunkt auf der Reduzierung oder Minimierung von Dämmstoff- und Faseranteilen im Aufbereitungsprozess. Für eine effiziente Weiterverarbeitung von ziegelhaltigen Materialien ist ein hochwertiges und sortenreines Vorliegen des Ausgangsrohstoffes essenziell, um nachgelagerte Bearbeitungsschritte reduzieren zu können.

Die ziegelhaltigen Recyclingbaustoffe (Ziegelbruch Zib) wurden in den Ziegel- und Recyclingwerken vor Ort beprobt und für weitere Analysen an die Forschungsstellen versendet. Die Stoffströme wurden parallel untersucht, um eine umfassende Charakterisierung der Ausgangsstoffe zu gewährleisten. Die Ergebnisse der Probenahmen und Analysen wurden in Tabellen zusammengefasst, die die Herkunft, Zusammensetzung und Aufbereitung der RC-Baustoffe detailliert darstellen (siehe **Tabelle 3**).

3.4 Analytik

3.4.1 REM- und EDX-Analysen

Im weiteren Verlauf des Projekts wurden Schleifstaubproben der Standorte Schönlind, Vatersdorf und Puttenhausen untersucht. Zum Einsatz kam ein Tisch REM der Marke Phenom. Das Gerät besitzt die Möglichkeit nicht metallisierte Proben bis zu einer Vergrößerung von bis zu 50.000 Fach zu vergrößern, sowie eine Elementanalyse mittels halbquantitative EDX durchzuführen. Mit Hilfe dieser EDX Analysen sollten Unterschiede zwischen den Schleifstäuben der Standorte festgestellt werden. Bei einer reproduzierbaren und verifizierbaren Unterscheidbarkeit der Proben ist eine vergleichsweise schnelle Untersuchungsmethodik gefunden worden, da die Präparation und Analyse der Proben für das REM lediglich wenige Minuten dauern.

Zur Bestimmung der Elementverteilung mittels Energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) werden die jeweiligen Atome mit einem Elektronenstrahl angeregt, welche dann ihrerseits elementspezifische, charakteristische Röntgenstrahlung abgeben (**Bild 9**). Durch den Abgleich mit einer Datenbank können die entstehenden Spektren mit bekannten Spektren verglichen und Verhältnisse der Elemente zueinander angegeben werden (halbquantitativ). Die Ergebnisse des Schleifstaubs lassen sich aus **Bild 10** ziehen.

So lassen sich durch die EDX Analysen konstante Verhältnisse von, für die Festigkeitsentwicklung im Zement entscheidender Elemente, (bspw. Aluminium, Silizium, Calcium) feststellen. Zudem ließ sich eine schnelle Eignungsprüfung des Materials etablieren.

Aus diesem Grund wurden mehrere Proben der Materialien an verschiedenen Stellen entnommen und auf ihre Elementverhältnisse hin untersucht. Leider ergaben sich keine reproduzierbaren Ergebnisse. Die Proben waren zu inhomogen, um eine Normierung der Werte vornehmen zu können.

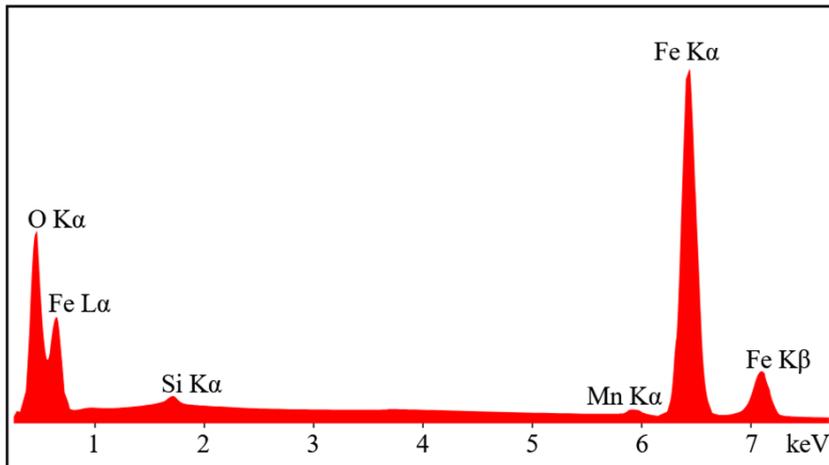


Bild 9 Typisches Spektrum von Eisenoxid

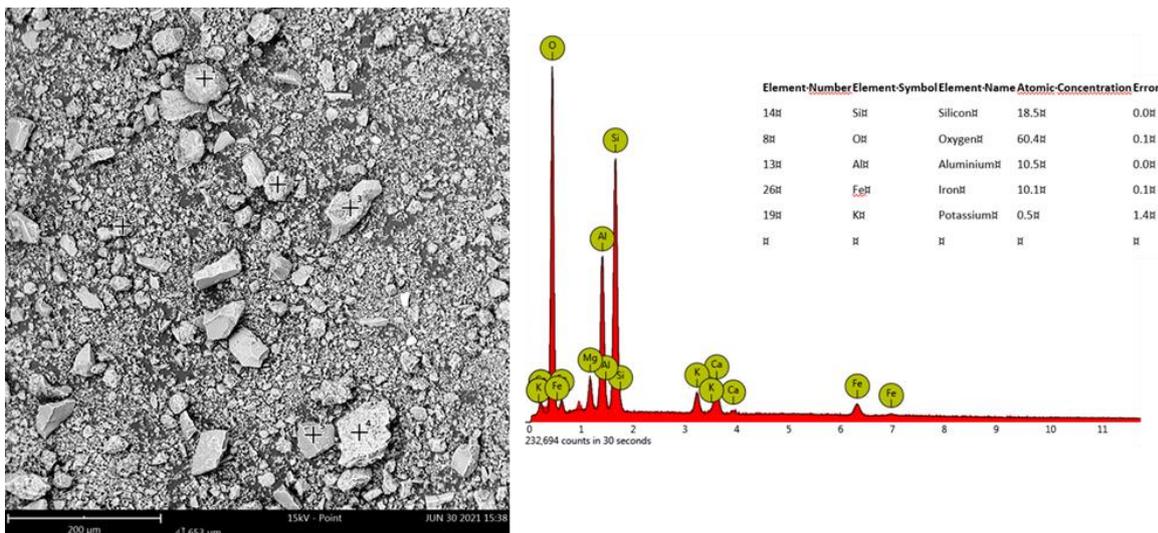


Bild 10 EDX-Analyse einer Schleifstaubprobe mit charakteristischem Spektrum und Atomkonzentrationen

Anmerkung: Im weiteren Verlauf des Projektes, insbesondere während der Vorbereitung und Durchführung der großtechnischen Betriebsversuche (kritischer Meilenstein), wurde zunehmend Ziegelschleifstaub aus der Produktion und Aufbereitung wärmedämmender Planziegel verwendet. Seine Eignung als puzzolanisch reaktiver Zementhauptbestandteil konnte in den Voruntersuchungen einwandfrei nachgewiesen werden.

4 Stoffströme, Probenahmen und Untersuchungen in den Recyclingwerken der Scherer & Kohl GmbH (S+K)

4.1 Motivation

Die nachhaltige Verwertung von Abbruch- und Bauschuttmaterialien steht im Zentrum aktueller Bemühungen, Ressourcen effizienter zu nutzen und die Umweltbelastung durch Bauabfälle zu reduzieren. Mit zunehmenden Anforderungen an die Kreislaufwirtschaft und den Ressourcenschutz gewinnt die

stoffliche Wiederverwertung von Recycling-Materialien eine zentrale Bedeutung. Ziel dieses Forschungsprojekts war es, die Recycling-Stoffströme aus den Werken der Scherer & Kohl GmbH zu charakterisieren und deren Verwertungsmöglichkeiten in der Bau- und Baustoffindustrie – insbesondere als Ersatzstoffe in Zement und Beton – zu untersuchen. Dieses Teilprojekt umfasste eine umfassende Charakterisierung der Materialien, technische Aufbereitungsverfahren sowie Umweltverträglichkeitsprüfungen, um den Nutzen dieser Stoffströme für die Bauwirtschaft zu bewerten und nachhaltige Verwertungsstrategien zu entwickeln.

4.2 Stoffströme und Ausgangsmaterialien

Zwischen 2017 und 2020 wurden in den Recyclingwerken der Scherer & Kohl GmbH jährlich durchschnittlich 395.000 Tonnen Abfälle verarbeitet (**Bild 11**). Davon entfielen etwa 60.000 Tonnen auf Abbruch- und Bauschuttmaterialien. Diese Stoffströme bildeten die Grundlage für die Untersuchungen innerhalb dieses Forschungsprojektes. Um die stoffliche Zusammensetzung und die Eignung für spezifische Anwendungen zu bewerten, wurden die Materialien in zwei Kampagnen beprobt.



Bild 11 Verwertbare, werkspezifische Stoffströme aus den Recyclingwerken der Scherer & Kohl GmbH im Zeitraum 2017-2020

4.3 Aufbereitung von ziegelhaltigem Abbruch- und Bauschutt

4.3.1 Die trockene Aufbereitung von RC-Materialien

Während der Aufbereitung von Abbruch- und Bauschutt in der Trockenaufbereitungsanlage fällt im ersten Produktionsschritt sog. Vorsieb-Material an. Hierbei handelt es sich um die Fraktion 0-20 mm, welche vor dem Brechen des Abbruchmaterials abgesiebt wird.

Im zweiten Produktionsschritt wird das grobe Material > 20 mm mit einem Backen- bzw. Kegelmischer gebrochen und über Förderbänder durch die weiteren Produktionslinien geführt.

Bei der Zerkleinerung des Abbruchschutts fallen Recyclingbrechsande mit der Körnung 0/4 mm an. Im weiteren Verlauf der Aufbereitung werden Metalle und Fremdstoffe abgetrennt und das gebrochene Material in folgende Körnungen fraktioniert: 0/16; 16/32; 32/45 und 45/x (siehe **Bild 12**).

Das Material aus dem Vorsieb und die Brechsande werden dem zu produzierenden Schottergemisch in Teilen beigefügt, um die notwendige Korngrößenverteilung zu erreichen. Da die Schotterprodukte Frostsicherheit gewährleisten müssen, ist der Feinanteil begrenzt. Ferner kann das Material als Auffüllmaterial unter technischen Bauwerken eingesetzt werden.

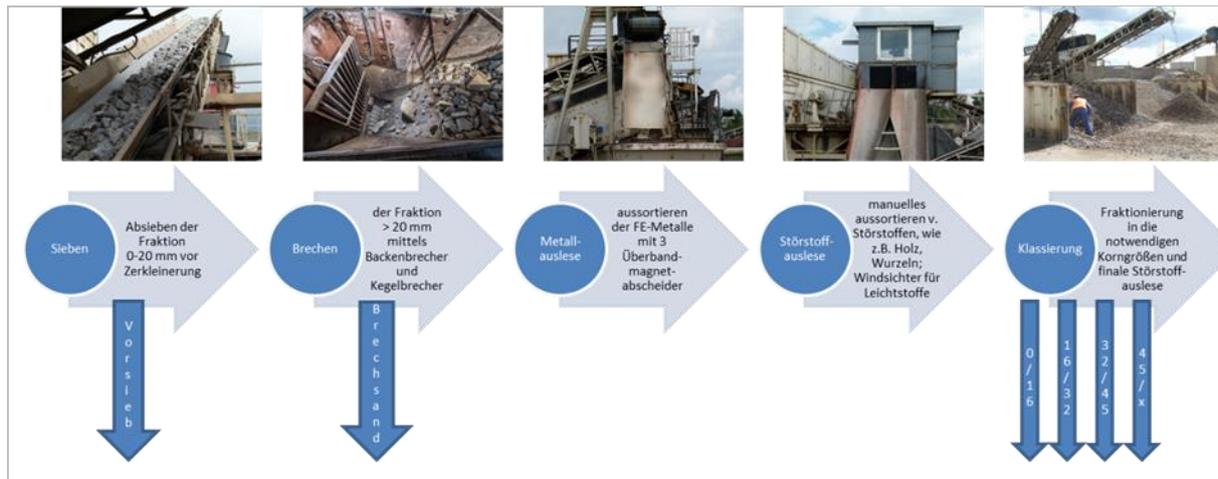


Bild 12 Fließbild der trockenen Aufbereitung von Bauschutt

Anmerkung: Im weiteren Verlauf des Projektes, insbesondere während der Vorbereitung und Durchführung der großtechnischen Betriebsversuche (kritischer Meilenstein), wurden vorrangig ziegelhaltige Recyclingbaustoffe aus der trockenen Aufbereitung der Recyclingwerke verwendet. Die Eignung des ziegelhaltigen Mauerwerksbruchs als Zementhauptbestandteil konnte in den Voruntersuchungen einwandfrei nachgewiesen werden.

4.3.2 Die nasse Aufbereitung von RC-Materialien

Eine mögliche höhere Verwertung des Vorsiebmaterials wäre die Fraktionierung mittels nasser Aufbereitung. Die Fraktionen > 2 mm könnten der Schotterproduktion zugeführt werden ohne die Frostsicherheit zu gefährden. Der abschlämmbare Anteil < 2 mm wird mit Flockungsmitteln gefällt und anschließend mit einer Kammerfilterpresse entwässert. Der dabei entstehende Filterkuchen könnte als möglicher (ziegelhaltiger) Ausgangsstoff für die Zementklinkerherstellung untersucht werden. Aufgrund der feinen Körnung des Filtermaterials ist einerseits davon auszugehen, dass weniger Mahlenergie benötigt würde, als für die Zerkleinerung größerer Brechsande. Andererseits wird thermische Energie zur Trocknung erforderlich werden.

Für erste Untersuchungen wurden in einem Laborversuch über einen Zeitraum von ca. 10 Wochen 14-tägig Proben aus dem Vorsieb durch das vor Ort tätige Fachpersonal genommen. Das Vorsiebmaterial wurde mit Wasser zu einer Suspension vermischt und über einen Siebturm mit folgenden Maschenweiten nass gesiebt: 8 mm/ 5,6 mm/ 4 mm/ 2 mm/ 1 mm/ 0,5 mm/ 0,25 mm/ 0,063 mm. Die Fraktion $< 0,063$ mm wurde als Schlamm über Filtertücher entwässert und als Filterkuchen auf seine Umweltverträglichkeit nach DAfStB-Richtlinie untersucht. Ebenso wurden die Sande (0,063 mm – 2 mm) auf die Eignung untersucht.

Für eine Anwendung als vollständiger Rohmehlersatz in der Zementklinkerproduktion erwies sich der Filterkuchen aus der nassen Aufbereitung als ungeeignet. Seine Oxidgehalte (z. B. CaO, Fe₂O₃ und Al₂O₃) lagen nicht auf dem erforderlichen Niveau. Der Einsatz als Korrekturstoff wäre grundsätzlich denkbar. Dieser Ansatz bedarf weiterer Untersuchungen, insbesondere hinsichtlich der stofflichen und granulometrischen Homogenität, der Restfeuchte, der Zusammensetzung, des Anteils im Rohmaterial und des Energiebedarfs im Klinkerbrennprozess.

4.4 Probenahmen

4.4.1 Ziegelhaltige Proben der ersten Kampagne

In der ersten Kampagne (2021) wurden gezielt aus ziegelhaltigen und ziegelreichen Bauschuttanlieferungen Monochargen separiert. Diese Proben wurden in den Werken Ludwigshafen (KWH) und Mannheim (LAMA) gewonnen, sie repräsentierten sortierte, ziegelhaltige Stoffströme. Das Sortieren der ziegelhaltigen bzw. ziegelreichen Monochargen erforderte einen hohen personellen Aufwand bei der Annahme. An den Annahmestellen wurden die angelieferten Massen durch das Fachpersonal optisch beurteilt. Anlieferungen mit hohem Ziegelanteil wurden separat auf dem jeweiligen Zwischenlager der beiden Recyclingwerke gesammelt. Dementsprechend wurden zusätzliche Lagerflächen für die getrennte Lagerung der Chargen erforderlich.

Vor ihrer Aufbereitung im Recyclingwerk wurden die ziegelhaltigen Bauschuttmaterialien als Ausgangsstoffe (kurz: Ast) bezeichnet, nach ihrer Aufbereitung im Recyclingwerk wurden die Materialien als Brechsande (kurz: BS) bezeichnet.

Anmerkung: Die ziegelhaltigen Materialien aus den Recyclingwerken wurden im Projekt vereinfacht als „Mauerwerksbruch“ mit der Abkürzung „Mab“ bezeichnet und umfassten verschiedene Fraktionen und Aufbereitungsstufen.

Tabelle 4 Probenahmen Mauerwerksbruch (S+K)

Kurzbezeichnung Mauerwerksbruch	Beschreibung der Probe	Werkstandort	Beschreibung des Ausgangsstoffes vor Aufbereitung	Beschreibung von Aufbereitung bzw. Probenahme
Mab 1 Ast	Ausgangsstoff	KWH Ludwigshafen	durch Wiegemeister selektierter/ separat gehaltener besonders ziegelhaltiger Abbruchschutt	
Mab 1 BS	Brechsand	KWH Ludwigshafen		trockene Aufbereitung
Mab 2 Ast	Ausgangsstoff	KWH Ludwigshafen	durch Wiegemeister selektierter/ separat gehaltener besonders ziegelhaltiger Abbruchschutt	
Mab 2 BS	Brechsand	KWH Ludwigshafen		trockene Aufbereitung
Mab 3 Ast	Ausgangsstoff	KWH Ludwigshafen	durch Wiegemeister selektierter/ separat gehaltener besonders ziegelhaltiger Abbruchschutt, im Vergleich mehr Steinzeug "Störstoff" als in den vorangegangenen Proben	
Mab 3 BS	Brechsand	KWH Ludwigshafen		trockene Aufbereitung
Mab 4 BS	Brechsand	KWH Ludwigshafen	Material aus Regelbetrieb Anlieferungen Bauschutt, keine zusätzliche Selektion für Forschungsprojekt	trockene Aufbereitung
Mab 5 Ast	Ausgangsstoff	LAMA Mannheim	durch Wiegemeister selektierter/ separat gehaltener besonders ziegelhaltiger Abbruchschutt	
Mab 5 BS	Brechsand	LAMA Mannheim		trockene Aufbereitung
Mab 6 Ast	Ausgangsstoff	LAMA Mannheim	durch Wiegemeister selektierter/ separat gehaltener besonders	

Kurzbezeichnung Mauerwerksbruch	Beschreibung der Probe	Werkstandort	Beschreibung des Ausgangsstoffes vor Aufbereitung	Beschreibung von Aufbereitung bzw. Probenahme
			ziegelhaltiger Abbruchschutt	
Mab 6 BS	Brechsand	LAMA Mannheim		trockene Aufbereitung
Mab 7 Ast	Ausgangsstoff	LAMA Mannheim	durch Wiegemeister selektierter/ separat gehaltener besonders ziegelhaltiger Abbruchschutt	
Mab 7 BS	Brechsand	LAMA Mannheim		trockene Aufbereitung
Mab 8 Ast	Ausgangsstoff	LAMA Mannheim	durch Kunden relativ Sortenreiner Ziegelbruch, durch Wiegemeister separat gehalten, überwiegend aus einer eigenen Abbruchbaustelle in Mannheim	
Mab 8 BS	Brechsand	LAMA Mannheim		trockene Aufbereitung

Die Proben der ersten Kampagne sind in **Tabelle 4** zusammengefasst. Für erste Untersuchungen an Ausgangsstoffen (Ast) und Brechsanden (BS) aus dem Recycling von ziegelhaltigem Abbruch- bzw. Bauschutt wurden 15 Einzelproben aus den Recyclingwerken entnommen. Die erste Probengewinnung fand im Zeitraum Juni bis August 2021 statt.

Die Monochargen entsprechen keinem kontinuierlich anfallenden Massenstrom in den Recyclingwerken. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde eine zweite Probenahmekampagne mit Mauerwerksbruchproben aus dem Regelbetrieb beider Recyclingwerke (Ludwigshafen und Mannheim) geplant.



Bild 13 Ziegelhaltiger Abbruch- und Bauschutt aus den Recyclingwerken, im Projekt als „Mauerwerksbruch“ (Mab) bezeichnet, Quelle: ReMin-Abschlusskonferenz

Die in der DAfStb-Richtlinie aufgeführten Höchstwerte wurden für alle Chargen aus der ersten Kampagne mit großem Abstand eingehalten. Die Analysedaten der Proben Mab 1 bis Mab 8 gehen aus **Tabelle 6** hervor.

Die zwölf Brechsandproben aus dem Regelbetrieb (Mab 9 bis Mab 20) wurden ebenfalls auf ihre Umweltverträglichkeit untersucht und gemäß der DAfStb-Richtlinie ausgewertet. Die Proben haben (mit Ausnahme Mab 19, November Probe aus Recyclingwerk Mannheim) die Höchstwerte eingehalten und zeigen analytisch wenig Unterschiede (siehe **Tabelle 7**).

Aufgrund des erhöhten PAK-Wertes wurde Mab 19 nicht für weitere Untersuchungen genutzt. Die restlichen Mauerwerksbruchproben wurden dem VDZ zur Mahlung und für Versuchsbetone übersandt.

Tabelle 7 Ergebnisse der Umweltverträglichkeitsuntersuchungen am Mauerwerksbruch der zweiten Probenahmekampagne

Einstufung gemäß Tabelle 1 – DAfStb-Richtlinie Verwendung von siliziumreicher Flugasche und Kesselsand in Betonbauteilen in Kontakt mit Boden, Grundwasser oder Niederschlag														
Feststoff	Höchstwert		Mab 9	Mab 10	Mab 11	Mab 12	Mab 13	Mab 14	Mab 15	Mab 16	Mab 17	Mab 18	Mab 19	Mab 20
PAK	30	mg/kg	4,16	3,27	3,83	16,04	2,98	2,93	21,15	7,66	10,16	13,09	51,93	7,12
PCB	0,5	mg/kg	u.d.B.	0,06	u.d.B.	u.d.B.	u.d.B.	u.d.B.	0,02	0,02	0,02	0,34	u.d.B.	u.d.B.
PCDD/PCDF	100	ng TEQ/kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Arsen	150	mg/kg	9,5	11	11	11	11	11	10	9	9,2	11	13	9,7
Blei	700	mg/kg	9,5	14	10	7,6	23	45	13	18	12	17	10	17
Cadmium	10	mg/kg	0,12	0,16	u.d.B.	0,15	0,17	0,17	0,13	u.d.B.	0,13	0,15	0,18	0,18
Chrom gesamt	600	mg/kg	16	16	15	12	13	19	12	13	13	17	16	14
Kupfer	400	mg/kg	11	44	10	9	11	11	11	13	13	24	9,6	19
Nickel	500	mg/kg	11	9,3	8,1	8,1	8,6	9,2	8,3	8,5	7,8	11	12	8,5
Quecksilber	5	mg/kg	u.d.B.											
Thallium	7	mg/kg	-	-	-	u.d.B.	u.d.B.	u.d.B.	-	-	-	u.d.B.	u.d.B.	u.d.B.
Vanadium	1500	mg/kg	-	-	-	17	17	17	-	-	-	20	19	15
Zink	1500	mg/kg	78	70	64	57	70	170	66	63	110	80	59	150
	TEQ =	(Toxizitätsäquivalent)												

4.6 Auswertungen der Analysen

Die erste Probenahmekampagne zeigte, dass gezielt selektierte, mit Ziegel angereicherte Monochargen eine konsistente stoffliche und chemische Zusammensetzung aufwiesen. Besonders die Proben Mab 4 und Mab 8 – letztere bestehend aus sortenreinen Dachziegeln – zeigten vielversprechende Eigenschaften für den Einsatz als Zementbestandteil. Die Brechsande, die als Hauptprodukt der Trockenaufbereitung entstanden, erfüllten die Anforderungen der LAGA Bauschutt Z1.1 sowie der DAfStb-Richtlinie. Hingegen wies die Probe Mab 19 aus der zweiten Kampagne erhöhte PAK-Werte auf und wurde daher von weiteren Untersuchungen vollständig ausgeschlossen.

Die zur Vorbereitung der Betriebsversuche (2024) hergestellten Produkte (Mab 24) erfüllten neben LAGA Bauschutt und DAfStb-Richtlinie auch die Kriterien der DIN 4226-101 (vgl. Abschnitt 11.4.2).

5 Von der großtechnischen Aufbereitung im Recycling- oder Ziegelwerk zur Analysenprobe in den Forschungsinstituten (LB, S+K)

Die ziegelhaltigen Recyclingbaustoffe, die als Rohstoff für ressourceneffiziente Zemente in Labor- und Betriebsversuchen eingesetzt werden sollten, wurden in den Ziegel- und Recyclingwerken von Leipfinger-Bader sowie Scherer+Kohl vor Ort beprobt. Teilproben wurden für weitere Analysen und Untersuchungen an die Forschungsstellen VDZ und IZF versendet, Rückstellproben für spätere Versuche verblieben in den Werken.

Je nach Herkunft, Zusammensetzung und Art der Aufbereitung der ziegelhaltigen RC-Baustoffe wurden im Projekt R-ZIEMENT folgende Bezeichnungen für die Stoffe bzw. Stoffströme verwendet.

Tabelle 8 Stoffe und Stoffströme aus den Ziegelwerken von Leipfinger-Bader und der Umgebung

RC-Baustoffe/-Produkte	Baustellenrücklauf	Produktionsausschuss	Schleifstaub Planziegel
Herkunft	Baustellen der Umgebung	Ziegelwerke	Planziegelwerke
Zusammensetzung	verschiedene Ziegel, Ziegelprodukte, auch mit Dämmstoff gefüllte Ziegel, gemischte Produkte aus früheren Lieferungen, ggf. vorsortiert, wenige/keine Fremdstoffe neben Ziegel aus LB-Ziegelwerken	ausschließlich Ziegel, Ziegelprodukte, z. T. Ziegelbruch und Ziegelscherben aus den jeweiligen Produktionslinien der LB-Ziegelwerke, auch mit Dämmstoff gefüllte Ziegel, (Regelproduktion)	ausschließlich Ziegelschleifstaub aus den Produktionslinien für Planziegel der LB-Ziegelwerke, Schleifstaub kann Abplatzungen oder sog. „Spritzkorn“ aufweisen (Regelproduktion)
Aufbereitungsverfahren	Recyclinganlage im LB-Ziegelwerk Puttenhausen (PU), (Vorzerkleinerung am Schauelfseparator, Trennung von Dämmstoff und Ziegel, Erzeugung unterschiedlicher Fraktionen durch Siebung, ggf. Nachzerkleinerung)		Schleifanlage
Bezeichnung im Werk	Feinfraktion < 2 mm Feinfraktion < 4 mm Grobfraktion 2 – 16 mm Grobfraktion 4 – 16 mm		Schleifstaub
Bezeichnung im Projekt	Brechsand (0/2) oder Ziegelbrechsand, kurz: BS		Schleifstaub oder Ziegelschleifstaub, kurz: SSt
Bezeichnung der Proben aus den Ziegelwerken	Ziegelbruch, kurz: Zib (z.B. Zib 1 bis Zib 7 aus den Probenahmen 2021)		

Tabelle 9 Stoffe und Stoffströme aus den Recyclingwerken von Scherer+Kohl und der Umgebung

RC-Baustoffe/-Produkte	ziegelreicher / ziegelhaltiger Abbruchschutt	gemischter Abbruchschutt, Bauschutt	Betonbruch (nicht relevant)
Herkunft	Rückbau und Abbruchbaustellen der Umgebung der Recyclingwerke		Betonabbruch
Zusammensetzung	Mauerziegel und möglichst ziegelreicher Mauerwerksbruch, selektiert und vorsortiert (sog. Monochargen) <i>Anmerkung: aus sortenreinen Dachziegeln werden Splitte für die Dachbegrünung hergestellt</i> vorrangig für das Projekt	gemischtes Mauerwerk, Ziegelprodukte aller Art u. v. a. Stoffe, Kalksandstein, Gips, außerdem mögliche Bestandteile: Mörtel, Sande, Porenbeton, Beton, Grobkeramik (z. B. Steinzeug) <i>Anmerkung: Rohre, Kabel, Holzteile, Kunststoff etc. werden vorab aussortiert</i> vorrangig für den Regelbetrieb	
Aufbereitungsverfahren	Vorzerkleinerung während des Abbruchs bzw. Rückbaus auf der Baustelle, auf den Recyclinganlagen in den S+K-Recyclingwerken Ludwigshafen (KWH) und Mannheim (LAMA) mit mehrstufigem Schotterprozess, zweistufige Zerkleinerung in Kegel- und Backenbrechern, mehrstufige Siebungen bzw. Maschenweiten		
Bezeichnung im Werk	Fraktion 0/32 Fraktion 0/45 Fraktion 0/56 Brechsand 0/4 (Brechsand 0/3, Brechsand 0/2), Recyclingbrechsand		

RC-Baustoffe/-Produkte	ziegelreicher / ziegelhaltiger Abbruchschutt	gemischter Abbruchschutt, Bauschutt	Betonbruch (nicht relevant)
Bezeichnung im Projekt	Brechsand/Recyclingbrechsand (0/4), Mauerwerksbrechsand, kurz: BS Ausgangsstoffe <u>vor</u> Zerkleinerung/Siebung, kurz: Ast		
Bezeichnung der Proben aus den Recyclingwerken	Mauerwerksbruch, kurz: Mab (z. B. Mab 1 bis Mab 8 aus den Probenahmen 2021)		

Aus den werkseitig genommenen Proben Ziegelbruch Zib und Mauerwerksbruch Mab wurden Teilproben von ca. 1 kg bis max. 10 kg hergestellt. Die Teilproben aus Mauerwerksbruch (S+K) wurden zunächst an den VDZ, die Teilproben aus Ziegelbruch (LB) an das IFZ geliefert. Nach Aufbereitung und ersten Analysen in den Instituten wurden die Proben erneut geteilt und dem jeweils anderen Institut für ausgewählte Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Ziegeleigenschaften (z. B. Reaktivität der Tone) wurden im IZF, Zementeigenschaften (z. B. Granulometrie) wurden im VDZ untersucht und ausgewertet. Somit wurde sichergestellt, dass die ziegelhaltigen RC-Stoffströme über eine Laufzeit von ca. 30 Monaten kontinuierlich untersucht werden konnten, um eine Charakterisierung möglichst aller Ausgangsstoffe zu gewährleisten.

Themenschwerpunkt B: Ziegel als puzzolanischer Zementhauptbestandteil

6 Charakterisierung ziegelhaltiger RC-Baustoffe (VDZ Technology gGmbH, Institut für Ziegelforschung Essen e.V., IZF)

6.1 Charakterisierung der puzzolanischen Reaktivität ziegelhaltiger RC-Baustoffe mittels Hydratationswärme (VDZ)

Die Untersuchung der hydraulischen und puzzolanischen Reaktivität von Zementhauptbestandteilen und Recyclingmaterialien erfolgte im VDZ i.d.R. anhand der Hydratationswärme bei 40 °C für 3 und 7 Tage (TAM-Air, DIN EN 196-11) bzw. des chemisch gebundenen Wassers durch Glühen bei 350 °C (DIN EN 196-2). Die zu untersuchende Probe enthält das entsprechende RC-Material, Calciumhydroxid und einen Alkaliaktivator. Das Verfahren und seine Auswertung folgen der ASTM C1897-20. Der Test ermöglicht eine Bewertung der chemischen Reaktivität der Ziegelmaterialien und ziegelhaltigen Recyclingmaterialien sowie deren Beitrag zur Druckfestigkeit in Zementen.

Tabelle 10 Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Reaktivität von Ziegelbruch (Zib erste Serie)

Ziegelbruch	Reaktivität nach ASTM Hydratationswärme Prüfmalter 3d	Reaktivität nach ASTM Hydratationswärme Prüfmalter 7d	Reaktivität nach ASTM Chemisch gebundenes Wasser	Reaktionsfähige Kieselsäure
	J/g	J/g	g	M.-%
Zib 1	78,3	115,7	n. b.	23,5
Zib 2	109,9	142,8	n. b.	23,6
Zib 3	198,9	250,3	n. b.	26,8
Zib 4	129,8	168,8	5,43	24,3
Zib 5	95,1	123,8	5,15	n. b.
Zib 6	82,8	117,2	4,60	n. b.
Zib 7	77,0	137,5	4,92	n. b.
<i>Ergänzung zu Abschnitt 11 und Abschnitt 12 (Großtechnische Betriebsversuche):</i>				
Zib 23 (D. für BV 1)	136,0	188,0	n. b.	28,3
Zib 23 (Rückstand)	113,0	172,0	n. b.	n. b.

n. b.: nicht bestimmt, D.: Siebdurchgang bei 125 µm; BV: für Betriebsversuche ausgewähltes Material, homogener und speziell aufbereiteter Stoffstrom

Tabelle 11 Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Reaktivität von Mauerwerksbruch (Mab erste Serie)

Mauerwerksbruch	Reaktivität nach ASTM Hydratationswärme Prüfmalter 3d	Reaktivität nach ASTM Hydratationswärme Prüfmalter 7d	Reaktivität nach ASTM Chemisch gebundenes Wasser	Reaktionsfähige Kieselsäure
	J/g	J/g	g	M.-%
Mab 1	61,8	79,9	2,49	16,37
Mab 2	44,6	58	2,12	13,81
Mab 3	53,6	80,2	2,69	15,8
Mab 4	27,7	32,6	2,17	n. b.
Mab 5	56,4	80,2	2,58	14,37
Mab 6	50,6	66,8	2,07	14,11
Mab 7	47,6	67,6	n. b.	19,44
Mab 8	88,4	125,7	n. b.	18,9
<i>Ergänzung zu Abschnitt 11 und Abschnitt 12 (Großtechnische Betriebsversuche):</i>				
Mab 24 (für BV 2)	43,0	55,0	n. b.	10,6

n.b.: nicht bestimmt; BV: für Betriebsversuche ausgewähltes Material, homogener und speziell aufbereiteter Stoffstrom, keine Monocharge

Im Projekt wurden nunmehr ziegelreiche RC-Materialien (z. B. Ziegelbruch Zib aus Ziegelwerken) und ziegelhaltige RC-Materialien (z. B. Mauerwerksbruch Mab aus Recyclingwerken) gemäß ASTM

C1897-20 untersucht. **Tabelle 10** und **Tabelle 11** zeigen Ergebnisse der ersten Probenserien, auch im Vergleich zum Gehalt der reaktiven Kieselsäure (vgl. Abschnitt 2.3).

Zur Einordnung der Ergebnisse wurden die ziegelhaltigen Proben mit Proben aus reinen calcinierten Tonen hinsichtlich ihrer Hydratationswärme verglichen. [11] [12] [13] [14] Der Bereich der im VDZ ermittelten Werte für calcinierte Tone liegt zwischen 200 und 650 J/g und damit deutlich höher als die Werte für Ziegelbruch Zib. In der ersten Probenserie wies die Probe Zib 3 die höchste Hydratationswärme sowie den höchsten Gehalt an reaktiver Kieselsäure auf. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass unter Verwendung von Zib 3 bzw. der aus diesem Ziegelwerk stammenden Qualitäten eine vergleichsweise hohe puzzolanische Reaktivität im Mörtel oder Beton erwartet werden könnte.

Zahlreiche Proben Ziegelbruch Ausgangsstoffe (Ast), Ziegelbrechsand (BS), Ziegel-Gesteinskörnungen (GK) bzw. Ziegelschleifstaub (SSt) wurden untersucht, ausgewertet und verglichen. **Bild 14** bis **Bild 16** zeigen Ergebnisse der Hydratationswärme im Prüfaltest von drei und sieben Tagen. Die Markierung bei einer Hydratationswärme von 200 J/g stellt vergleichend die untere Grenze des Ergebnisbereiches calcinierter Tone dar. Die höchsten Werte wurden an den Ziegelproben aus dem Ziegelwerk Schönlind (SL) erzielt. Insbesondere die Schleifstaubproben erreichten im Prüfaltest von sieben Tagen Werte im Bereich calcinierter Tone.

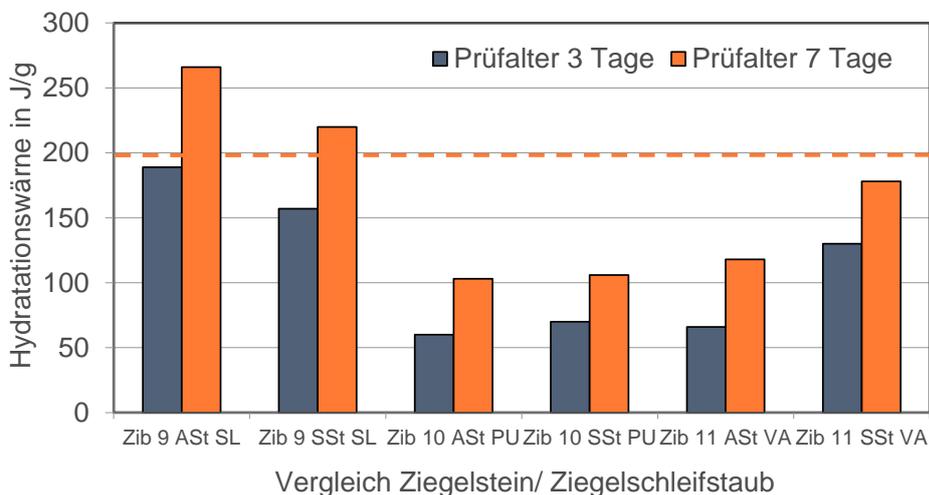


Bild 14 Messung der Hydratationswärme zur Untersuchung der Reaktivität von RC-Materialien (Ausgangsstoffe Ziegelbruch (Ast) und Ziegelschleifstaub (SSt)) gemäß ASTM C1897-20

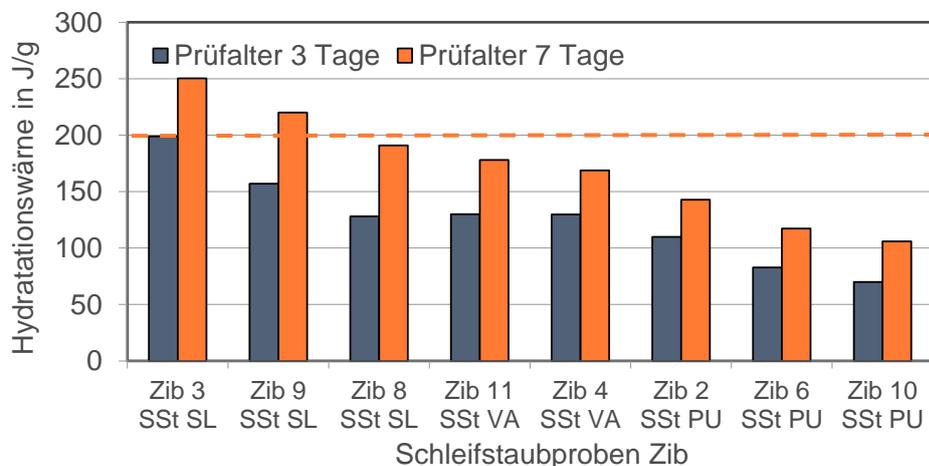


Bild 15 Messung der Hydratationswärme zur Untersuchung der Reaktivität von RC-Materialien (Schleifstaub SSt) gemäß ASTM C1897-20

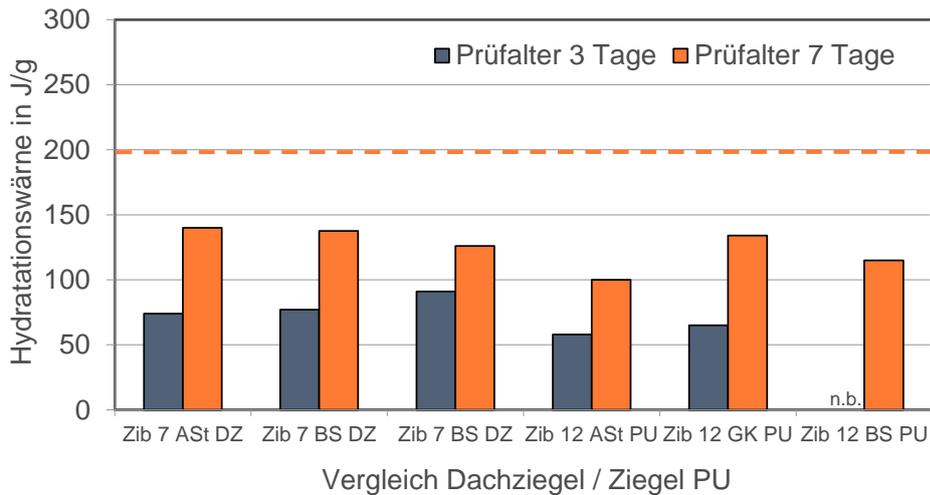


Bild 16 Messung der Hydrationswärme zur Untersuchung der Reaktivität von RC-Materialien (Ausgangsstoffe Ziegelbruch Ast, Ziegelbrechsande BS, Gesteinskörnungen GK, Dachziegel DZ) gemäß ASTM C1897-20

Die Ergebnisse der anderen Ziegelproben lagen mit 100 J/g bis 200 J/g auf einem geringeren Niveau. Dennoch wurden an allen Ziegelproben höhere Werte für die Hydrationswärme ermittelt als an den meisten Proben Mauerwerksbruch aus den Recyclingwerken, die überwiegend bei < 100 J/g lagen. Die Ergebnisse der ASTM-Untersuchungen am Mauerwerksbruch Mab fasst **Bild 17** zusammen.

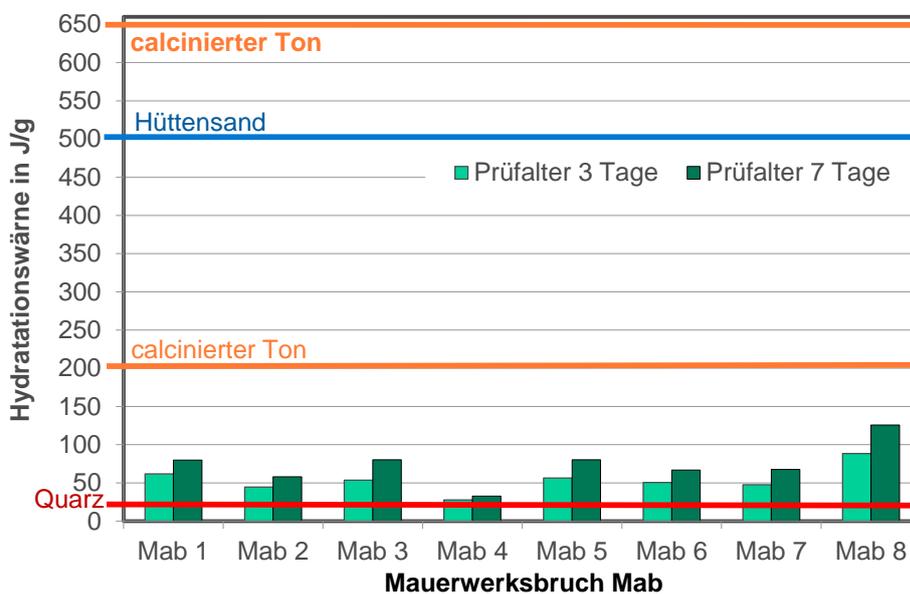


Bild 17 Messung der Hydrationswärme zur Untersuchung der Reaktivität von RC-Materialien (Mauerwerksbruch Mab 1 bis Mab 8) gemäß ASTM C1897-20, Vergleich mit anderen mineralischen Ausgangsstoffen (Quarz und Hüttensand sind als Einzelwerte abgebildet)

Aus **Bild 17** geht hervor, dass mit Mauerwerksbruch Mab 8 (sortierte Ziegel aus Monocharge) eine Hydrationswärme in der Größenordnung von Ziegelbruch Zib entstand. Diese Probe wies im Vergleich aller acht Mab-Proben die höchste Reaktivität auf. Der gemischte ziegelhaltige Mauerwerksbruch zeigte durchweg geringere Werte bzw. Reaktivitäten. Ergebnisse im Vergleich zu Quarzsand wurden mit Mab 4, dem ziegelabgereicherten RC-Material aus dem Regelbetrieb, erzielt.

Zur Vorbereitung großtechnischer Betriebsversuche sollte in weiteren Projektschritten geklärt werden, ob und wie die Reaktivität von Ziegel- oder Mauerwerksbruch durch Sortierung, Klassierung oder Zerkleinerung gesteigert werden und zu einer höheren Leistungsfähigkeit von Versuchszementen führen kann

6.2 Charakterisierung ziegelhaltiger RC-Baustoffe mittels Farbmessung - Bestimmung der $L^*a^*b^*$ -Werte und Entwicklung eines Modells zur Bestimmung des Ziegelgehalts (IZF)

Heutzutage werden für Mauerwerk hauptsächlich Baustoffe wie Ziegel, Kalksandstein und Porenbeton verwendet. Ein gemischter Mauerwerkbruch (MWB) aus dem Rückbau oder aus dem Recycling kann darüber hinaus auch Bestandteile von Außen- und Innenputzen sowie anhaftendem Mauermörtel enthalten. Als Verunreinigungen können z. B. Beton, Fliesen oder Natursteine im Stoffstrom auftreten. Jeder Baustoff besitzt ein für ihn charakteristisches Farbspektrum. Verglichen mit anderen mineralischen Wandbaustoffen weist der Ziegel ein recht großes Farbspiel von hellorange bis dunkelrot auf, welches von der Tonmineralogie und der Brenntemperatur bestimmt wird und auf der Hämatitbildung während des Brandes beruht. Da der Ziegel der einzige rote Wandbaustoff ist, lässt er sich farblich sehr gut von den anderen Baustoffen (Kalksandstein, Porenbeton, Putze) unterscheiden, da diese kalk- oder zementgebunden sind und kaum färbende Oxide enthalten.

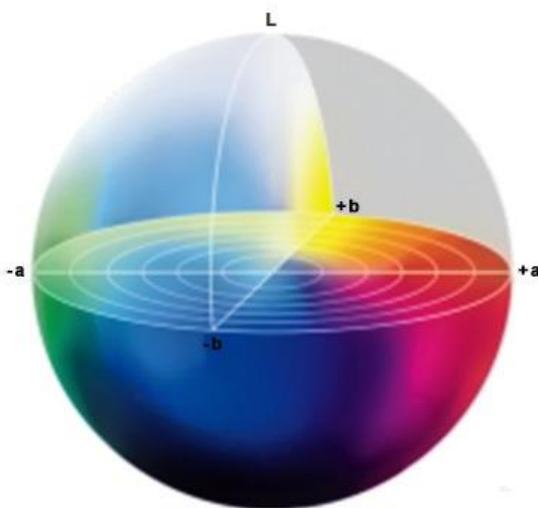


Bild 18

$L^*a^*b^*$ -Farbraum

Zur farblichen Charakterisierung von Mauerwerkbestandteilen eignet sich der $L^*a^*b^*$ -Farbraum, der alle wahrnehmbaren Farben beschreibt, wobei jede Farbe im Farbraum durch einen Farbtort mit den kartesischen Koordinaten L^* , a^* und b^* definiert ist (siehe **Bild 18**). Die a^*b^* -Koordinatenebene wurde in Anwendung der Gegenfarbentheorie konstruiert. Auf der a^* -Achse liegen sich Grün (negative Werte) und Rot (positive Werte) gegenüber, die b^* -Achse verläuft zwischen Blau (negative Werte) und Gelb (positive Werte). Komplementäre Farbtöne stehen sich jeweils um 180° gegenüber, in ihrer Mitte (dem Koordinatenursprung $a^* = 0$, $b^* = 0$) ist Grau. Die L^* -Achse beschreibt die Helligkeit der Farbe mit Werten von 0 bis 100 und sie steht im Nullpunkt senkrecht auf der a^*b^* -Ebene. Sie kann auch als Neutralgrauachse bezeichnet werden, denn zwischen den Endpunkten Schwarz ($L^* = 0$) und Weiß ($L^* = 100$) sind alle unbunten Farben (Grautöne) enthalten. Proben mit einem hohen Anteil an Ziegel sollten demnach einen größeren a^* -Wert aufweisen als Proben, die weniger Ziegel enthalten.

Die $L^*a^*b^*$ -Werte der MWB-Proben wurden mit einem Farbmessgerät an Pulvern bestimmt, die auf $< 500 \mu\text{m}$ gemahlen wurden (siehe **Bild 19**). Das Messverfahren ermöglicht es, Farben reproduzierbar zu definieren und Unterschiede zwischen zwei Farben durch Berechnung eines ΔE zu quantifizieren. Die graphische Darstellung der Messwerte im $L^*a^*b^*$ -Diagramm zeigt einen sichelförmigen Verlauf der

Ziegelproben. Hintermauerziegel werden bei niedrigen Temperaturen (ca. 850°C – 950°C) gebrannt, was in Verbindung mit kalkhaltigen Tönen zu helleren Brennfärbungen führt. Dachziegel werden mit kalkfreien Tönen hergestellt und bei höheren Temperaturen (ca. 950°C – 1050°C) gebrannt, wodurch sie dunkler sind. Bei keramischen Klinkern (z. B. Verblendmauerwerk) führen noch höhere Brenntemperaturen (> 1050°C) zu noch dunkleren Brennfärbungen. Zement-, kalk- und gipsgebundene Baustoffe weisen geringe Farbwerte bei hoher Helligkeit auf. Die MWB-Proben bewegen sich innerhalb des Bereichs der von den Ziegelproben und den farblosen Bindemitteln begrenzt wird. Daher ist es wahrscheinlich, dass sich die MWB-Proben aus den ihren Farbraum begrenzenden Baustoffen zusammensetzen.

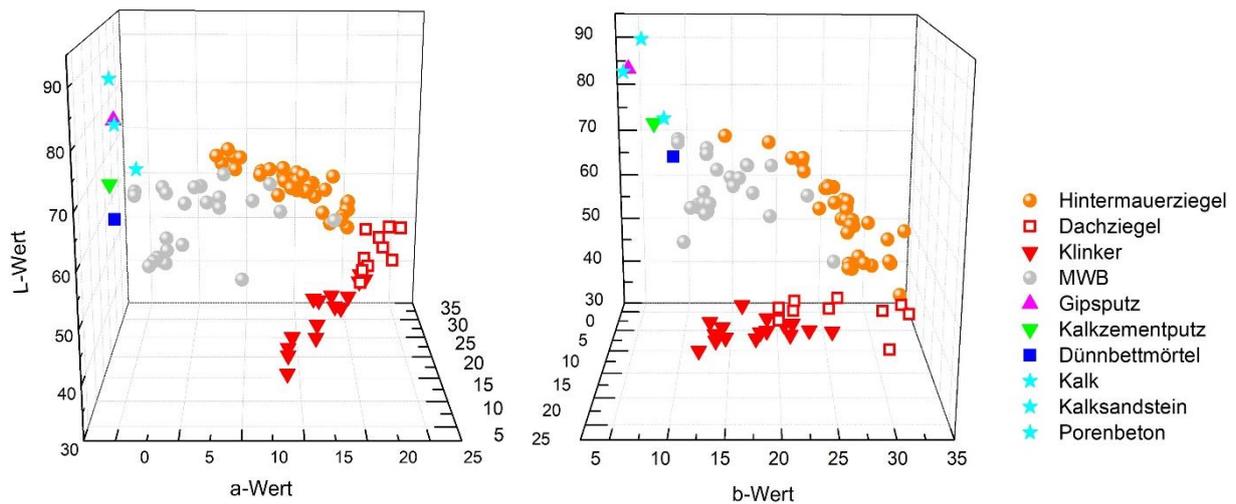


Bild 19 Lage verschiedener Ziegeltypen (Hintermauerziegel, Dachziegel, Klinker) und weiterer Baustoffe für Mauerwerk im L*a*b*-Farbraum, MWB: gemischter Mauerwerkbruch, Klinker: hochgebranntes keramisches Ziegelprodukt

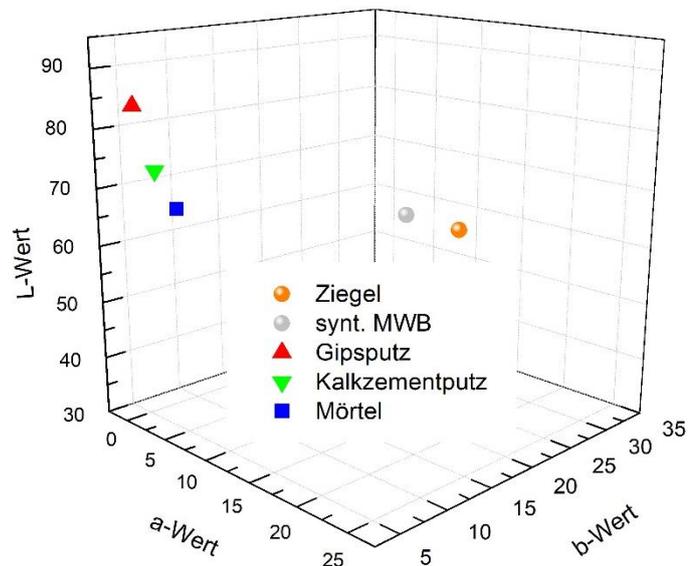


Bild 20 Probekörper aus beidseitig verputztem Ziegelmauerwerk (links) und Lage der einzelnen Bestandteile und des synthetischen Mauerwerkbruchs im L*a*b*-Farbraum (rechts)

Da der Ziegel der einzige Bestandteil mit puzzolanischen Eigenschaften ist, sollte das puzzolanische Potential eines ziegelhaltigen Mauerwerkbruchs mit dessen Ziegelgehalt linear korrelieren. Eine möglichst genaue messtechnische Bestimmung des Ziegelgehalts ist daher von großer Bedeutung. Da

sich die (Misch-)Farbe eines MWB aus den Farben der einzelnen Bestandteile zusammensetzt und Ziegel der einzige rote Wandbaustoff ist, wurde die Hypothese aufgestellt, dass sich mittels Farbmessung der Ziegelanteil im MWB bestimmen lässt. Zur Überprüfung der Hypothese wurde zunächst ein synthetischer Mauerwerksbruch (MWB) aus einem Prüfkörper aus Ziegelmauerwerk hergestellt. Es wurden sowohl die Farben der einzelnen Bestandteile (Ziegel, Mörtel, Außen- und Innenputz) als auch des synthetischen Mauerwerksbruchs (MWB) gemessen (siehe **Bild 20**). Der synthetische MWB bewegt sich im Farbraum weg vom Ziegel und hin zu den farblosen Baustoffen.

Für die Bestimmung des Ziegelgehalts durch Messung der Farbe eines MWB ist es wichtig zu wissen, ob die Farbe das Resultat einer gravimetrischen oder volumetrischen Mischung ist, da die Bestandteile unterschiedliche Rohdichten haben. Da Abmessung und Rohdichte der Putz- und Mörtelschichten und des Ziegels bekannt waren, konnte sowohl die volumetrische als auch die gravimetrische Zusammensetzung des synthetischen MWB berechnet werden (siehe **Tabelle 12**). Da der Ziegel eine höhere Rohdichte hat als die Putze oder der Mörtel, ist sein Anteil in M.-% größer als sein Anteil in Vol.-%.

Tabelle 12 Volumetrische und gravimetrische Zusammensetzung des synthetischen Mauerwerksbruchs

Bestandteile	Volumen [cm ³]	Volumen [%]	Rohdichte [g/cm ³]	Masse [g]	Masse [%]
Außenputz	13876	12,5	1,19	16540	10,4
Innenputz	8325	7,5	1,24	10307	6,5
Mörtel	1081	1,0	0,99	1065	0,7
Ziegel	87552	79,0	1,50	131328	82,5

Basierend auf den Farbwerten der einzelnen Bestandteile wurde die Farbe des synthetischen MWB volumetrisch und gravimetrisch berechnet und mit dem gemessenen Wert verglichen. Die gravimetrische Berechnung stimmt nahezu exakt mit dem tatsächlichen Messwert überein (siehe **Tabelle 13**). Somit konnte gezeigt werden, dass sich die Farbe eines MWB aus den Farben der einzelnen Bestandteile gravimetrisch zusammensetzt.

Tabelle 13 Vergleich der aus der gravimetrischen Zusammensetzung berechneten und der gemessenen Farbe des synthetischen Mauerwerksbruchs (MWB)

	Außenputz	Innenputz	Mörtel	Ziegel	synthetischer MWB	
Anteil [M.-%]	10,4	6,5	0,7	82,5	berechnet	gemessen
L	72,5	84,3	65,21	61	63,8	64,1
a	-0,26	0,52	-0,22	14,8	12,2	12,3
b	6,63	4,14	8,68	26,5	22,9	22,7

Um den Ziegelanteil in einem unbekanntem MWB zu bestimmen, müssen die Farben der einzelnen Bestandteile bekannt sein. Für ein Messverfahren wurde daher ein vereinfachtes Modell entwickelt, bei dem MWB nur aus farbigem Ziegel und eher farblosen Baustoffen besteht (Porenbeton, Kalksandstein, Putze, Mörtel). Wie in **Bild 19** zu sehen, variiert die Farbe von Ziegeln in einem weiten Bereich. Da Dachziegel eher sortenrein zurückgewonnen werden und genauso wie Klinker aufgrund ihrer höheren Brenntemperatur eine geringere Reaktivität aufweisen, wurden für das Modell nur Hintermauerziegel berücksichtigt. Die Punktwolke der Hintermauerziegel wurde vereinfachend durch eine Regressionskurve ersetzt. Um diese zu berechnen, wurde zunächst eine Korrelationsmatrix der drei Werte L^* , a^* und b^* erstellt (siehe **Bild 21**). L^* und b^* korrelieren am besten mit a^* , weshalb a^* in dem Modell als unabhängige Variable gewählt wurde und L^* und b^* als abhängige Variablen.

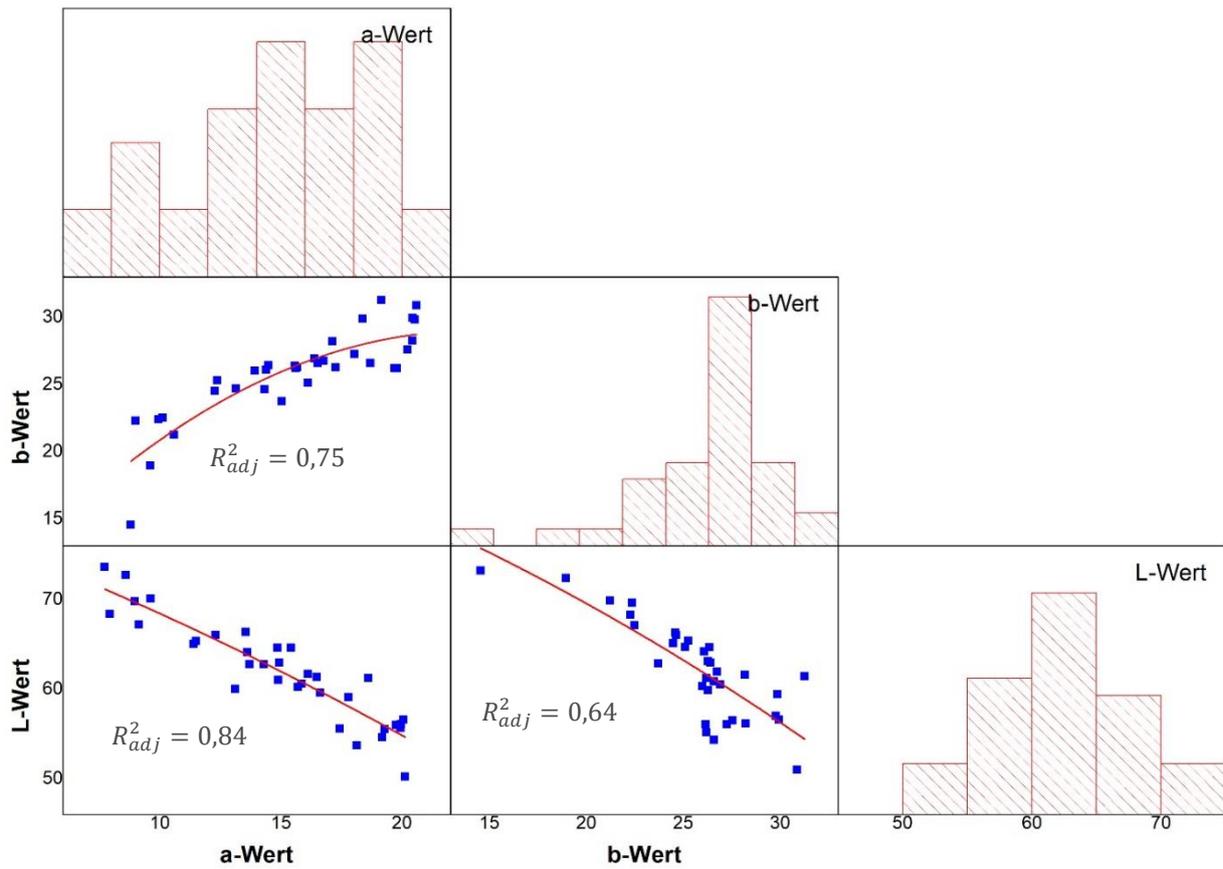


Bild 21 Korrelationsmatrix von L*a*b*

Zur Erstellung der Regressionskurve wurden L* und b* basierend auf dem gemessenen a* gemäß folgender Formeln berechnet:

$$b^* = -0,0444 * a^{*2} + 2,0006 * a^* + 6,4447 \quad \text{(Formel 1)}$$

$$L^* = -0,0132 * a^{*2} - 0,9625 * a^* + 79,401 \quad \text{(Formel 2)}$$

Daraus ergibt sich die Regressionskurve, wie sie in **Bild 22** dargestellt ist.

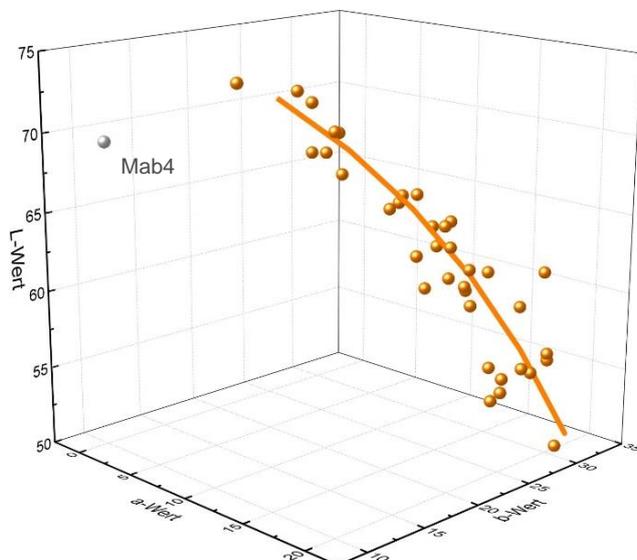


Bild 22 Regressionskurve: basierend auf Formel 1 und Formel 2 berechnete Mittelwerte für Ziegel mit einem a* von 7 bis 21

Für das Modell wurde angenommen, dass sich die unterschiedlichen Farben der Hintermauerziegel nur auf dieser Kurve bewegen können. Anfang und Ende der Kurve werden durch den niedrigsten bzw. höchsten gemessenen Wert von a^* der Hintermauerziegel bestimmt. Außerdem wurde die Probe „Mab 4“ (Stoffstrom Mauerwerkbruch aus dem Regelbetrieb Scherer + Kohl), die sich im Bereich der Putze und Mörtel befindet, als „ziegelfreier MWB“ definiert.

Mit diesen Punkten kann eine Ebene aufgespannt werden, innerhalb derer Proben liegen, die sich aus Hintermauerziegeln unterschiedlicher Farben und farblosen, ziegelfreien Baustoffen in verschiedenen Mischungsverhältnissen zusammensetzen. Zur Darstellung der Ebene werden L^* , a^* und b^* der Mischungen aus Ziegel und Mab4 berechnet (**Bild 23**). Das Diagramm enthält auch die Farbwerte der MWB-Proben, deren Anordnung sich grob in zwei Gruppen einteilen lässt. Eine Gruppe liegt in einem weiten Bereich in oder nahe bei der berechneten Ebene. Hier ist davon auszugehen, dass diese Proben größtenteils farblose Baustoffe und Hintermauerziegel enthalten. Die andere Gruppe bildet einen Punkthaufen und liegt relativ weit von der Ebene entfernt in einem Bereich, der dunkel und farblos ist. Dies lässt auf eine größere Verunreinigung mit Störstoffen schließen.

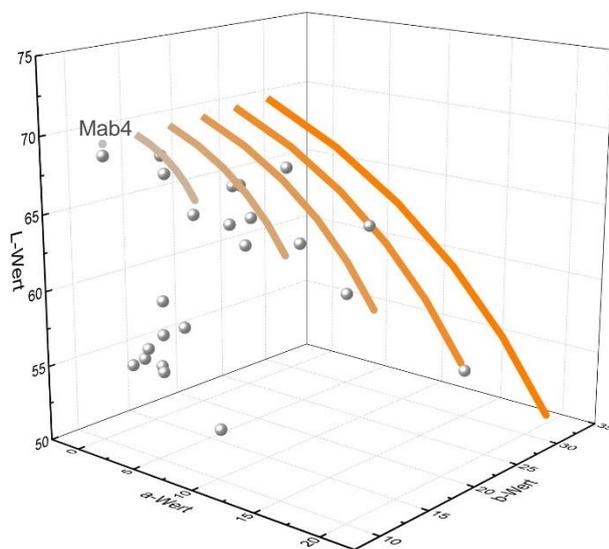


Bild 23

Lage der gemessenen MWB-Proben im $L^*a^*b^*$ -Farbraum. Die Linien kennzeichnen Bereiche mit unterschiedlichem Ziegelgehalt in Schritten von 20 % von 0% (grau) bis 100% Ziegel (orange)

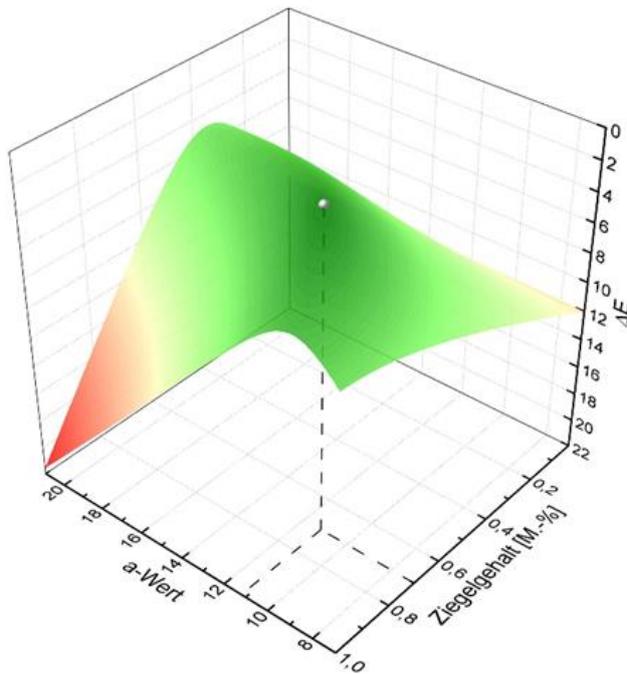
Zur Bestimmung des Ziegelgehalts wurde berechnet, für welchen Ziegelgehalt x sich ein minimaler Abstand der gemessenen MWB-Probe zur Ebene ergibt. Bei der verwendeten Formel handelt es sich um den räumlichen Pythagoras:

$$\Delta E_{min} = \sqrt{\left(L_{a_x}^* - L_{gem}^*\right)^2 + \left(a_x^* - a_{gem}^*\right)^2 + \left(b_{a_x}^* - b_{gem}^*\right)^2} \quad (\text{Formel 3})$$

a^* von 7 bis 21

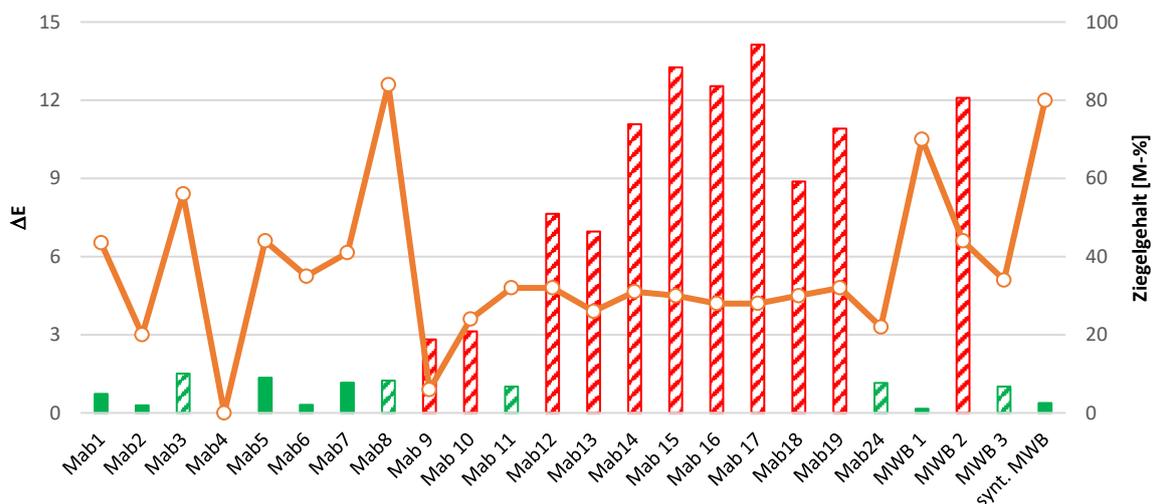
x von 0 (entspricht 100 % Mab4) bis 100 % Ziegel

In **Bild 24** ist dieser Vorgang grafisch dargestellt. Für a^* wurden Mischungen mit 0 bis 100 % Ziegel berechnet. a^* wurde in Schritten von 0,2 variiert und der Ziegelgehalt x in Schritten von 0,02. ΔE_{min} stellt den Ziegelgehalt des MWB dar.

**Bild 24**

Graphische Darstellung der Berechnung des Ziegelgehalts. Die farbige Fläche stellt den berechneten Abstand der gemessenen Farbwerte des MWB zur Ebene aus **Bild 23** als Funktion von a^* und Ziegelgehalt x dar (siehe Formel 3). Der Ziegelgehalt, bei dem der niedrigste ΔE -Wert bestimmt wurde, wird als Ziegelgehalt der MWB-Probe definiert. ΔE_{\min} sollte innerhalb des a^* -Bereichs von 7 bis 21 liegen.

Der Abstand der einzelnen MWB-Proben zu der Ebene ist in **Bild 25** dargestellt. Neben den Proben Mab1 bis Mab24 aus diesem Projekt (Probenahme S+K) wurden auch Proben aus dem IGF-Vorhaben 20920 N [6] in die Auswertung mit einbezogen, um den Datensatz zu vergrößern (MWB 1 bis MWB 3). Bei Mab4 sind der Abstand und der Ziegelgehalt 0, da diese Probe als „ziegelfreier MWB definiert“ und zur Berechnung der Ebene benutzt wurde. Bei manchen Proben sind die Abweichungen von der Ebene der Hintermauerziegel sehr groß, was bedeutet, dass diese Proben neben farblosen Bestandteilen auch viele farbige Störstoffe enthalten (siehe auch **Bild 23**). Es können somit keine sicheren Aussagen über ihre Zusammensetzung getroffen werden.

**Bild 25**

Abstand der gemessenen $L^*a^*b^*$ -Werte von der berechneten Ebene (Primärachse ΔE , Balken) sowie Ziegelgehalt des Mauerwerksbruchs (Sekundärachse, Kurve). Die MWB-Proben mit rot markierten Balken haben ein $\Delta E > 2$ und wurden aussortiert. Die MWB-Proben mit grün gestrichelten Balken der haben ein $\Delta E < 2$ und wurden trotz eines a -Werts > 21 für die weitere Auswertung verwendet.

Für die weitere Auswertung wurden nur solche Proben berücksichtigt, die ein $\Delta E < 2$ aufweisen. Die nicht berücksichtigten Proben sind rot markiert. Die gestrichelten Balken zeigen an, dass sich der berechnete minimale ΔE -Wert an der Grenze des festgelegten Bereichs für a^* befindet. In allen Fällen liegt der berechnete Punkt bei einem a^* von 21, es wurde also der obere Grenzwert erreicht. Durch eine Erweiterung des Bereichs auf über 21 würden noch niedrigere ΔE -Werte erzielt und dementsprechend auch andere Ziegelgehalte berechnet. Da eine solche Änderung aber der Grundannahme des Modells widerspricht und die Formeln auch nur für den Bereich von 7 bis 21 gefittet wurden, wurde eine solche Anpassung nicht vorgenommen.

Drei Proben weisen einen hohen berechneten Ziegelgehalt von über 70 M.-% auf. Dabei handelt es sich um die drei Proben, die auch in **Bild 19** die geringste Entfernung zur Punktwolke der Hintermauerziegel haben. Der genaue Ziegelgehalt ist aber nur vom synthetischen MWB bekannt und liegt bei 82,5 M.-%. Berechnet wurde ein Gehalt von 80 M.-%. Das Ergebnis des Modells zeigt für diese Probe eine sehr gute Übereinstimmung mit dem tatsächlichen Ziegelgehalt.

6.3 Chemische Charakterisierung ziegelhaltiger RC-Baustoffe (IZF, VDZ)

Da sich die Farbe eines MWB aus den Farben der einzelnen Bestandteile zusammensetzt, sollte dies auch für dessen chemische Zusammensetzung gelten. Von der Wand aus **Bild 20** wurden daher auch die einzelnen Bestandteile und der daraus hergestellte synthetische MWB chemisch analysiert (siehe **Tabelle 14**). Da der Mörtelgehalt nur sehr gering war, wurde auf eine Analyse verzichtet und der Anteil an Kalkzementputz entsprechend erhöht.

Tabelle 14 Vergleich der chemischen Analyse der Bestandteile der Ziegelwand mit der berechneten und gemessenen Zusammensetzung des synthetischen MWB

Bestandteile	Ziegel	Außenputz	Innenputz	synthetischer MWB	
				berechnet	gemessen
Anteil [M.-%]	82,5	11,1	6,4	berechnet	gemessen
SiO ₂	54,7	59,27	1,7	51,8	53,7
Al ₂ O ₃	13,98	3,45	0,62	12,0	11,6
Fe ₂ O ₃	4,76	1,16	0,15	4,1	4,0
CaO	15,26	21,81	40,17	17,6	16,8
MgO	2,66	0,72	0,82	2,3	2,3
K ₂ O	2,72	1,06	0,07	2,4	2,4
Na ₂ O	0,66	0,44	0	0,6	0,7
SO ₃	0,49	2,03	40,37	3,2	2,4
GV	3,54	9,63	15,77	5,0	5,1

Die gemessene chemische Zusammensetzung stimmt gut mit der berechneten überein. Daher könnte auch die chemische Zusammensetzung von MWB ein Hinweis auf dessen Ziegelgehalt sein, da für die Herstellung von Baustoffen wie Kalksandstein, Porenbeton, Putz oder Mörtel wenig bis gar keine Tone als Ausgangsrohstoffe verwendet werden. Die Gegenüberstellung von vier Oxiden, die speziell in Tonbestandteilen (wie z.B. Tonmineralen und Glimmern) vorkommen, mit dem berechneten Ziegelgehalt zeigt eine sehr gute lineare Korrelation (siehe **Bild 26**), insbesondere für den Al₂O₃-Gehalt mit einem Bestimmtheitsmaß R von 95 %. Dies legt den Schluss nahe, dass die berechneten Ziegelgehalte mit den tatsächlichen Werten gut übereinstimmen und das Modell geeignet ist.

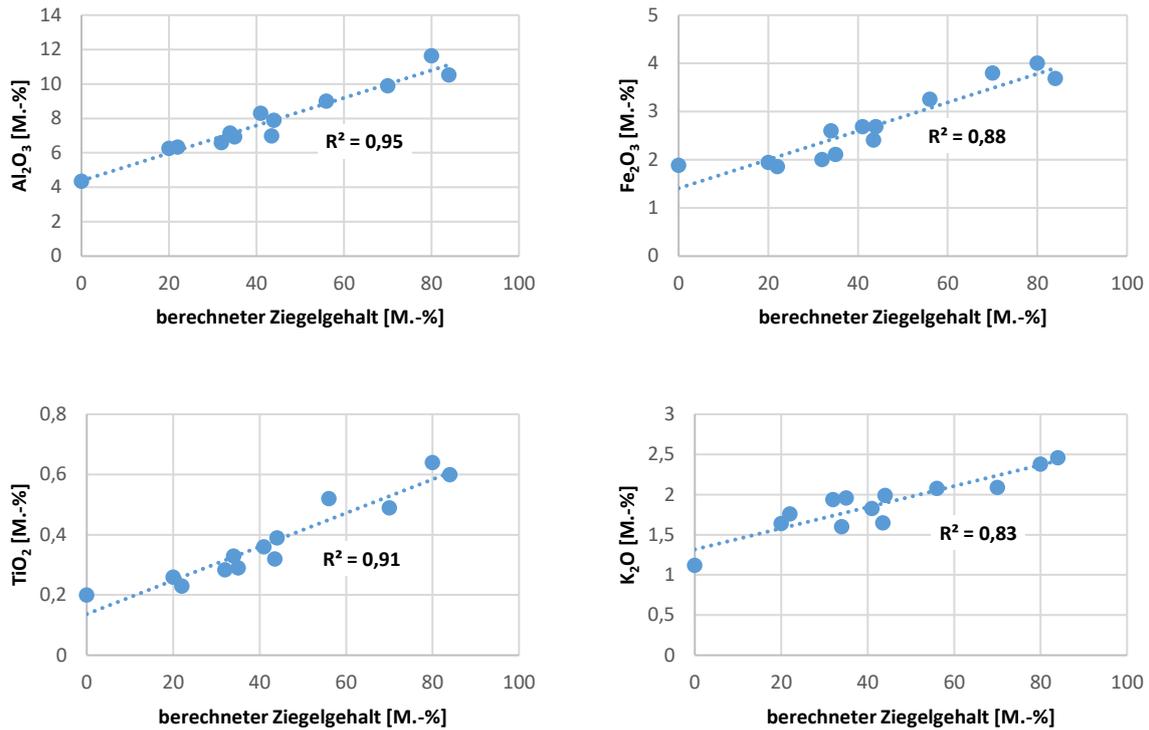


Bild 26 Korrelation des berechneten Ziegelgehalts mit den für Tonminerale charakteristischen Oxiden der MWB-Proben, die mittels RFA bestimmt wurden

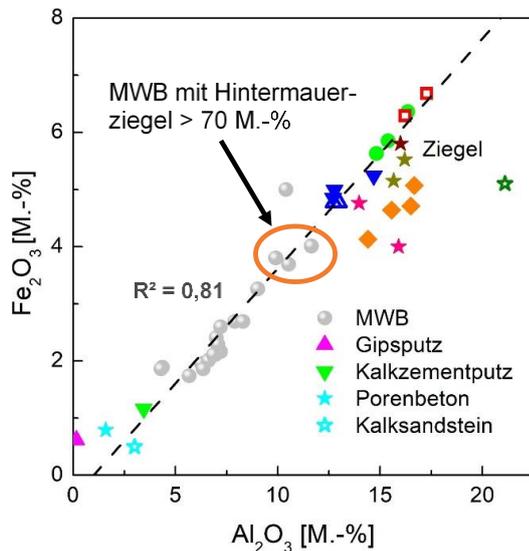


Bild 27

Lage aller MWB-Proben, verschiedener Ziegelproben und weiterer Baustoffe im Fe_2O_3/Al_2O_3 -Diagramm

In **Bild 27** ist der Fe_2O_3 -Gehalt dem Al_2O_3 -Gehalt der MWB-Proben gegenübergestellt. Neben den MWB-Proben enthält die Darstellung auch die Daten verschiedener Ziegel und sonstiger Baustoffe für Mauerwerk. Das Fe_2O_3/Al_2O_3 -Verhältnis der MWB-Proben zeigt einen linearen Verlauf. Die Regressionsgerade wurde für die MWB-Proben gefittet und in die Bereiche höherer und niedrigerer Al_2O_3 -Gehalte extrapoliert. Im Bereich höherer Al_2O_3 -Gehalte befinden sich die Ziegel. Gleiche Symbole stehen für das gleiche Ziegelwerk. Es fällt auf, dass sich auch die meisten der Ziegelproben auf oder in der Nähe dieser Geraden bewegen. Die Verschiebung der Symbole auf dieser Geraden wird durch Schwankungen in der mineralogischen Zusammensetzung des Ziegeltons in einem Werk verursacht.

Dabei verändert sich nicht die Art der Tonminerale, sondern nur ihr Gehalt in Relation zu anderen Bestandteilen wie Gerüstsilikaten oder Carbonaten.

Die Werte mancher Ziegel sind nach rechts von der Regressionsgeraden weg zu höheren Al_2O_3 -gehalten verschoben. Die Ursache hierfür liegt in der mineralogischen Zusammensetzung der Ausgangstone dieser Ziegel. Die Hauptquelle für Aluminium im Ton sind die Tonminerale, in denen es Teil des Kristallgitters ist. Eisen ist in gewöhnlichem Ziegelton immer zu finden und kann Teil des Kristallgitters oder an der Tonmineraloberfläche adsorbiert sein oder als Mineral vorliegen. Die nach rechts verschobenen Proben wurden aus kaolinitreichen Ausgangstonen hergestellt. Da Kaolinit ein 1:1-Tonmineral ist, enthält es mehr Al_2O_3 als 2:1-Tonminerale wie Illit oder Smektit. Außerdem wird das Aluminium im Kaolinit-Gitter nicht durch Eisen ersetzt, wie es bei anderen Tonmineralen wie Chlorit und Illit der Fall ist. Folglich ist das Verhältnis von Al_2O_3 zu Fe_2O_3 bei Ziegeln aus dieser Tonart höher.

Bei den niedrigen Al_2O_3 -gehalten finden sich die anderen Baustoffe (Putze, Mörtel, Kalksandstein, Porenbeton), da diese kaum Tonminerale enthalten. Auch diese Proben bewegen sich nahe der Regressionsgeraden. Im Falle des Kalkzementputzes ist das auf die Tonminerale zurückzuführen, die in der Rohstoffmischung bei der Zementherstellung verwendet werden. Die Lage der MWB-Proben auf der Regressionsgeraden lässt darauf schließen, dass diese Proben eine Mischung aus tonmineralreichen und tonmineralarmen Baustoffen sind. In dem Diagramm sind die drei Proben aus **Bild 25** markiert, die einen Ziegelgehalt > 70 M.-% aufweisen. Diese Proben befinden sich deutlich näher an den reinen Ziegeln als die anderen MWB-Proben. Durch die Lage von unbekanntem MWB-Proben in diesem Diagramm lässt sich also auch auf ihren Ziegelgehalt schließen.

6.4 Vorhersage der Hydratationswärme auf Basis von Farbmessung und chemischen Parametern (IZF, VDZ)

Da der Ziegel die einzige puzzolanische Komponente im MWB ist, sollte die Reaktivität von MWB mit dessen Anteil korrelieren. Als Maß für die Reaktivität ist die vom VDZ gemessene 7d-Hydratationswärme nach ASTM C1897-20 definiert. Am synthetischen MWB konnte bereits gezeigt werden, dass sich sowohl dessen Farbe als auch dessen chemische Zusammensetzung aus den Werten der einzelnen Bestandteile zusammensetzt. Daher wurde auch die 7d-Hydratationswärme des Ziegels und des synthetischen MWB gemessen (siehe **Tabelle 15**). Der Ziegelanteil im synthetischen MWB beträgt 82,5 M.-%. Der Rest setzt sich aus Putz und Mörtel zusammen. Da es sich bei Putz- und Mörtelanhaftungen um puzzolanisch nicht reaktive Stoffe handelt, ist die 7d-Hydratationswärme des synthetischen MWB geringer als die des Ziegels. Allerdings beträgt der gemessene Wert nur 66 % von dem des Ziegels und nicht 82,5 %. Der Grund für diese Abweichung wurde nicht abschließend untersucht. Möglicherweise hat die puzzolanisch reaktive Ziegelprobe unmittelbar nach Mahlung auf Analysenfeinheit (das heißt, vor Beginn der Messung der Hydratationswärme) mit hydraulischen Bestandteilen der mehlfinen Putz- und Mörtelanhaftungen reagiert. Dies würde die Abnahme der Reaktivität begründen.

Tabelle 15 7d-Hydratationswärme des Ziegels und des daraus hergestellten synthetischen Mauerwerksbruchs inklusive anhaftendem Putz und Mörtel

	Ziegel	synthetischer MWB
7d-Hydratationswärme [J/g]	222	146

Die 7d-Hydratationswärme der MWB-Proben korreliert linear sowohl mit dem berechneten Ziegelgehalt als auch mit dem gemessenen Al_2O_3 - und Fe_2O_3 -Gehalt. Beide Parameter eignen sich zur Vorhersage der puzzolanischen Aktivität (siehe **Bild 28**).

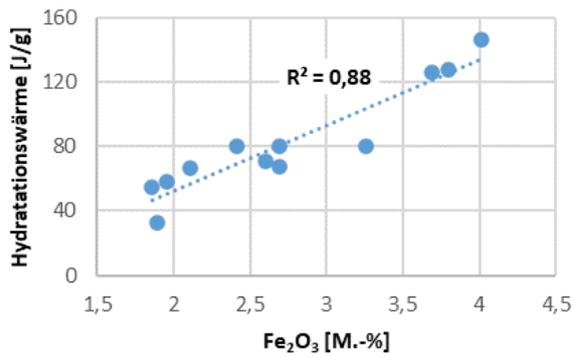
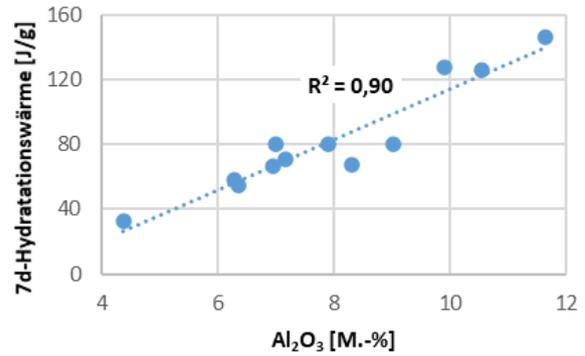
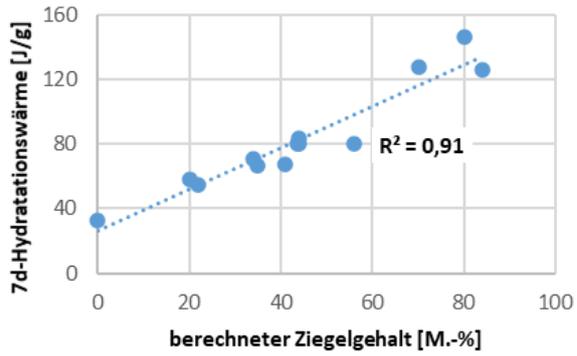


Bild 28

Korrelation der 7d-Hydratationswärme mit dem berechneten Ziegelgehalt und den für Tonminerale charakteristischen Oxiden der MWB-Proben, die mittels RFA bestimmt wurden

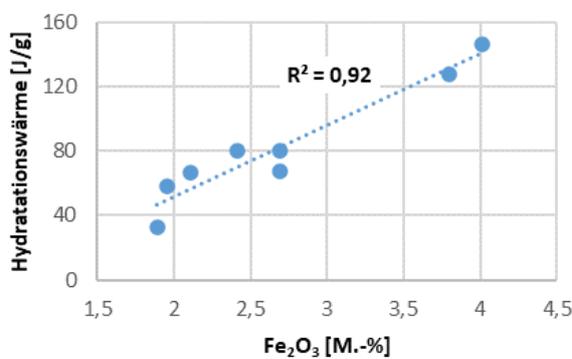
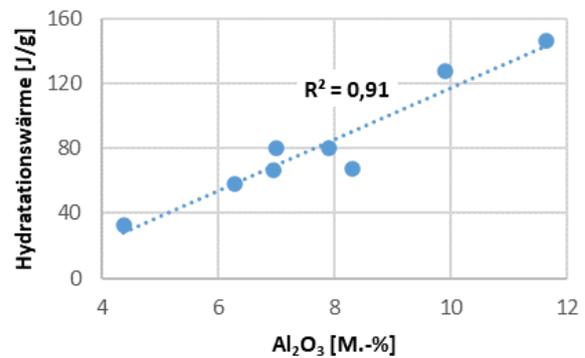
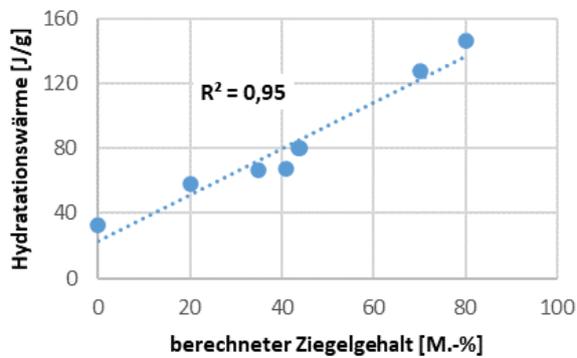


Bild 29

Korrelation der 7d-Hydratationswärme mit dem berechneten Ziegelgehalt und den für Tonminerale charakteristischen Oxiden der MWB-Proben nach Ausschluss der Proben mit $a^* > 21$

Allerdings gibt es Ausreißer, die relativ weit von der Regressionsgeraden entfernt liegen. Bei diesen Werten handelt es sich um MWB-Proben, die ein $a^* > 21$ aufweisen (grün gestrichelte Balken in **Bild**

25). Daher wurden Diagramme ohne diese Proben erstellt. Diese enthalten nur die Daten der Proben mit entsprechend gefüllten grünen Balken, die gemäß dem Modell nur Hintermauerziegel als färbenden Bestandteil abbilden.

Der Ausschluss dieser Proben führt zu einem noch höheren Bestimmtheitsmaß der Korrelation der Hydratationswärme mit dem berechneten Ziegelgehalt und dem Al_2O_3 - und Fe_2O_3 -Gehalt (siehe **Bild 29**).

Für eine gute Vorhersage der puzzolanischen Aktivität sollte daher im Modell ein $\Delta E < 2$ mit einem a^* zwischen 7 und 21 eingehalten werden, um sicherzustellen, dass es sich bei den farbgebenden Ziegeln um Hintermauerziegel handelt und nicht um Klinker oder Dachziegel. Zusätzlich sollte auch die chemische Zusammensetzung bestimmt werden. Zwar ist die Farbmessung schnell, günstig und gut reproduzierbar, allerdings könnten Störstoffe dazu führen, dass die Farbmessung einen falschen Ziegelgehalt ermittelt. Die Bestimmung des Fe_2O_3 - und Al_2O_3 -Gehalts gibt hier zusätzliche Sicherheit.

6.5 Mineralogische Charakterisierung ziegelhaltiger RC-Baustoffe (IZF, VDZ)

Aus **Tabelle 16** und **Tabelle 17** gehen die mineralogischen Zusammensetzungen der Ziegelproben (Zib) und ziegelhaltigen Mauerwerksproben (Mab) hervor, die mittels Röntgenbeugung (XRD) untersucht wurden.

Ziegelschleifstäube derselben Werksherkunft zeigen aufgrund ihrer stofflichen Homogenität eine geringe Streuung in der Analytik. Daher wurden die an den Ziegelproben (Zib, Herkunft Ziegelwerke) ermittelten Ergebnisse als Mittelwerte aller Proben der jeweiligen Werke dargestellt. Darin eingeschlossen sind auch die Ergebnisse des Ziegelschleifstaubs, der nach seiner Siebung im Betriebsversuch BV1 als puzzolanischer Hauptbestandteil „Q“ eingesetzt wurde (vgl. Abschnitt 12.1: Erster Betriebsversuch zur getrennten Aufbereitung der Ausgangsstoffe mit anschließendem Mischen (BV1)).

Verglichen mit den ziegelhaltigen Mauerwerksproben (Mab, Herkunft Recyclingwerke) enthalten reine Ziegelproben geringere Mengen an Carbonaten. Die Phasen Illit/Muskovit, Alkali-Feldspäte, Plagioklase, Pyroxene und Akermanit-Gehlenit stellen Relikte der Tonminerale oder Mineralneubildungen durch Reaktion der Zerfallsprodukte mit CaO/MgO dar. Dementsprechend weisen diese typischen Phasen in den Ziegelproben (Zib) deutlich erhöhte Anteile gegenüber den Anteilen in den Proben aus ziegelhaltigem Mauerwerk (Mab) auf. Die Ziegelproben weisen zudem einen hohen Gehalt der Eisenoxide Hämatit und Magnetit auf, wobei Hämatit für die Rotfärbung der Ziegel verantwortlich ist.

Tabelle 16 Ergebnisse der XRD-Analysen an Ziegelproben (Zib) aus den drei Ziegelwerken sowie der Recyclinganlage im Ziegelwerk der Leipfinger-Bader GmbH

Mineral		Schleifstaub Schönlind	Schleifstaub Puttenhausen	Schleifstaub Vatersdorf	Feinfraktion Recyclinganlage
Quarz	%	49 - 60	32 - 46	30 - 41	33 - 46
Calcit	%	< 1	ca. 1	1 - 5	3 - 4
Dolomit	%	ca. 1	ca. 1	1 - 2	1 - 2
Anhydrit	%	0 - 3	-	-	-
Illit/Muskovit	%	7 - 15	2 - 16	3 - 20	2 - 14
Alkali-Feldspat-Gruppe	%	8 - 16	5 - 12	6 - 14	5 - 10
Plagioklase	%	6 - 12	9 - 17	8 - 20	11 - 17
Pyroxen-Gruppe	%	< 1	5 - 18	6 - 10	6 - 19
Akermanit-Gehlenit	%	1 - 5	8 - 16	6 - 10	8 - 15
Hämatit	%	ca. 3	ca. 2	3 - 5	ca. 2
Magnetit	%	ca. 1	1 - 2	1 - 2	ca. 1

Tabelle 17 Ergebnisse der XRD-Analysen an Mauerwerksproben (Mab) der Recyclingwerke der Scherer & Kohl GmbH, ziegelhaltige RC-Feinstoffe aus der Aufbereitung von Monochargen sowie aus der Bauschutttaufbereitung im Regelbetrieb

Mineral		Mab1	Mab2	Mab3	Mab4	Mab5	Mab6	Mab7	Mab8	Mab24
Quarz	%	ca. 49	ca. 51	ca. 57	ca. 40	ca. 65	ca. 55	ca. 42	ca. 61	ca. 61
Calcit	%	ca. 11	ca. 12	ca. 7	ca. 18	ca. 5	ca. 8	ca. 9	ca. 5	ca. 7
Dolomit	%	Spuren	ca. 1	< 1	ca. 13	-	-	-	Spuren	< 1
Anhydrit	%	-	-	-	-	-	-	-	-	ca. 1
Gips	%	ca. 2	ca. 3	ca. 2	ca. 1	ca. 2	ca. 2	ca. 2	ca. 1	Spuren
Illit/Muskovit	%	< 5	< 5	4 - 8	4 - 8	< 5	< 5	< 5	< 5	3 - 7
Alkali-Feldspat-Gruppe	%	6 - 10	4 - 8	5 - 9	< 5	6 - 10	6 - 10	4 - 8	6 - 10	5 - 9
Plagioklasse	%	7 - 11	9 - 13	9 - 13	11 - 15	7 - 11	9 - 13	13 - 17	9 - 13	12 - 16
Pyroxen-Gruppe	%	4 - 6	4 - 6	< 2	ca. 2	< 2	4 - 6	10 - 12	< 2	ca. 3
Akermanit, Gehlenit	%	4 - 6	1 - 3	< 2	< 2	< 1	< 2	2 - 4	1 - 3	< 1
Wolastonit	%	ca. 5	ca. 3	< 3	< 1	< 2	< 3	4 - 8	< 2	-
Hämatit	%	< 1	< 1	ca. 2	< 1	ca. 1	< 1	< 1	ca. 2	< 1
Magnetit	%	< 1	< 1	< 1	Spuren	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Chlorit-Gruppe	%	< 1	< 2	< 3	< 2	< 2	< 2	< 2	-	< 2
Portlandit	%	-	-	-	ca. 3	-	-	-	-	-
Ettringit	%	-	ca. 1	ca. 1	ca. 1	-	-	-	-	-

6.6 Umweltverträglichkeitsuntersuchungen am Ziegelbruch (IZF, LB)

Aus **Tabelle 18** gehen die Analyseergebnisse der Umweltverträglichkeitsuntersuchungen an der Ziegelfeinfraction aus der Recyclinganlage der LB Ziegelwerke (Zib1) hervor. Alle Parameter liegen unterhalb der Höchstwerte nach DAfStb-Richtlinie. Die Kriterien der DAfStb-Richtlinie, die gleichermaßen für puzzolanische Flugaschen heranzuziehen ist, wurden durchweg eingehalten.

Tabelle 18 Ergebnisse der Analysen an der Probe Zib1 nach DAfStb-Richtlinie (vgl. Abschnitt 2.5.2 - DAfStb-Richtlinie zur Verwendung von siliciumreicher Flugasche und Kesselsand)

Substanz	Einheit	Höchstwerte	Zib1
Arsen	[mg/kg]	150	10
Blei	[mg/kg]	700	14
Cadmium	[mg/kg]	10	0,18
Chrom gesamt	[mg/kg]	600	49
Kupfer	[mg/kg]	400	34
Nickel	[mg/kg]	500	25
Quecksilber	[mg/kg]	5	< 0,1
Thallium	[mg/kg]	7	< 0,3
Vanadium	[mg/kg]	1500	66
Zink	[mg/kg]	1500	45
Kohlenwasserstoffe	[mg/kg]	1000	< 100
PAK	[mg/kg]	30	u.d.B.
PCB	[mg/kg]	0,5	< 0,01
PCDD/PCDF	[mg/kg]	0,1	u.d.B.

Im Vergleich zu den o.g. Ergebnissen am Ziegelbruch Zib 1 können die Ergebnisse am Mauerwerksbruch (Mab, vgl. **Tabelle 6** und **Tabelle 7**) bei einzelnen Parametern leicht höhere Werte zeigen, z. B. bei Chrom, Kupfer, Nickel oder Vanadium. Dies wird verursacht durch die Eigenschaft der Tonminerale, positiv geladene Schwermetallionen an ihrer negativ geladenen Oberfläche adsorbieren zu

können. Aber auch die Randbedingungen der Probenahme und der Probenaufbereitung können erhebliche Auswirkungen auf die Ergebnisse haben.

7 Mechanische Aufbereitungsverfahren und granulometrische Analysen im Labor (VDZ)

7.1 Siebanalysen an zerkleinerten Recyclingmaterialien aus Mauerwerksbruch Mab

An getrockneten Proben werkseitig zerkleinertem Recyclingmaterialien aus Mauerwerksbruch Mab (RC-Brechsande, RC-Feinstoffe) wurden im VDZ Siebanalysen (Trockensiebung) durchgeführt. Die Sieblinien sind im **Bild 30** dargestellt. Je nach Herkunft, Zusammensetzung und Zerkleinerungscharakteristik der Ausgangsstoffe aus Abbruch und Bauschutt entstanden während der Aufbereitung im RC-Werk (im sog. „Schotterprozess“) Zerkleinerungsprodukte unterschiedlicher Sieblinien. Bei Verwendung eines identischen Zerkleinerungsaggregates im Recyclingwerk kann davon ausgegangen werden, dass RC-Feinstoffe mit einer breiteren Korngrößenverteilung dann entstehen, wenn der Ausgangsstoff leichter zu zerkleinern ist (z. B. Mab 8, Monocharge Ziegelbruch). Ist der Ausgangsstoff schwerer zu zerkleinern, entsteht bei unveränderter Betriebsweise des Zerkleinerungsaggregates ein RC-Feinstoff mit engerer Korngrößenverteilung und seine Sieblinie liegt im gröberen Bereich (z. B. Mab 4, ziegelarmer Bauschutt aus dem Regelbetrieb).

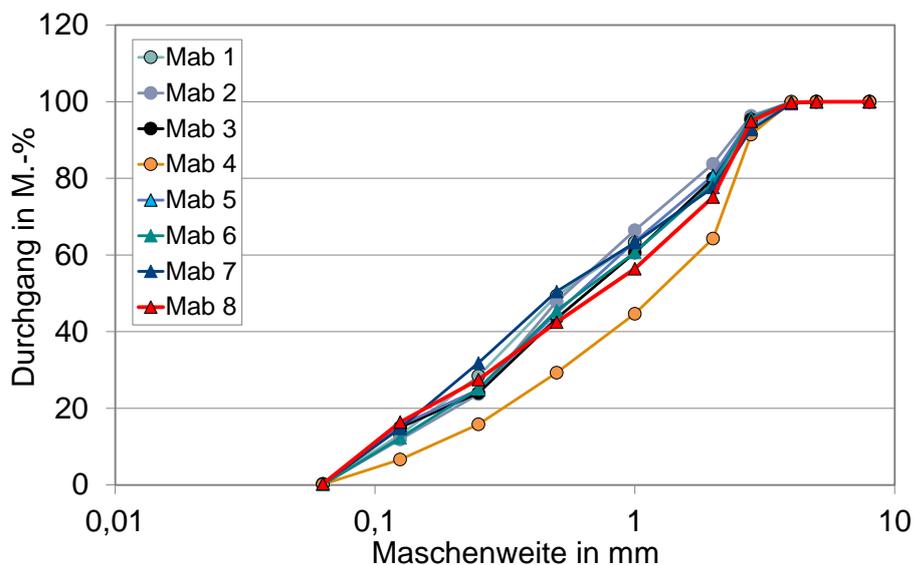


Bild 30 Mittels Siebanalyse ermittelte Korngrößenverteilungen an zerkleinerten RC-Materialien Mab (RC-Feinstoffe, RC-Brechsande)

Neben den Brechsanden (BS) aus der Aufbereitung von ziegelhaltigem Mauerwerksbruch (Mab) wurden bei Scherer + Kohl auch die Ausgangsstoffe (Ast) der entsprechenden Bauschuttchargen vor ihrer Aufbereitung/Zerkleinerung beprobt. Im VDZ wurden diese Proben visuell sortiert, gewogen und foto-kartiert. **Bild 31** gibt einen Überblick, in welcher Stück- bzw. Partikelgröße, in welchen Zusammensetzungen und Farben, in welchen Mengenverhältnissen und welchem Aufbereitungszustand ein Bauschutt vor dem Recyclingprozess vorliegen kann. Ausgewählte, ziegelreiche Proben der Ausgangsstoffe (Ast) wurden im weiteren Projektverlauf analysiert und in der Interpretation von Ergebnissen verwendet.

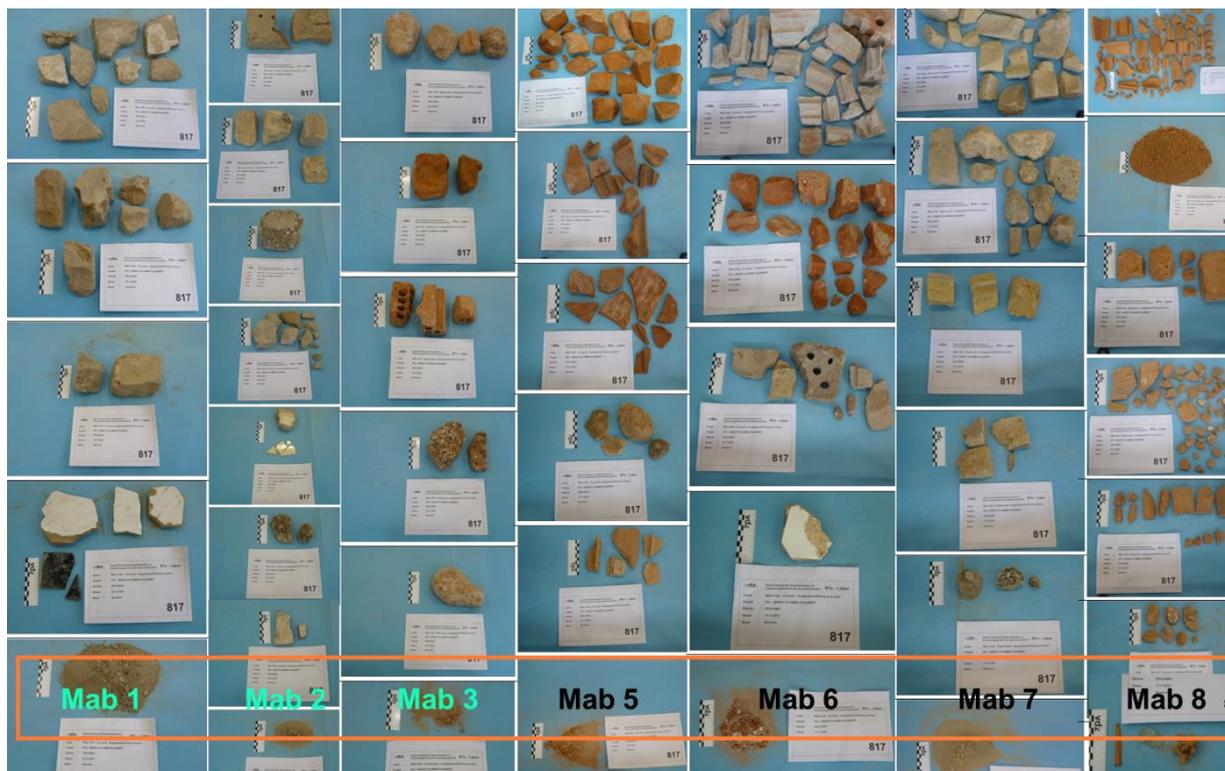


Bild 31 Auszug aus der Fotokartierung der Proben aus ziegelhaltigem Mauerwerksbruch, Aufnahmen nach Sortierung der Ausgangsstoffe (Ast), Quelle: VDZ

7.2 Mechanische Aufbereitung der ziegelhaltigen RC-Baustoffe durch Chargenmahlung

Die im Projekt geplanten Versuchszemente sollten überwiegend durch getrenntes Aufbereiten und anschließendes Mischen der mehlfinen Bestandteile im Labor hergestellt werden.

Für die Herstellung der Versuchszemente wurden überwiegend grobkörnige RC-Baustoffe (Recyclingbrechsande/ RC-Feinstoffe der Fraktion 0/4 mm) aus Ziegelbruch bzw. Mauerwerksbruch auf einer Laborkugelmühle im diskontinuierlichen Mahlverfahren gemahlen.

Für erste Voruntersuchungen an ziegelhaltigen Zementen wurde der Ziegelbruch Zib 1 gemahlen. In der Regel werden sog. Zielmahlungen von Zementen bzw. Hauptbestandteilen anhand von Blaine-Messungen laborseitig begleitet, um den Mahlfortschritt zu untersuchen. Die Mahlfeinheit bzw. die spezifische Oberfläche des ziegelhaltigen Mahlgutes wurde ebenfalls nach dem Blaineverfahren bestimmt, sie betrug nach vergleichsweise kurzer Mahldauer bzw. Abschluss der Chargenmahlung 7250 cm²/g. Die Korngrößenverteilung (KGV) wurde mittels Laserbeugung in einem Granulometer mit Nassdispersion untersucht. An der KGV des Mahlgutes wurde rechnerisch die RRSB-Funktion mittels Regression nach Nelder und Mead angepasst. Die RRSB-Funktion hatte eine Steigung von $n = 0,79$ sowie einen Lageparameter von $x' = 17,68 \mu\text{m}$.

Da sich ziegelhaltige RC-Baustoffe nicht gleichermaßen auf hohe Mahlfeinheiten (vgl. z. B. Zib 1) mahlen lassen, wurde nachfolgend für einen Großteil der zu mahlenden Materialien eine Zielfeinheit zwischen 4800 cm²/g und 5200 cm²/g angestrebt.

- Dieser Feinheitsbereich sollte beispielsweise für schwer mahlbare, ziegelarme RC-Materialien, die einen höheren Energiebedarf in der Zerkleinerung aufweisen, in einer Chargenkugelmühle bei möglichst geringen Energieverlusten sicher erreichbar sein.
- Bei leicht mahlbaren, ziegelreichen RC-Materialien, die einen geringeren Energiebedarf in der Zerkleinerung aufweisen, sollte ein Überschreiten des Feinheitsbereiches möglichst vermieden

werden. In Abhängigkeit der Mahldauer entsteht ein Mahlfortschritt, der materialspezifisch deutliche Feinheitsunterschiede zeigen kann. Umgekehrt können Chargenmahlungen mit deutlich unterschiedlicher Mahldauer zum Erreichen einer vergleichbaren Zielfeinheit führen (vgl. [6]).

Zur Bewertung ihrer Leistungsfähigkeit sollten vergleichbare Laborzemente untersucht werden, die möglichst nur in einem Parameter variieren. Insofern sollten sich R-Zemente, die mit konstanten RC-Anteilen (z. B. 30 M.-%) sowie konstanter Klinkerkomponente im Labor herzustellen waren, vorrangig in der Herkunft bzw. in der stofflichen Zusammensetzung des RC-Materials unterscheiden. Der granulometrische Einfluss des gemahlene RC-Materials sollte unter Verwendung einer möglichst vergleichbaren Mahlfeinheit minimiert werden. Ein Ausschluss granulometrischer Einflüsse wäre nur theoretisch möglich, wenn mehlfine RC-Materialien identischer Korngrößenverteilungen (KGV) eingesetzt würden. In der Praxis sind derartige „Mahlungen auf Ziel-KGV“ aufgrund heterogener, deutlich unterschiedlicher sowie wechselnder Mahlbarkeiten der RC-Materialien nicht möglich.

Anmerkung: Zur Beurteilung granulometrischer Einflüsse eines ziegelhaltigen Mahlgutes auf die Zementeigenschaften sollte neben der Bestimmung des Blaine-Werts stets auch die Bestimmung der KGV (z. B. mittels Lasergranulometrie) erfolgen, da ziegelhaltige Materialien eine deutlich höhere Porosität aufweisen als ein Zementklinker. Die Verwendung der Reindichte bei der Berechnung des Blaine-Werts führt daher teils zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen, da z. B. ein Ziegelpartikel bei ähnlicher Reindichte wie Kalkstein ein viel größeres Volumen einnimmt. Alternativ müsste bei der Berechnung des Blaine-Werts darauf geachtet werden, dass die Kornrohddichte anstelle der Reindichte verwendet wird. Allerdings gestaltet sich deren Bestimmung als schwierig. [6] [15]

7.3 Mechanische Aufbereitung durch Siebung und selektive Mahlung von Ziegelschleifstaub

Aus Gründen der Energieeffizienz wurde Schleifstaub aus der Planziegelherstellung nicht vollständig, sondern selektiv oder gar nicht gemahlen. Die im feinkörnigen Schleifstaub enthaltenen „Abplatzer“ wurden im Labor, z. B. bei 125 µm oder 250 µm, abgesiebt. In einigen Versuchen wurde der Rückstand selektiv gemahlen, dieses Material wurde dem Siebdurchgang zugemischt (siehe **Bild 32**). Im Projekt wurden unter Verwendung von Schleifstaub im Zement verschiedene Ansätze verfolgt:

- Verwendung des ungesiebten Schleifstaubs (Originalzustand inkl. Abplatzer)
- Verwendung des gesiebten Schleifstaubs, nur Siebdurchgang (ohne Rückstand)
- Verwendung des gesiebten Schleifstaubs, Siebdurchgang und der selektiv gemahlene Siebrückstand.

Der Anteil des Schleifstaubs in Versuchszementen lag i. d. R. bei 30 M.-%, in Kombination mit Kalkstein bei 10 M.-%. Der Anteil der Abplatzer im Schleifstaub lag bei ca. 25 – 45 M.-%.

Anmerkung: Aufbauend auf den Ergebnissen aus dem IGF-Projekt 20920 N [6] wurden – abweichend zum Projektantrag R-ZIEMENT– keine Mahlbarkeitstests an Ziegel- oder Mauerwerksbruch durchgeführt. Aus dem IGF-Projekt war hervorgegangen, dass der spezifische Arbeitsbedarf für die Mahlung von Ziegelbruch auf geringerem bzw. ähnlichem Niveau liegt wie für die Kalksteinmahlung (ca. 10 kWh/t nach Bond). Im Vergleich zum Hauptbestandteil Klinker ist Ziegelbruch deutlich leichter mahlbar. Zudem erreicht Ziegelbruch schneller höhere Mahlfeinheiten. Je weniger Ziegel ein Mauerwerksbruch enthält, desto schwerer wird er mahlbar. Die Mahlbarkeit von Mauerwerksbruch lag in der Größenordnung von Klinker-Mittelwerten bei ca. 13 kWh/t. Sowohl Ziegelbruch als auch ziegelhaltiger Mauerwerksbruch wiesen somit Mahlbarkeiten deutlich unterhalb der Mahlbarkeit von Hüttensand (ca. 23 kWh/t) auf.

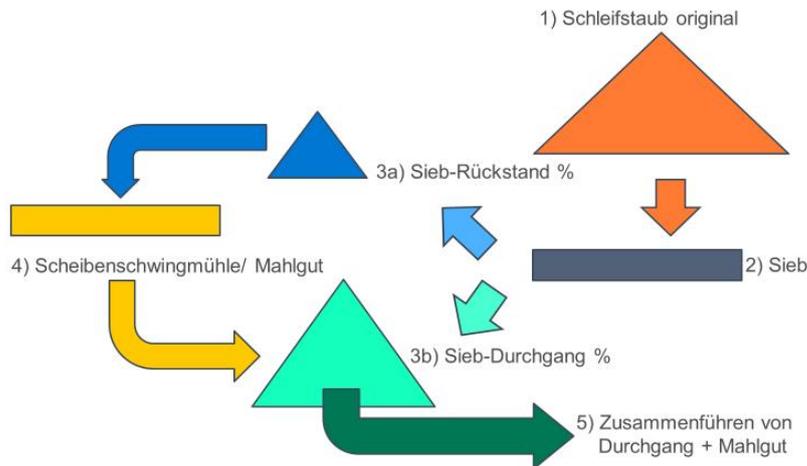


Bild 32 Schematische Darstellung der selektiven Schleifstaubmahlung als Kreislauf aus Sieb (2), Mühle (4) und Mischer (5)

7.4 Granulometrische Modellierung von mehlfinen Mischungen

Für die Durchführung von Optimierungsversuchen an ziegelhaltigen und kalksteinhaltigen R-Zementen wurde die Software PMP compact der Firma GRAINsoft GmbH verwendet, mit deren Hilfe die granulometrische und stoffspezifische Beschreibung der Mischprozesse im Labor sowie die Vorbereitung der Betriebsversuche möglich war. Zudem diente die Software dazu, Eingangsparameter (z. B. mittels Laserbeugung gemessene Korngrößenverteilung der mehlfinen Ausgangsstoffe) zu erfassen und hinsichtlich unterschiedlicher Mischungszusammensetzungen mathematisch auszuwerten. Die Software eignete sich zur theoretischen Vorbereitung praktischer, verfahrenstechnischer Prozesse, insbesondere unter Verwendung unterschiedlicher, ziegelhaltiger Ausgangsstoffe für Zement. Die Komplexität, die der Beschreibung eines Partikelkollektivs aus Ziegel- oder Mauerwerksbruch, Klinker und Kalkstein innewohnt, konnte unter Verwendung der Software einfacher erschlossen werden.

An allen mehlfinen Ausgangsstoffen wurden die Korngrößenverteilungen mittels Laserbeugung bestimmt. Insbesondere heterogene Ausgangsstoffe, z.B. aus Mauerwerksbruch (Mab), zeigten aufgrund unterschiedlicher Mahlbarkeiten charakteristische Verteilungsdichtefunktionen. Bevor aus den mehlfinen Ausgangsstoffen in definierten Mischungszusammensetzungen Laborzemente hergestellt wurden, haben mathematische Mischversuche Aufschluss gegeben, welche Korngrößenverteilungen in den Gemischen zu erwarten waren, wie sie beeinflussbar waren bzw. welche granulometrischen Zementzusammensetzungen besonders günstige Auswirkungen auf die Entstehung des Zementsteingefüges (z.B. auf seine Porosität) haben könnte. Auf die granulometrischen Eigenschaften eines gemischten R-Zements hatten zwei Parameter unmittelbaren Einfluss:

- die Anteile der Hauptbestandteile.
- die Korngrößenverteilungen der Hauptbestandteile.

Während die Anteile der Hauptbestandteile über die Zementrezeptur gezielt angesteuert werden können, ist eine exakte Einstellung einer gezielten Korngrößenverteilung kaum bzw. nicht möglich, da jeder zu mahlende Bestandteil entsprechend seiner mineralogischen Zusammensetzung und seiner Mahlbarkeit sowie entsprechend des Mahlaggregats charakteristische Korngrößenverteilungen aufweisen wird, die häufig nicht mit Zielvorgaben übereinstimmen. Auch wenn die unterschiedlichen Ziegelbruchproben (Zib) und die Proben aus ziegelhaltigem Mauerwerk (Mab) im Labormaßstab auf einen vergleichbaren Feinheitsbereich von ca. 4800 cm²/g bis ca. 5200 cm²/g nach Blaine zu mahlen waren, ergaben sich im Einzelfall - selbst bei identischen Mahlfineinheiten - zum Teil deutlich unterschiedliche Korngrößenverteilungen. Im Zusammenspiel mit CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente der

Laborzemente zeigten sich in jeder Mischung entsprechende granulometrische Effekte, z.B. mehrmodaler Dichteverteilungen. Wurde beispielsweise in Mischungen der CEM I-Anteil bei konstant 70 M.-% gehalten, so hatte der Austausch des ziegelhaltigen Materials stets zu einer spezifischen Veränderung der Korngrößenverteilung des Zements geführt, auch wenn die RC-Anteil mit 30 M.-% vergleichsweise gering war. Die Verteilungsfunktionen der Gemische wiesen veränderte Formen auf, Steigung und Lage variierten. So wurden beispielsweise im Rahmen einer Masterarbeit [16] ziegelhaltige R-Zemente mit einem RC-Anteil von 20 M.-%, 30 M.-%, 40 M.-% und 50 M.-% systematisch untersucht (vgl. **Bild B-1** und **Bild B-2** im Anhang). An den anschließend labortechnisch hergestellten Gemischen wurden Packungsdichteeffekte festgestellt. Je nach stofflicher Zementzusammensetzung können Packungsdichteeffekte bis in die Mörtel- und Betoneigenschaften feststellbar werden.

Die im Zementgemisch entstehende Packungsdichte wurde labortechnisch anhand eines Stampfvolometers ermittelt (vgl. z.B. [15] [16] [17] [18]). Sie entspricht dem Verhältnis aus dem sog. Festraum (Volumen fester Partikel) und dem Gesamtraum (Volumen, das feste Partikel und Hohlräume gemeinsam einnehmen). Das entsprechende Hohlraumvolumen wurde labortechnisch anhand des Wasseranspruchs nach Punkte bestimmt. Es beschreibt den von Wasser zugänglichen Volumenbereich eines dispersen Systems. Beide Parameter bilden granulometrische Zementeigenschaften ab. Die Stampfpackungsdichte und der Wasseranspruch nach Punkte wurden im Abschnitt 10.9 den Zementeigenschaften (z. B. der Druckfestigkeit) sowie den Gefügeeigenschaften (z. B. der Mörtelporosität) gegenübergestellt.

8 Portlandzemente, Kalkstein und Portlandkalksteinzemente als Ausgangsstoffe für die Herstellung ziegelhaltiger Laborzemente (Spenner GmbH & Co. KG, SP)

8.1 Portlandzemente als Klinkerkomponente

Die Spenner GmbH & Co. KG hat die Zemente CEM I 52,5 N (tb) und CEM I 52,5 R zur Verfügung gestellt. Die Zemente wurden mit Klinker, Sulfatträger, Chromatreduzierer und Mahlhilfe auf einer Kugelmühle hergestellt. Es handelte sich um Portlandzement der Festigkeitsklasse 52,5 mit einer normalen (N) und einer schnellen (R) Festigkeitsentwicklung. Der Zusatz (tb) ist eine interne Bezeichnung. Diese Zemente wiesen gemäß DIN EN 197-1 einen Klinkergehalt > 95 M.-% auf. Vor dem Versand wurden die Korngrößenverteilung sowie die chemische und mineralogische Zusammensetzung der Zementproben bestimmt. Weiterhin wurden die physikalischen Eigenschaften der Zemente untersucht. Ein Auszug der Ergebnisse ist in **Tabelle 19** aufgeführt.

Tabelle 19 Analysen der Portlandzemente

Sorte	Einheit	CEM I 52,5 N (tb)	CEM I 52,5 R
Probenahmedatum		15.06.2021	14.06.2021
Le Chatelier	mm	1	
Wasseranspruch	M.-%	28,5	32,0
Erstarren-Beginn	min	190	125
Erstarren-Ende	min	240	160
Mahlfeinheit Blaine	cm ² /g	3210	5360
CO ₂	M.-%	2,0	1,9
Glühverlust	M.-%	2,7	2,7
SO ₃	M.-%	2,7	3,6
Na ₂ O-Äquivalent	M.-%	0,57	0,57
C ₃ S	M.-%	60,5	58,8
C ₂ S	M.-%	14,2	15,7
C ₃ A orthorhombisch	M.-%	2,9	2,4
C ₃ A kubisch	M.-%	3,3	3,0
C ₄ AF	M.-%	7,7	8,2

Sorte	Einheit	CEM I 52,5 N (tb)	CEM I 52,5 R
Freikalk	M.-%	0,6	0,2
Kalksteingehalt sulfatfrei	M.-%	4,8	4,5
Druckfestigkeit 1d	MPa		36,4
Druckfestigkeit 2d	MPa	31,4	48,6
Druckfestigkeit 28d	MPa	64,4	74,7
Steigungsmaß	-	1,12	1,10
d'	µm	21,8	12,1

8.2 Portlandkalksteinzemente als Klinker- und Kalksteinkomponenten

Als weitere Option hat die Spenner GmbH & Co.KG Portlandkalksteinzemente CEM II/A-LL zur Verfügung gestellt, die standardmäßig gemeinsam gemahlen werden und in den Festigkeitsklassen 52,5 R, 52,5 N und 42,5 N vorliegen. Die CEM II/A-LL-Zemente bestehen überwiegend aus dem Hauptbestandteil Klinker, einem geringen Anteil (< 20 M.-%) des Hauptbestandteils Kalkstein sowie Sulfatträger. In diesen Zementen liegt der Kalkstein in sehr hoher Mahlfineinheit vor. Außerdem können die Portlandkalksteinzemente wie auch die Portlandzemente als Basis für die Herstellung bzw. das Mischen der Versuchszemente – sowohl im Labormaßstab als auch unter großtechnischen Bedingungen verwendet werden.

Mit der Verwendung dieser Zemente als Klinkerkomponente sowie als Kalksteinkomponente sollten insbesondere die ziegelhaltigen Zementzusammensetzungen untersucht werden, die eine hohe Kalksteinfeinheit erforderlich machen. Für Zemente, die mit Kalkstein geringerer Feinheit herzustellen sind, wurden die Hauptbestandteile getrennt gemahlen und anschließend gemischt. Die **Tabelle 20** fasst die Analysen und Eigenschaften der Portlandkalksteinzemente zusammen.

Tabelle 20 Analysen und Eigenschaften der CEM II/A-LL-Zemente

	Einheit	CEM II A/LL 52,5 R	CEM II/A-LL 52,5 N	CEM II/A-LL42,5 N
Mahlfineinheit Blaine	cm ² /g	5360	4770	3500
Korngröße x bei D = 95%	µm	29,33	39,08	66,3
RRSB Lageparameter	µm	12,2	15,9	23,9
RRSB Steigungsmaß	-	1,08	1,01	0,98
Kalksteingehalt sulfatfrei	M.-%	9,03	17,79	18,17
Le Chatelier	mm	1,0	1,0	1,5
Wasseranspruch	M.-%	31,5	30,5	27
Erstarren-Beginn	min	145	185	190
Erstarren-Ende	min	180	220	240
Druckfestigkeit 2d	MPa	45,3	35,6	27,8
Druckfestigkeit 28d	MPa	68,8	60,4	50,1

8.3 Kalkstein Spenner als weiterer Hauptbestandteil

Als weiterer Hauptbestandteil ziegelhaltiger Zemente sollte gemahlener Kalkstein eingesetzt werden. Die Spenner GmbH & Co. KG hat Kalksteinmehl aus devonischem Massenkalk zur Verfügung gestellt. Das Kalksteinmehl entsprach der Gesteinskörnungsnorm DIN EN 12620 und der DIN EN 13139, es hatte eine Mahlfineinheit von etwa 3000 cm²/g. Im Laufe der stofflichen und granulometrischen Optimierung wurden im Labor auch Versuchszemente mit Kalkstein höherer Mahlfineinheit hergestellt.

9 Zusammensetzung und Herstellung ziegelhaltiger Laborzemente (VDZ)

9.1 Zemente mit Zusammensetzungen innerhalb und außerhalb der aktuellen Zementnormenreihe EN 197

Unter Verwendung von mechanisch aufbereiteten, ziegelhaltigen Recyclingbaustoffen sowie Portlandzement CEM I als Klinkerkomponente (K) sollten im Projekt ressourceneffiziente Zemente hergestellt und untersucht werden. Teilweise wurde gemahlener Kalkstein (LL) als weiterer Hauptbestandteil nach DIN EN 197-1 eingesetzt.

In Anlehnung an DIN EN 197-1 sollte im Projekt für die Ziegelmaterialien aus den Ziegelwerken die Kurzform „Q“ entsprechend natürlicher getemperter Puzzolane (mit mindestens 25 M.-% reaktiver Kieselsäure) verwendet werden.

In Anlehnung an den EN 197-6 kann für rezyklierte Feinstoffe die Kurzform „F“ (Recyclingmehl) verwendet werden. Unter Recyclingmehl wird ein speziell ausgewähltes, aufbereitetes mineralisches Material verstanden, das aus Anlagen stammt, die rezyklierte Gesteinskörnungen und/oder Sand für Beton herstellen. Das Recyclingmehl muss nach EN 197-6 die folgenden Anforderungen erfüllen:

- a) TOC-Gehalt $\leq 0,8$ % Massenanteil
- b) Sulfatgehalt (als SO_3) $\leq 2,0$ % Massenanteil.

Recyclingmehle (F) weisen i.d.R. keine nennenswerten Ziegelgehalte sowie keine Reaktivitäten auf (vgl. Zementstein in [15]).

In Anlehnung an DIN EN 197-5 werden die Versuchszemente mit 50 - 64 M.-% Klinker sowie 36 - 50 M.-% anderer Hauptbestandteile als Portlandkompositzement CEM II/C-M bezeichnet. Die Anzahl der anderen Hauptbestandteile (neben Klinker) ist auf zwei begrenzt. Diese Hauptbestandteile müssen gemäß EN 197-5 durch die Bezeichnung des Zements angegeben werden. Während der Kalksteinanteil (LL) in CEM II/C-M-Zementen bei max. 20 M.-% begrenzt ist, könnte in Kombination mit zusätzlichem 30 M.-% Ziegel (Q) der Klinkeranteil auf bis zu 50 M.-% deutlich reduziert werden.

Gemäß EN 197-6 ist in Portlandkompositzementen CEM II/C-M mit rezyklierten Feinstoffen die Summe aus Kalkstein (LL) und Recyclingmehl (F) bei maximal 35 M.-% begrenzt. In diesem Falle dürfen neben Klinker maximal drei Hauptbestandteile eingesetzt werden.

In CEM II/B-M-Zementen darf Recyclingmehl (F) mit einem Anteil von bis zu 29 M.-% in Kombination mit anderen Hauptbestandteilen (neben Klinker) in verwendet werden. In CEM II/A-M-Zementen sind maximal 14 M.-% Recyclingmehl möglich.

9.2 Zusammensetzung der im Labor hergestellten Versuchszemente

Die Zusammensetzungen der im Projekt R-ZiEMENT hergestellten Versuchszemente (Auswahl) sind in der folgenden **Tabelle 21** dargestellt. Das Prinzip der Herstellung der Versuchszemente geht beispielsweise aus **Bild 33** hervor.

Tabelle 21 Zusammensetzung ziegelhaltiger Versuchszemente in Anlehnung an DIN EN 197-1, DIN EN 197-5 und DIN EN 197-6 (Beispiele), Anteile der rezyklierten Feinstoffe und Kalksteinanteile im R-Zement

R-Zement in Anlehnung an:		Ziegelhaltiger bzw. ziegelarmer rezyklierter Feinstoff [M.-%]	Ziegelreicher rezyklierter Feinstoff [M.-%]	Kalkstein [M.-%]
CEM II/A		10	0	0
CEM II/A-Q		0	10	0
CEM II/A-LL	(Referenz)	0	0	10
CEM II/B		30	0	0
CEM II/B-Q		0	30	0

R-Zement in Anlehnung an:		Ziegelhaltiger bzw. ziegelarmer rezyklierter Feinstoff [M.-%]	Ziegelreicher rezyklierter Feinstoff [M.-%]	Kalkstein [M.-%]
CEM II/B-LL	(Referenz)	0	0	30
CEM II/B-M		10	0	20
CEM II/B-M (Q-LL)		0	10	20
CEM II/C-M		30	0	20
CEM II/C-M (Q-LL)		0	30	20
CEM II/C-M (Q-LL)		0	20	20



Bild 33 Prinzip der Herstellung der Versuchszemente: Beispiel getrenntes Mahlen und anschließendes Mischen im Labor, Quelle: ReMin-Statuskonferenz

Als Klinkerkomponente der R-Zemente wurde überwiegend Portlandzement CEM I 52,5 R verwendet. Einige Tastversuche wurden auch unter Verwendung von CEM I 52,5 N (tb) mit geringerer Anfangsfestigkeit durchgeführt. Zur Herstellung von ziegel- und kalksteinhaltigen Kompositzementen erfolgten Mischungen mit Portlandkalksteinzementen CEM II/A-LL unterschiedlicher Festigkeitsklassen als Klinkerkomponente sowie als Kalksteinkomponente.

Als Kalksteinkomponente wurden neben den oben genannten CEM II/A-LL-Zementen Kalksteinmehle geringer Mahlfeinheit (ca. 3000 cm²/g) eingesetzt. Für einige Zementmischungen wurde das Kalksteinmehl auf eine höhere Feinheit (7000-7500 cm²/g) gemahlen.

Die ziegelhaltigen Recyclingbaustoffe wurden je nach Herkunft und Zusammensetzung in unterschiedlichen Verfahren aufbereitet und für die Herstellung von R-Zement im Labor vorbereitet.

1. Recyclingbrechsande/ Recyclingfeinstoffe (0/4 mm) aus den Recyclingwerken wurden schonend getrocknet und homogenisiert. Eine repräsentative Teilprobe wurde auf eine Mahlfeinheit von ca. 4800 cm²/g bis 5200 cm²/g gemahlen.
2. Feinfraktionen (0/2mm) aus dem Ziegelrecycling der Ziegelwerke wurden schonend getrocknet und homogenisiert. Eine repräsentative Teilprobe wurde auf eine Mahlfeinheit von ca. 4800 cm²/g bis 5200 cm²/g bzw. auf eine deutlich höhere Mahlfeinheit von 7200 cm²/g gemahlen.
3. Schleifstaub aus der Planziegelherstellung der Ziegelwerke wurde nach seiner Trocknung in drei unterschiedlichen Verfahren getestet:

- Schleifstaub wurde ohne Mahlung und Siebung verwendet,
- Schleifstaub wurde vollständig gesiebt und nur der Durchgang (z.B. $< 125 \mu\text{m}$, $< 250 \mu\text{m}$) wurde verwendet,
- Schleifstaub wurde vollständig gesiebt, der Rückstand (z.B. $> 125 \mu\text{m}$, $> 250 \mu\text{m}$) wurde gemahlen und mit dem entsprechenden Durchgang zusammengeführt.

Die Zementzusammensetzungen listet **Tabelle A-3** im Anhang auf.

10 Leistungsfähigkeit ziegelhaltiger R-Zemente - Untersuchungen der Zement- und Normmörteleigenschaften (VDZ)

10.1 Vorrangige Untersuchungsmethoden

Die Druckfestigkeit der RC-haltigen Versuchszemente wurde gemäß DIN EN 196-1 am Normmörtel, d.h. bei einem konstanten Wasserzementwert $w/z = 0,50$ bestimmt. Es wurden die Festigkeiten im Prüfalalter von zwei Tagen (Anfangsfestigkeit) sowie die Festigkeiten im Prüfalalter von 28 Tagen (Normfestigkeit) untersucht und gemäß DIN EN 197-1 eingeordnet. Neben der Art und dem Anteil der Zementbestandteile (auch RC-Anteile) haben ihre stofflichen und granulometrischen Eigenschaften grundsätzlich Einfluss auf die Entwicklung des Zementstein- bzw. Mörtelgefüges und damit auf die Druckfestigkeit. Diese Einflussparameter wirken sich zudem auf die Entstehung des Porengefüges, der Porosität und der Porengrößenverteilung (PGV) von Mörteln und Betonen aus. Die Porosität und die Porengrößenverteilung RC-haltiger Zementmörtel und Betone sind für viele dauerhaftigkeitsrelevanten Eigenschaften von grundlegender Bedeutung. Zum Erreichen zulassungsrelevanter Merkmale und Bewertungskriterien, wie Leistungsfähigkeit von Zement und Dauerhaftigkeit von Beton, wurden die stofflichen und die granulometrischen Einflüsse der RC-haltigen Zemente auf die Festigkeit und auf die Porosität – jeweils im Alter von 28 Tagen – parallel untersucht. Erkenntnisse, z.B. aus „*Hydratation und Porengefüge bei Verwendung RC-haltiger Zemente*“ [15] [16] wurden berücksichtigt.

Die Feststellung der Porengrößenverteilung erfolgte mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie. In den Porengrößenverteilungen wurde das kumulierte Porenvolumen in Abhängigkeit von der Porengröße aufgetragen. Für die Beurteilung von Porengrößenverteilungen werden z. B. das maximal messbare Porenvolumen oder der Volumenanteil der sog. Gelporen herangezogen. Das maximal messbare Porenvolumen wurde als „Gesamtporosität“ bezeichnet. Die Gesamtporosität entspricht dem gesamten, für Quecksilber zugänglichen Porenraum und wird in der kumulierten Porenradienverteilung beim kleinsten Porenradius ermittelt. Die Poren, die mit dem jeweils linken, deutlich steigenden Abschnitt einer PGV-Kurve abgebildet werden, charakterisieren den feinporigen Bereich. Poren $< 0,03 \mu\text{m}$ bzw. $< 0,01 \mu\text{m}$ charakterisieren die Gelporosität. Gelporen sind praktisch undurchlässig, sie können die Transportvorgänge von Flüssigkeiten oder Gasen behindern und insofern die Beständigkeit des Zementsteingefüges gegenüber schädigenden Umgebungsbedingungen verbessern. In einigen Untersuchungen wurden die Porenanteile $< 0,01 \mu\text{m}$ und $< 0,03 \mu\text{m}$ anhand der auf 100% normierten PGV-Verteilung ermittelt. Poren mit deutlich größeren Porenradien (z. B. Kapillarporen $> 0,03 \mu\text{m}$) verringern die Dichtheit des Zementsteingefüges und machen es gegenüber Umwelteinflüssen angreifbar.

10.2 Zemente mit bis zu 30 M.-% Ziegel-Material in Kombination mit 70 M.-% CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente

10.2.1 Zemente mit Ziegelbruch bzw. Schleifstaub aus den Ziegelwerken

Unter Verwendung von 30 M.-% Ziegelschleifstaub (LB) wurden Zemente hergestellt und untersucht. Zunächst wurde der getrocknete Schleifstaub ohne zusätzliche mechanische Aufbereitung verwendet. Je Planziegelwerk und Schleifanlage hatten die Schleifstäube unterschiedliche granulometrische

sowie chemisch-mineralogische Zusammensetzungen. Die Ergebnisse der Zementprüfung wurden dem Zement RZ 4 (Referenz mit 30 M.-% gemahlenem Ziegelbruch Zib 1) gegenübergestellt. Der Ziegelbruch hatte eine Mahlfineinheit > 7200 cm²/g.

Bild 34 zeigt, dass die Zemente RZ 23 bis RZ 29 mit ungesiebttem Schleifstaub (inkl. Abplatzer) im Alter von 28 Tagen vergleichbare bzw. zum Teil höhere Festigkeiten erreichten als der Zement RZ 4 mit ca. 50 MPa. In der Quecksilberdruckporosimetrie der Normmörtel im Alter von 28 Tagen wiesen die Zementmörtel mit ungesiebttem Schleifstaub (d. h. mit ungemahlten Abplatzern) ein größeres Porenvolumen in grobporigen Bereichen auf (vgl. **Bild B-7** im Angang). Bei Anwendung dieser Zemente im Beton bzw. in Dauerhaftigkeitsprüfungen wäre mit einer Schädigung durch eindringende Flüssigkeiten und Gase zu rechnen, da in der Zementsteinmatrix – trotz vergleichbarer Normfestigkeiten - ein höherer Kapillarporenanteil festgestellt wurde.

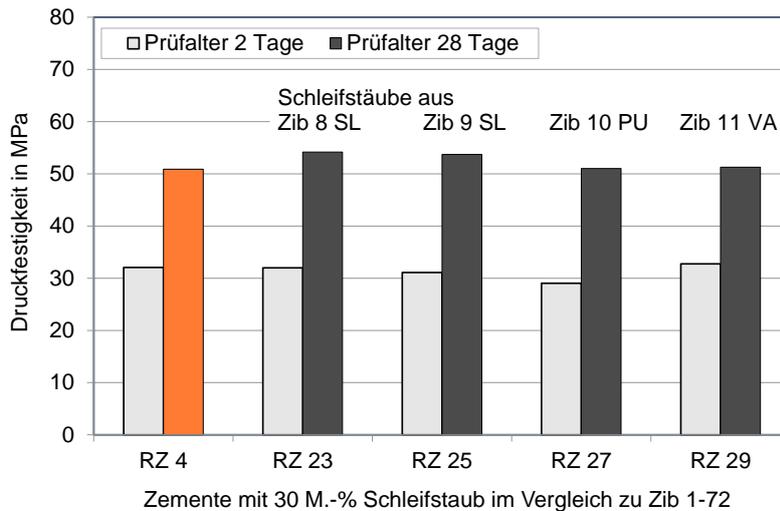


Bild 34 Druckfestigkeit der R-Zemente im Prüfalalter von zwei Tagen und 28 Tagen, Zemente mit 30 M.-% Schleifstaub (ungesiebt) im Vergleich zum Zement RZ 4 mit 30 M.-% gemahlenem Ziegelbruch (ca. 7200 cm²/g), jeweils in Kombination mit 70 M.-% CEM I 52,5 R

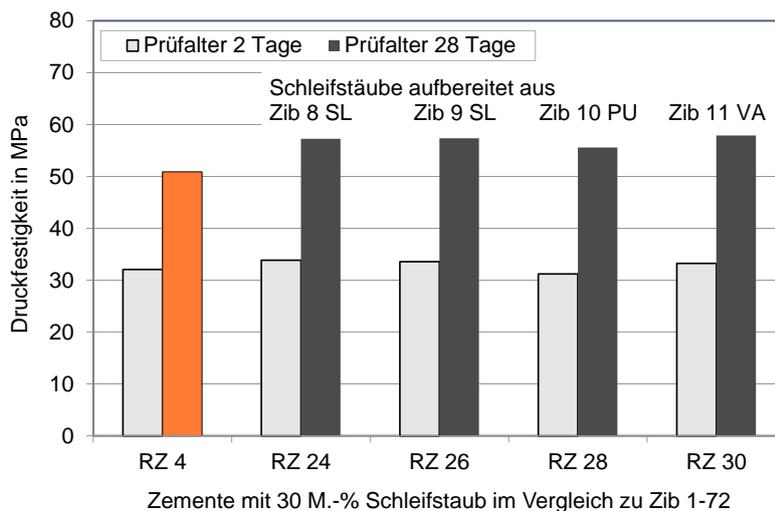


Bild 35 Druckfestigkeit der R-Zemente im Prüfalalter von zwei Tagen und 28 Tagen, Zemente mit 30 M.-% selektiv gemahlenem Schleifstaub im Vergleich zum Zement RZ 4 mit 30 M.-% gemahlenem Ziegelbruch (ca. 7200 cm²/g), jeweils in Kombination mit 70 M.-% CEM I 52,5 R

In **Bild 35** sind die Festigkeiten der Zemente mit gesiebttem und selektiv gemahlenem Schleifstaub dargestellt. Im Vergleich zu den Zementen mit nicht gemahlenem / nicht gesiebttem Material wurden durchweg höhere Druckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen erzielt. Bei gleichbleibender Herkunft der Schleifstäube sowie bei gleichbleibender Zementzusammensetzung hatte der mechanische Aufbereitungszustand der Schleifstäube einen geringfügigen Einfluss auf die Zementfeinheit und somit auf die Druckfestigkeit, insbesondere im Alter von 28 Tagen.

10.2.2 Zemente mit Ziegelschleifstaub aus den Ziegelwerken (LB) in Kombination mit Kalkstein (SP)

Zur Herstellung von Zementzusammensetzungen mit verringertem Klinkerfaktor wurden Ziegelschleifstäube gemeinsam mit Kalkstein als Hauptbestandteile verwendet. Der Klinkerfaktor wurde schrittweise von 70 % auf 50 % verringert. Die Anteile des Ziegels (Zib) und des Kalksteins (LL) variierten.

Die Ergebnisse aus der Druckfestigkeitsprüfung wurden verglichen mit dem R-Zement RZ 4 (mit 30 M.-% gemahlenem Ziegelbruch Zib 1), mit dem RZ 5 (10 M.-% gemahlenem Ziegelbruch und 20 M.-% Kalkstein) bzw. mit dem Referenzzement 2 (Ref 2 mit 30 M.-% Kalkstein LL der Mahlfineinheit rd. 3000 cm²/g).

Die im **Bild 36** dargestellten R-Zemente wurden mit 70 M.-% CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente gemischt. Die Verdünnungslinien für die 2d- und 28d-Druckfestigkeit sind im Bild eingetragen, sie beziehen sich auf 70 % der Festigkeiten des CEM I. Die Druckfestigkeiten der Zemente mit 30 M.-% gemahlenem Kalkstein (Ref 2) bzw. mit 30 M.-% gemahlenem Ziegel (RZ 4 vgl. **Bild 34**, **Bild 35**) liegen im Alter von 28 Tagen auf vergleichbarem Niveau (ca. 50 MPa) und erreichen die Verdünnungslinie knapp. Die 2d-Verdünnungslinie wurde unterschritten.

RZ 5, RZ 32 und RZ 34 wiesen neben einem Kalksteinanteil von 20 M.-% einen Ziegelanteil von 10 M.-% auf. Bei Verwendung des gesiebtten und selektiv gemahlenen Schleifstaubs Zib 8 und Zib 9 wurden im Alter von 28 Tagen mit RZ 5 bzw. mit Ref 2 vergleichbare Druckfestigkeiten im Alter von zwei und 28 Tagen erzielt.

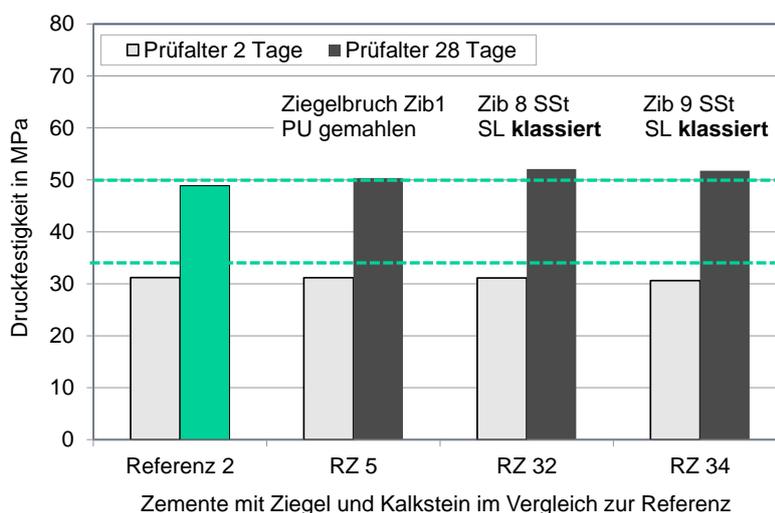


Bild 36 Druckfestigkeit der R-Zemente im Prüfalalter von zwei Tagen und 28 Tagen, Zemente mit 20 M.-% Kalkstein und 10 M.-% Ziegel im Vergleich zum Referenzzement Ref 2 mit 30 M.-% Kalkstein, jeweils in Kombination mit 70 M.-% CEM I 52,5 R

Bild 37 und **Bild 38** stellen Ergebnisse der Zemente unter Verwendung von gesiebttem Schleifstaub VA bzw. SL (Durchgang 125 µm) in unterschiedlichen Kombinationen mit Kalkstein dar. Die Zemente

RZ 45 und RZ 48 mit einem Klinkerfaktor von 70 % erreichen im Alter von 28 Tagen eine Druckfestigkeit von ca. 50 MPa und damit das Niveau der o. g. Vergleichszemente.

Für RZ 46 und RZ 49 wurden der Kalksteinanteil auf 30 M.-% erhöht und der Klinkerfaktor entsprechend gesenkt. Infolge verringerten sich die Druckfestigkeiten in jedem Prüfalalter deutlich.

Wurde bei einem Kalksteinanteil von 30 M.-% der Ziegelanteil von vormals 10 M.-% auf 15 M.-% erhöht (RZ 47 und RZ 50), nahmen die Druckfestigkeiten erneut ab und erreichten Werte von ca. 35 MPa bzw. 40 MPa.

Mit 30 M.-% Schleifstaub SL wurde schließlich noch eine CEM II/C-M-Zusammensetzung mit 50 M.-% Klinker und 20 M.-% Kalkstein untersucht (vgl. RZ 51). Dieser Zement erreichte mit 17 MPa im Alter von zwei Tagen bzw. 35 MPa im Alter von 28 Tagen Festigkeiten auf vergleichsweise geringem Niveau, das der Festigkeitsklasse 32,5 R (gemäß DIN EN 197-1) entspricht.

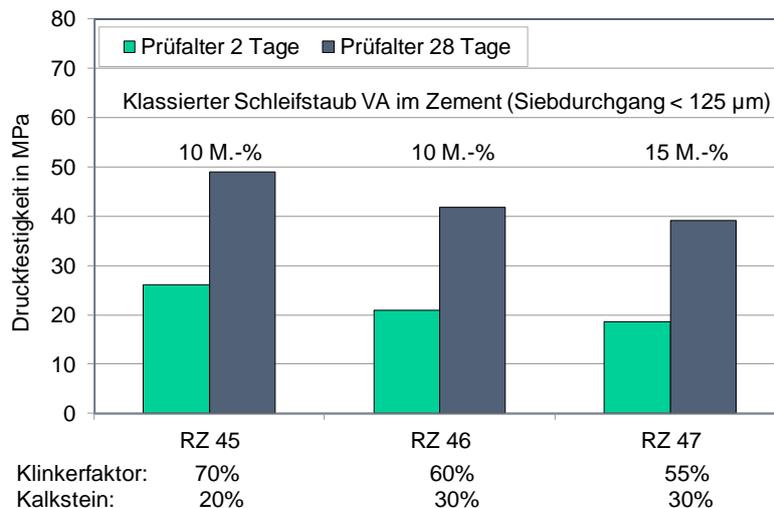


Bild 37 Druckfestigkeit der R-Zemente im Prüfalalter von zwei Tagen und 28 Tagen, Zemente Ziegel in Kombination mit Kalkstein sowie unterschiedlichen Klinkerfaktoren (R-Zemente mit 70 M.-%, 60 M.-% bzw. 55 M.-% CEM I 52,5 R)

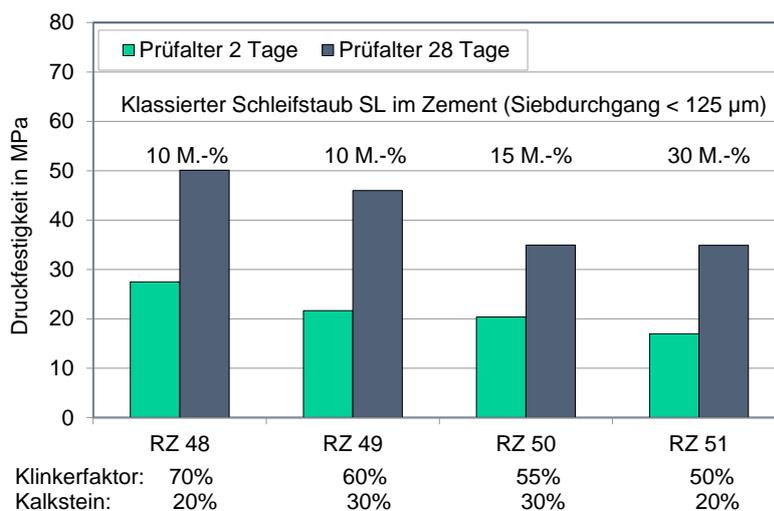


Bild 38 Druckfestigkeit der R-Zemente im Prüfalalter von zwei Tagen und 28 Tagen, Zemente Ziegel in Kombination mit Kalkstein sowie unterschiedlichen Klinkerfaktoren (R-Zemente mit 70 M.-%, 60 M.-%, 55 M.-% bzw. 50 M.-% CEM I 52,5 R)

10.3 Zemente mit bis zu 10 M.-% Ziegelschleifstaub aus den Ziegelwerken sowie ≥ 90 M.-% Portlandkalksteinzement CEM II/A-LL als Klinker- und Kalksteinkomponente

Zur Untersuchung der puzzolanischen Eigenschaften von Ziegelschleifstaub (LB) als Zementhauptbestandteil „Q“ wurden R-Zemente in Kombination mit Portlandkalksteinzement CEM II/A-LL (SP) und Portlandzement CEM I (SP), jeweils unterschiedlicher Festigkeitsklassen, labortechnisch hergestellt. Der RC-Anteil (hier jeweils klassierter Ziegelschleifstaub, Durchgang $< 125 \mu\text{m}$) der R-Zemente betrug 10 M.-% (Hauptbestandteil) oder 5 M.-% bzw. 1,1 M.-% (Nebenbestandteil). Im **Bild 39** sind die Druckfestigkeiten der R-Zemente mit 5 M.-% bzw. 10 M.-% Ziegelschleifstaub RZ 52 und RZ 53 im Vergleich zur Druckfestigkeit eines Portlandkalksteinzements CEM II/A-LL 42,5 N (kurz: PKZ) dargestellt. Während die Anfangsfestigkeit durch Zugabe von Ziegelmehl erwartungsgemäß um ca. 4 MPa bis 6 MPa abnahm, wurden an den R-Zementen (mit geringerem Klinkerfaktor) im Alter von 28 Tagen geringfügig höhere Druckfestigkeiten festgestellt als an dem Portlandkalksteinzement (PKZ mit höherem Klinkerfaktor). Die Druckfestigkeiten stiegen nach Zugabe von Ziegelmehl von 50 MPa (PKZ) auf ca. 53 MPa bzw. 55 MPa an.

Weitere Ergebnisse aus der Festigkeitsprüfung an kalkstein- und ziegelhaltigen R-Zementen sind im Anhang dargestellt. An den R-Zementen, die unter Verwendung von 5 M.-% bzw. 10 M.-% Ziegelmehl in Kombination mit Portlandkalksteinzement (PKZ) höherer Festigkeitsklasse hergestellt wurden, zeigte sich in jedem Prüfalalter eine Abnahme der Druckfestigkeit im Vergleich zum PKZ (vgl. **Bild B-3**, **Bild B-4**).

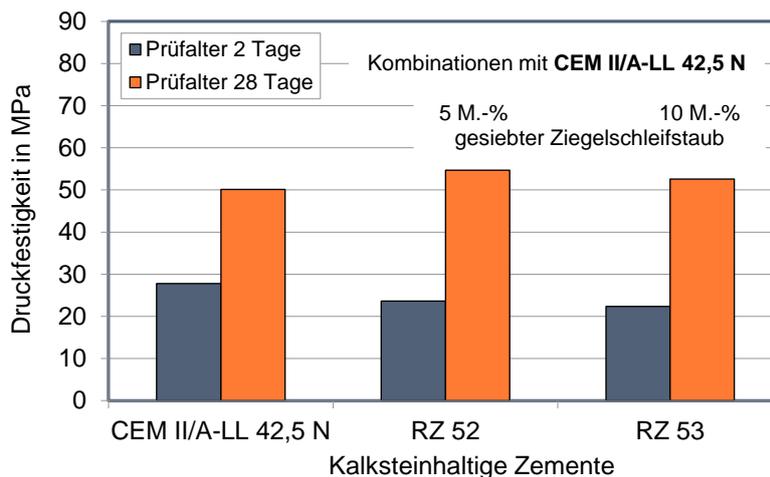


Bild 39 Druckfestigkeit kalksteinhaltiger R-Zemente mit einem RC-Anteil von 5 M.-% bzw. 10 M.-% Ziegelschleifstaub ($< 125 \mu\text{m}$) sowie 95 M.-% bzw. 90 M.-% PKZ als Klinker- und Kalksteinkomponente, Prüfalalter: 2d und 28d, CEM II/A-LL als Referenz ohne RC

Bild 40 (links) vergleicht die Druckfestigkeiten von R-Zementen mit jeweils 10 M.-% Ziegelschleifstaub. Die Ziegelmehle wurden mit CEM I bzw. CEM II/A-LL unterschiedlicher Festigkeitsklassen kombiniert. Der R-Zement mit dem höchsten Klinkeranteil (RZ 59 in Kombination mit CEM I 52,5 R) erreichte in jedem Prüfalalter vergleichsweise hohe Festigkeiten von 40 MPa (2d) bzw. 70 MPa (28d). Der R-Zement mit dem geringsten Klinkeranteil (RZ 53 in Kombination mit CEM II/A-LL 42,5 N) erreichte in jedem Prüfalalter vergleichsweise geringe Festigkeiten von 22 MPa (2d) bzw. 53 MPa (28d). Dieser R-Zement würde die Kriterien eines CEM II/B-M (Q-LL) 52,5 N gemäß DIN EN 197-1 erfüllen. Mit einer Gesamtporosität im Normmörtel von ca. 12 Vol.-% (Prüfalalter 28d) wurde ein geringerer Wert festgestellt als bei Verwendung von R-Zementen mit 30 M.-% gemahlenem RC-Material (vgl. **Bild 40** rechts). Dennoch geht aus den Porenradienverteilungen hervor, dass eine höhere Festigkeitsklasse der Klinkerkomponente bzw. die Verwendung von weniger Kalkstein zu einem dichteren Porengefüge mit geringerer Gesamtporosität sowie mit höheren Anteilen feinerer Poren führen würde.

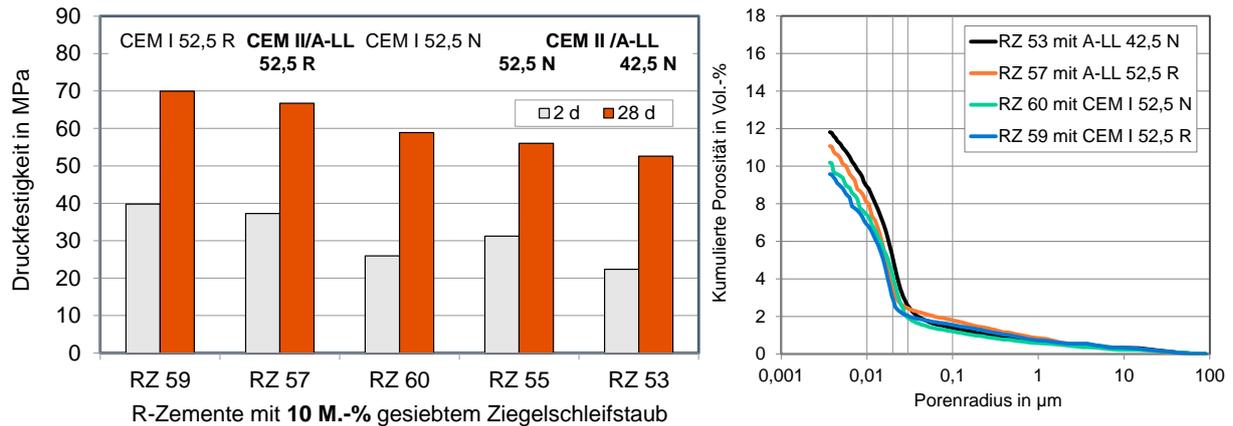


Bild 40 links: Druckfestigkeit der R-Zemente mit einem RC-Anteil von 10 M.-% Ziegelschleifstaub (< 125 µm) in Kombination mit 90 M.-% CEM I bzw. CEM II/A-LL jeweils unterschiedlicher Festigkeitsklassen, Prüfalalter: 2d und 28d
rechts: Porengrößenverteilungen der Normmörtel im Prüfalalter von 28d (kumulierte PGV), Gegenüberstellung der Mörtel mit der höchsten Normfestigkeit (RZ 59) und geringsten Normfestigkeit (RZ 53)

In weiteren Siebversuchen am Ziegelschleifstaub (LB, VDZ) wurde ein Ziegelmehl erzeugt, das einem Durchgang von 250 µm entspricht. Dieses vergleichsweise grobe Ziegelmehl wurde ebenfalls in Kombination mit CEM I bzw. CEM II/A-LL (SP) untersucht. Die Ergebnisse sind im Anhang (**Bild B-5**, **Bild B-6**) dargestellt und zeigen, dass die geringere Feinheit des Ziegelmehls keinen signifikanten Einfluss auf die Druckfestigkeit hatte. Die Festigkeiten dieser Zemente lagen im Vergleich zu entsprechenden Zementen mit feinerem Ziegelmehl auf vergleichbarem Niveau.

10.4 Zemente mit 10 M.-% bzw. 20 M.-% Ziegelschleifstaub aus den Ziegelwerken sowie Portlandkalksteinzement CEM II/A-LL als Klinker- und Kalksteinkomponente

Das folgende **Bild 41** zeigt die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen an R-Zementen mit 10 M.-% Schleifstaub (LB) unterschiedlicher Herkunft bzw. stofflicher Zusammensetzung. Es wurde jeweils der Durchgang < 125 µm verwendet und mit CEM II/A-LL (SP) unterschiedlicher Festigkeitsklassen kombiniert.

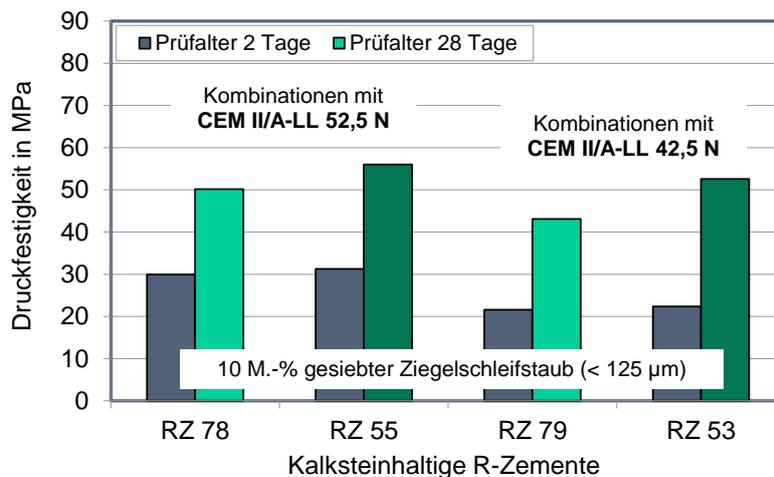


Bild 41 Druckfestigkeit kalksteinhaltiger R-Zemente mit einem RC-Anteil von 10 M.-% Ziegelschleifstaub (< 125 µm) sowie 90 M.-% PKZ als Klinker- und Kalksteinkomponente, Prüfalalter: 2d und 28d, Vergleich von Schleifstaub unterschiedlicher Herkunft (PU: RZ78, RZ79; SL: RZ55, RZ53)

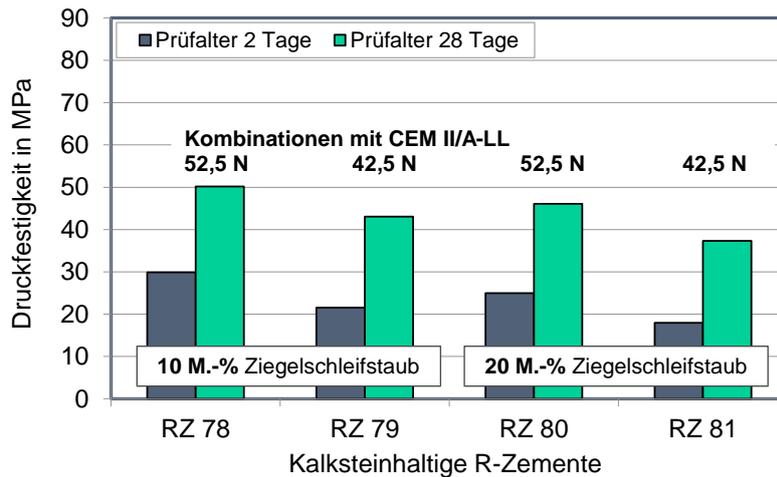


Bild 42 Druckfestigkeit kalksteinhaltiger R-Zemente mit einem RC-Anteil von 10 M.-% bzw. 20 M.-% Ziegelschleifstaub (< 125 µm) sowie PKZ unterschiedlicher Festigkeitsklassen als Klinker- und Kalksteinkomponente, Prüfalter: 2d und 28d

Aus **Bild 41** geht hervor, dass die Zemente RZ 55 und RZ 53 mit Ziegelmehl SL aufgrund ausgeprägter puzzolanscher Eigenschaften deutlich höhere Normfestigkeiten > 50 MPa erreichten als RZ 78 und RZ 79 mit Ziegelmehl PU. In der Anfangsfestigkeit zeigten sich aufgrund der unterschiedlichen stofflichen Zusammensetzungen keine Veränderungen.

Wurde bei gleicher Schleifstaubqualität der Anteil des Schleifstaubs von 10 M.-% auf 20 M.-% verdoppelt, führte dies erwartungsgemäß in jedem Prüfalter zu einer Verringerung der Druckfestigkeit. **Bild 42** fasst die Ergebnisse zusammen.

10.5 Zemente mit 30 M.-% ziegelhaltigem Mauerwerksbruch aus den Recyclingwerken in Kombination mit 70 M.-% CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente

Die RC-Brechsande bzw. RC-Feinstoffe aus Mauerwerksbruch (Mab) wiesen aufgrund ihrer unterschiedlichen Beschaffenheit sowie unbekanntem Ziegelanteilen Unterschiede im Zerkleinerungsverhalten auf. Aus den Zielmahlungen auf eine Mahlfeinheit von ca. 5000 cm²/g sind Korngrößenverteilungen entstanden, die aufgrund der Mahlbarkeit von Mauerwerk in weiten Bereichen schwankten. Die RRSB-Parameter sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 22 Ergebnisse der granulometrischen Untersuchungen an gemahlene RC-Baustoffen aus ziegelhaltigem Mauerwerksbruch Mab (Herkunft Recyclingwerke S+K)

Probe	Mahlfeinheit Blaine	Lageparameter RRSB	Steigungsmaß RRSB
RC-Werk KWH	[cm ² /g]	[µm]	[-]
Mab 1	5500	30,64	0,81
Mab 2	5000	32,45	0,79
Mab 3	5000	27,50	0,88
Mab 4 (Regelproduktion)	5200	26,77	0,81
RC-Werk LAMA			
Mab 5	5000	29,55	0,87
Mab 6	4900	31,57	0,84
Mab 7	5000	28,38	0,81
Mab 8	4900	26,62	0,89

Aus **Bild 43** und **Bild 44** gehen die Druckfestigkeiten der Zemente mit 30 M.-% Mauerwerksbruch hervor. Außerdem ist die sog. Verdünnungslinie eingetragen, die sich aus dem Vergleich mit Portlandzement CEM I 52,5 R ergeben würde, wenn seine Festigkeit um 30 % verringert würde. Alle Zemente haben im Alter von 28 Tagen die Druckfestigkeit von ca. 50 MPa erreicht bzw. überschritten. Im Alter von zwei Tagen wurden mindestens 30 MPa erreicht. Ein signifikanter Einfluss von Reaktivität oder Granulometrie der RC-Materialien wurde in Bezug auf die 28d-Zementfestigkeit nicht festgestellt.

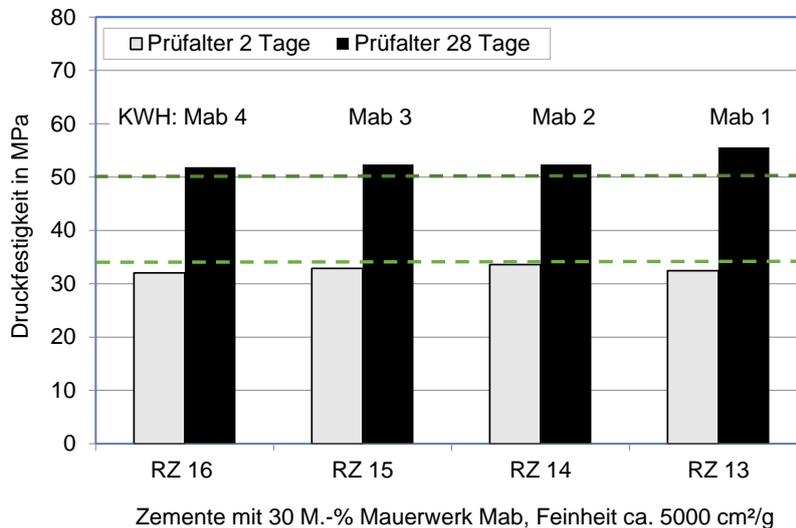


Bild 43 Druckfestigkeit der R-Zemente im Prüfalalter von zwei Tagen und 28 Tagen, Zemente mit 30 M.-% gemahlenem Mauerwerksbruch Mab (Werk KWH, S+K), jeweils in Kombination mit 70 M.-% CEM I 52,5 R

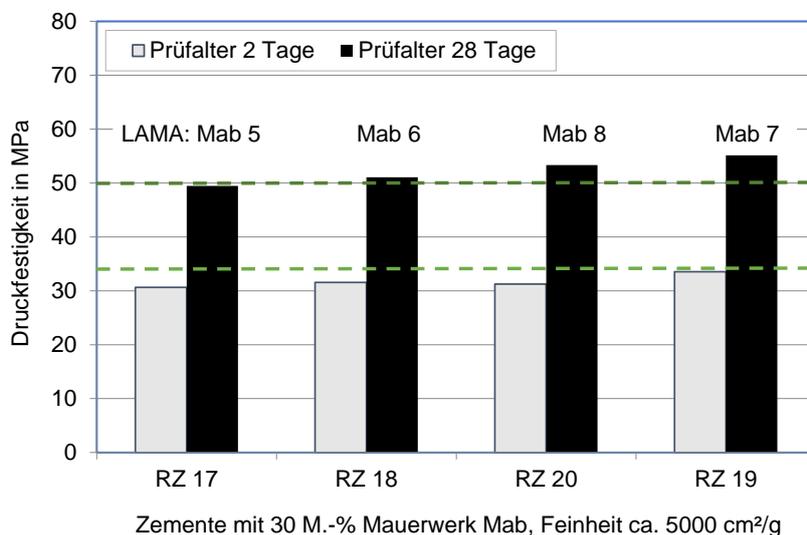


Bild 44 Druckfestigkeit der R-Zemente im Prüfalalter von zwei Tagen und 28 Tagen, Zemente mit 30 M.-% gemahlenem Mauerwerksbruch Mab (Werk LAMA, S+K), jeweils in Kombination mit 70 M.-% CEM I 52,5 R

10.6 Zemente mit 30 M.-% gemahlenem Ziegel- bzw. Mauerwerksbruch und 70 M.-% CEM II/A-LL 42,5 N als Klinker- und Kalksteinkomponente

Neben den kalksteinhaltigen R-Zementen mit 10 M.-% bzw. 20 M.-% Ziegelschleifstaub (CEM II/B-M (Q-LL)) wurden auch R-Zemente mit Kalkstein in Kombination mit gemahlenem Ziegelbruch (Zib, LB)

oder Mauerwerksbruch (Mab, S+K) untersucht. Auch diese Zemente wurden unter Verwendung von CEM II/A-LL 42,5 N (SP) als Klinker- und Kalksteinkomponente hergestellt. Der RC-Anteil dieser R-Zemente wurde bei 30 M.-% eingestellt, sodass ihr Klinkerfaktor (je nach Kalksteingehalt des PKZ) zwischen ca. 50 % und 60 % lag und damit der Zusammensetzung eines CEM II/C-M entsprach.

Aufgrund der geringen Festigkeitsklasse des PKZ (70 M.-% CEM II/A-LL 42,5 N) sowie aufgrund des hohen Anteils RC-Material (30 M.-% Ziegelbruch auf ca. 5000 cm²/g gemahlen) erreichten die entsprechenden R-Zemente (CEM II/C-M) Festigkeiten im Bereich der Festigkeitsklasse 32,5 R. Das folgende **Bild 45** stellt die Druckfestigkeiten vergleichend dar.

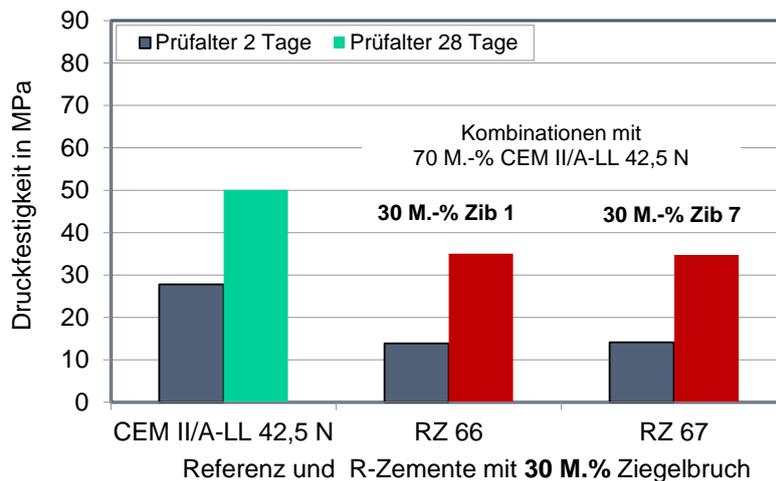


Bild 45 Druckfestigkeit kalksteinhaltiger R-Zemente mit einem RC-Anteil von 30 M.-% Ziegelbruch unterschiedlicher Herkunft (Zib: rot) sowie 70 M.-% PKZ als Klinker- und Kalksteinkomponente, Prüfalter: 2d und 28d, CEM II/A-LL 42,5 N als Referenz ohne RC

Auch unter Verwendung von ziegelhaltigem bzw. ziegelreichem Mauerwerksbruch (Mab) wurden R-Zemente der Zusammensetzung CEM II/C-M hergestellt. Die Festigkeitsklasse 32,5 R wurde von keinem dieser R-Zemente überschritten. Die Anfangsfestigkeiten lagen unabhängig von der Herkunft des Mauerwerksbruch zwischen 14 MPa und 17 MPa, die Normfestigkeiten erreichten Werte zwischen 32 MPa und 37 MPa. **Bild 46** fasst die Ergebnisse zusammen.

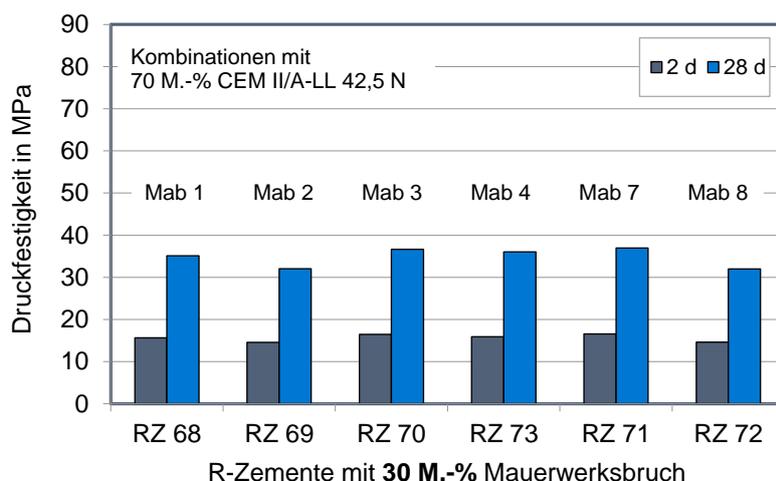


Bild 46 Druckfestigkeit kalksteinhaltiger R-Zemente mit einem RC-Anteil von 30 M.-% Mauerwerksbruch unterschiedlicher Herkunft (Mab) sowie 70 M.-% CEM II/A-LL 42,5 N als Klinker- und Kalksteinkomponente, Prüfalter: 2d und 28d

Eine Steigerung der Festigkeiten wäre grundsätzlich möglich, wenn die ziegel- und kalksteinhaltigen R-Zemente mit CEM I oder CEM II/A-LL jeweils höherer Festigkeitsklasse bzw. mit Kalkstein und RC-Material jeweils höherer Mahlfeinheit hergestellt würden. Dies würde jedoch zu einem steigenden spezifischen Arbeitsbedarf bei der Mahlung (zunehmender Mahlenergiebedarf) führen.

10.7 R-Zemente mit 30 M.-% gemahlenem Ziegel- bzw. Mauerwerksbruch in Kombination mit Portlandzement CEM I bzw. mit Portlandkalksteinzement CEM II/A-LL

Kalksteinhaltige R-Zemente bestehen i. d. R. aus drei Hauptbestandteilen: Klinker, Kalkstein und einem RC-Material. Die Hauptbestandteile können zum Teil gemeinsam gemahlen werden (vgl. Kalkstein und Klinker für CEM II/A-LL) oder sie werden vollständig getrennt aufbereitet (Kalksteinmehl, CEM I, Recyclingmehl) und anschließend gemischt. Zum Erreichen einer gewissen Leistungsfähigkeit bei verringertem Klinkerfaktor (z. B. 50 – 65 M.-% Klinker in einem klinkereffizienten R-Zement CEM II/C-M) sowie bei erhöhtem Anteil wenig bzw. nicht reaktiver Bestandteile (Summe aus Kalkstein und Recyclingmehl > 35 M.-%) ist eine granulometrische Optimierung dieses ternären Systems notwendig. Durch Anpassung der KGV getrennt aufbereiteter Zementhauptbestandteile lassen sich wesentliche Zementeigenschaften, wie z. B. die Verarbeitbarkeit oder die Druckfestigkeit, gezielt verändern.

Anmerkung: Die granulometrischen Eigenschaften getrennt bzw. gemeinsam gemahlener Zemente unterscheiden sich grundsätzlich, auch bei konstanter stofflicher Zementzusammensetzung. Der granulometrische Einfluss auf die Leistungsfähigkeit wirkt sich bis in die Dauerhaftigkeit entsprechender Betone aus. In dauerhaftigkeitsrelevanten Betonprüfungen unter Verwendung klinkereffizienter R-Zemente leisten der Klinkeranteil, die KGV des Klinkers, die Reaktivität des Bestandteils neben Klinker/Kalkstein sowie die granulometrische Zusammensetzung des R-Zements einen erheblichen Beitrag, die Bewertungskriterien des DIBt in Zulassungsprüfungen einzuhalten (vgl. [19]).

Unter Verwendung von jeweils 30 M.-% Ziegelbruch (Zib, LB) oder Mauerwerksbruch (Mab, S+K) wurden neben den CEM II/B-Zementen auch klinkereffiziente R-Zemente CEM II/C-M mit 20 M.-% fein gemahlenem Kalkstein (ca. 7000 cm²/g) hergestellt. Im **Bild 47** werden beispielsweise die Festigkeiten der R-Zemente mit Ziegelbruch Zib 1 (ca. 5000 cm²/g) verglichen. Weitere Ergebnisse sind im Anhang (**Bild B-8**, **Bild B-9**, **Bild B-10**) zusammengefasst.

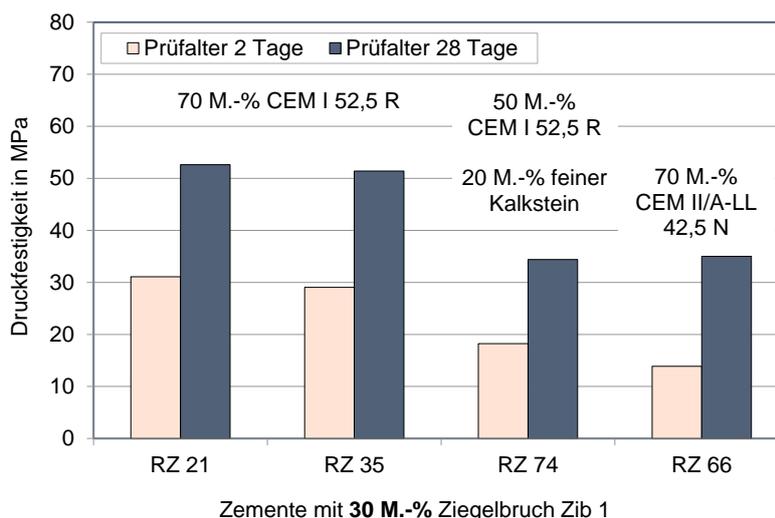


Bild 47 Klinkereffiziente R-Zemente mit einem RC-Anteil von jeweils 30 M.-% Ziegelbruch Zib 1 im Vergleich der Druckfestigkeiten, Prüfalter: 2d und 28d, Kombinationen des RC-Materials mit 70 M.-% CEM I, mit 70 M.-% CEM I und Kalkstein sowie mit 70 M.-% CEM II/A-LL

Der Vergleich zeigt zunächst, dass durch Zugabe von Kalkstein, entweder durch getrennt gemahlene Kalkstein oder durch Verwendung eines kalksteinhaltigen Zements, die Druckfestigkeiten der R-

Zemente (mit konstant 30 M.-% Ziegelbruch Zib 1) in jedem Alter deutlich abnahmen. Wurden ein CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente sowie ein Kalksteinmehl hoher Feinheit verwendet (RZ 74), so erzielte der Zement im Alter von zwei Tagen eine Druckfestigkeit von ca. 18 MPa, während der Zement RZ 66 mit höherem Klinkerfaktor und weniger Kalkstein eine geringere Anfangsfestigkeit von ca. 14 MPa erreichte. Die Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen lag bei beiden Zementen auf vergleichbarem Niveau bei ca. 35 MPa, was der Festigkeitsklasse 32,5 R entspricht.

10.8 Auswirkungen der Reaktivität des RC-Materials auf Zement- und Mörtel Eigenschaften

Unter Verwendung von gemahlenem Ziegelbruch (Zib, LB) oder Mauerwerksbruch (Mab, S+K) bzw. unter Verwendung von klassiertem Ziegelschleifstaub (LB) wurden R-Zemente vergleichend untersucht (VDZ). Der RC-Anteil der im Folgenden betrachteten R-Zemente lag bei 30 M.-%. CEM I 52,5 R (SP) wurde als Klinkerkomponente der R-Zemente verwendet, sein Anteil im R-Zement betrug 70 M.-%.

Ziegelhaltige Zemente (z. B. mit Ziegelbruch oder Schleifstaub) hatten aufgrund der leichten Mahlbarkeit weich gebrannter Ziegel mit entsprechend hohen Mahlfineheiten bzw. großen spezifischen Oberflächen einen vergleichsweise hohen Wasseranspruch. Die Zugabe von 30 M.-% eines leicht mahlbaren, reaktiven Recyclingziegels oder Schleifstaubs mit hoher innerer Porosität (z. B. Hydrationswärme > 150 J/g) hatte demnach nicht nur die Reaktivität des Zements beeinflusst, sondern auch seine granulometrischen Eigenschaften. Der Wasseranspruch nach Puntke (entspricht dem Hohlraumvolumen, das für Wasser zugänglich ist) erreichte Werte > 42 Vol.-%.

Aus schwerer mahlbarem, weniger reaktivem Mauerwerksbruch (Hydrationswärme Mauerwerk < 150 J/g) wurden Recyclingmehle geringerer Feinheiten hergestellt. Die Mahlfinheit von Mauerwerksbruch lag i. d. R. zwischen 4800 cm²/g und 5200 cm²/g nach Blaine. Die Zemente wiesen einen entsprechend geringeren Wasseranspruch < 42 Vol.-% auf, was sich günstig auf die Verarbeitbarkeit der Normmörtel auswirkte.

Bild 48 zeigt den Wasseranspruch der R-Zemente (nach Puntke) in Abhängigkeit der Reaktivität des im Zement verwendeten RC-Materials (ermittelt als Hydrationswärme nach ASTM C1897-20).

Anmerkung zu den Referenzen in den folgenden Bildern: Die Referenzen stellen „Eckpunkte“ dar und zeigen zum Vergleich Zemente mit 30 M.-% Kalkstein (grob gemahlen) bzw. 30 M.-% Zementstein (fein gemahlen) – jeweils ohne nennenswerte Reaktivität. Auch Referenzzemente mit 30 M.-% Schleifstaub (< 125 µm) mittlerer Reaktivität und Zemente mit 30 M.-% hoch reaktivem Ziegelbruch (sehr fein gemahlen) wurden zur Orientierung in die folgenden Diagramme eingetragen. Die Referenzen hatten ebenfalls einen Klinkerfaktor von ca. 70 % (70 M.-% CEM I 52,5 R), sie gehen nicht in die Auswertung der Versuchszemente ein.

Aus **Bild 49** und **Bild 50** geht hervor, dass die Hydrationswärme bzw. die Reaktivität des RC-Materials keinen signifikanten Einfluss auf die Druckfestigkeit der R-Zemente im Prüfalalter von zwei bzw. 28 Tagen hatte, sofern die RC-Materialien annähernd gleiche Mahlfineheiten aufwiesen. Während im Alter von zwei Tagen Werte von rd. 30 MPa – unabhängig von der Hydrationswärme – erreicht wurden, lagen die Werte nach 28 Tagen bei einem Großteil aller Versuchszemente (vgl. auch **Bild 56**) im Durchschnitt bei etwa 51 MPa. Je nach Mahlfinheit und Korngrößenverteilung des verwendeten RC-Materials wurden Festigkeiten zwischen 46 MPa und 56 MPa ermittelt. Einige R-Zemente, die mit feiner aufbereitetem Ziegelschleifstaub hergestellt wurden, erreichten Festigkeiten von bis zu 58 MPa.

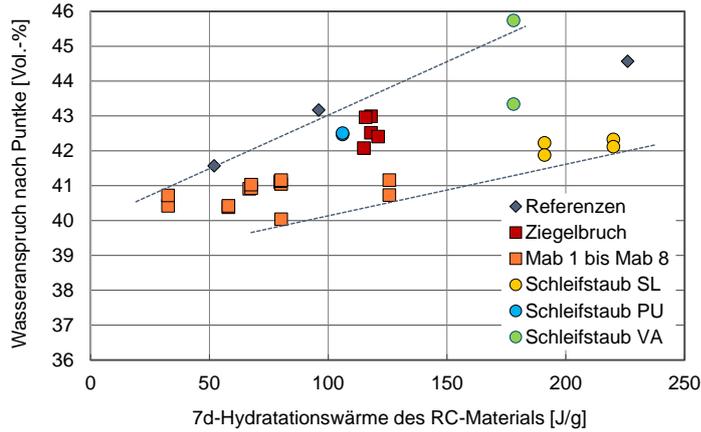


Bild 48 Wasseranspruch der R-Zemente (Punkte-Verfahren) in Abhängigkeit der Hydratationswärme der im Zement eingesetzten RC-Materialien unterschiedlicher Feinheit und Reaktivität (Hydratationswärme nach ASTM C1897-20), R-Zemente mit 30 M.-% RC-Material, 70 M.-% CEM I 52,5 R

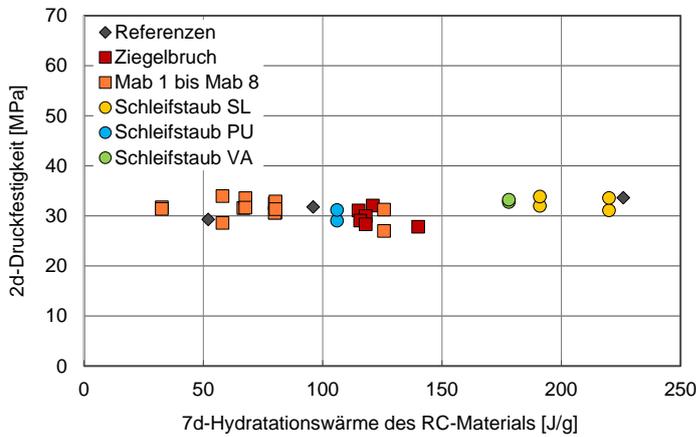


Bild 49 Anfangsfestigkeit der R-Zemente (Prüfalter: 2d) in Abhängigkeit der Hydratationswärme der im Zement eingesetzten RC-Materialien unterschiedlicher Feinheit und Reaktivität (Hydratationswärme nach ASTM C1897-20), R-Zemente mit 30 M.-% RC-Material, 70 M.-% CEM I 52,5 R

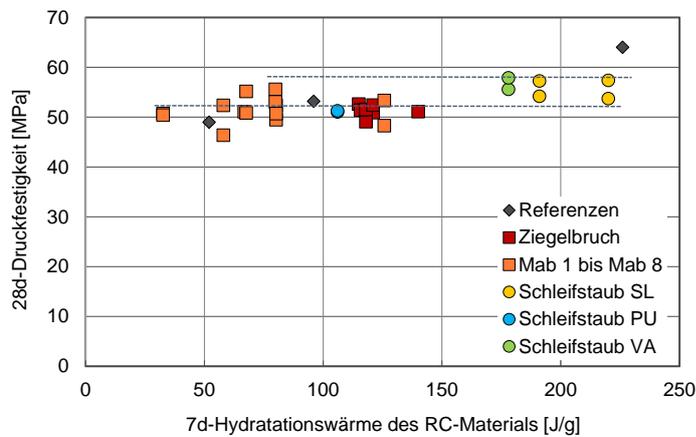


Bild 50 Normfestigkeit der R-Zemente (Prüfalter: 28d) in Abhängigkeit der Hydratationswärme der im Zement eingesetzten RC-Materialien unterschiedlicher Feinheit und Reaktivität (Hydratationswärme nach ASTM C1897-20), R-Zemente mit 30 M.-% RC-Material, 70 M.-% CEM I 52,5 R

Die Reaktivität des RC-Materials bzw. die Hydratationswärme wirkte sich auf die Gesamtporosität (ermittelt aus der kumulierten Porenradienverteilung) und insbesondere auf die Porenanteile $< 0,03 \mu\text{m}$ (ermittelt aus der auf 100 % normierten Porenradienverteilung) der Normmörtel im Prüfmörtel von 28 Tagen aus (vgl. **Bild 51** und **Bild 52**). Unter Verwendung besonders reaktiver RC-Materialien wurden vergleichsweise geringe Gesamtporositäten $< 10 \text{ Vol.-%}$ sowie weniger Porenanteile im Bereich $< 0,03 \mu\text{m}$ ermittelt als unter Verwendung weniger reaktiver RC-Materialien. Für die Gesamtporosität wurden Werte von maximal 16 Vol.-% festgestellt, was im Porenbereich $< 0,03 \mu\text{m}$ einem Anteil von etwa 80 % der Poren entspricht.

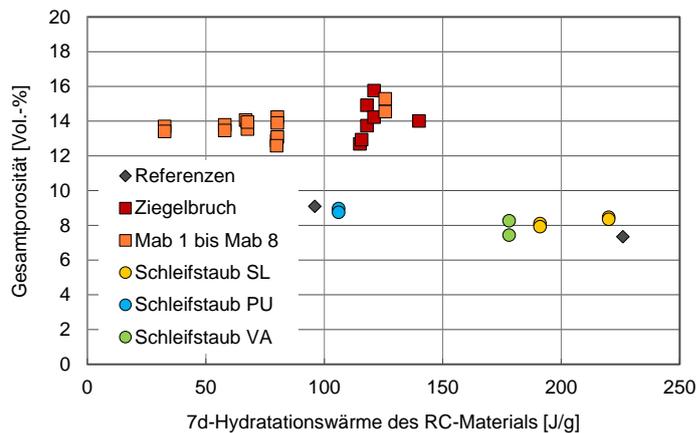


Bild 51 Gesamtporosität der R-Zement-Normmörtel (Prüfmörtel: 28d) in Abhängigkeit der Hydratationswärme der im Zement eingesetzten RC-Materialien unterschiedlicher Feinheit und Reaktivität (Hydratationswärme nach ASTM C1897-20), R-Zemente mit 30 M.-% RC-Material, 70 M.-% CEM I 52,5 R

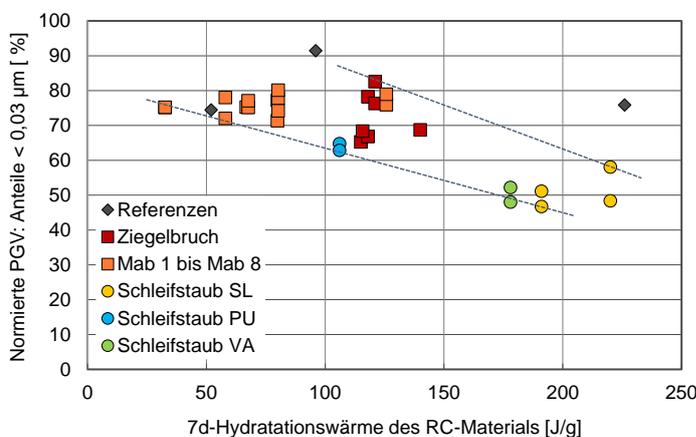


Bild 52 Porenanteile der R-Zement-Normmörtel $< 0,03 \mu\text{m}$ (Prüfmörtel: 28d, ermittelt aus normierter PGV) in Abhängigkeit der Hydratationswärme der im Zement eingesetzten RC-Materialien unterschiedlicher Feinheit und Reaktivität (Hydratationswärme nach ASTM C1897-20), R-Zemente mit 30 M.-% RC-Material, 70 M.-% CEM I 52,5 R

Auf die Entstehung der für die Dauerhaftigkeit relevanten Poren $< 0,01 \mu\text{m}$ (Gelporen) hatte die Reaktivität des RC-Materials keinen Einfluss. Im **Bild 53** wird deutlich, dass die Gelporen – unabhängig von der Hydratationswärme des RC-Materials – Anteile von etwa 20 % erreichten, in einigen Normmörteln Anteile von bis zu 28 %.

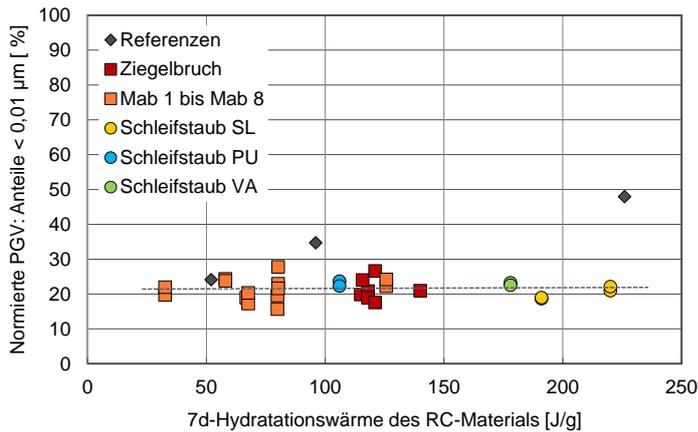


Bild 53 Gelporenanteile der R-Zement-Normmörtel < 0,01 µm (Prüfalter: 28d, ermittelt aus normierter PGV) in Abhängigkeit der Hydrationswärme der im Zement eingesetzten RC-Materialien unterschiedlicher Feinheit und Reaktivität (Hydrationswärme nach ASTM C1897-20), R-Zemente mit 30 M.-% RC-Material, 70 M.-% CEM I 52,5 R

10.9 Auswirkungen von Packungsdichte und Wasseranspruch der Zemente auf die Eigenschaften der Normmörtel

Die granulometrischen Eigenschaften wie Steigung und Lageparameter der RRSB-Verteilung jeder Zementkomponente wirken sich unterschiedlich stark auf die Packungsdichte und auf den Wasseranspruch der R-Zemente aus. Der als Klinkerkomponente eingesetzte CEM I 52,5 R hat naturgemäß eine vergleichsweise hohe Feinheit (geringer Lageparameter x') sowie eine vergleichsweise enge Korngrößenverteilung (hohes Steigungsmaß n). Je höher die Packungsdichte der R-Zemente unter Verwendung von 70 M.-% Klinker und 30 M.-% RC-Material eingestellt wurde, umso geringer wurde der Hohlraumgehalt im Zement. Dadurch stand weniger Raum für das Wasser, welches z. B. beim Anmischen der Normmörtel verwendet wird, zur Verfügung, und der Wasseranspruch des zementären Systems verringerte sich.

Dementgegen standen eine große spezifische Oberfläche sowie ein großes inneres Porenvolumen besonders niedrig gebrannter reaktiver Ziegel. Die Zugabe derartiger Ziegelmehle hatte gleichzeitig eine Erhöhung des Wasseranspruchs zur Folge.

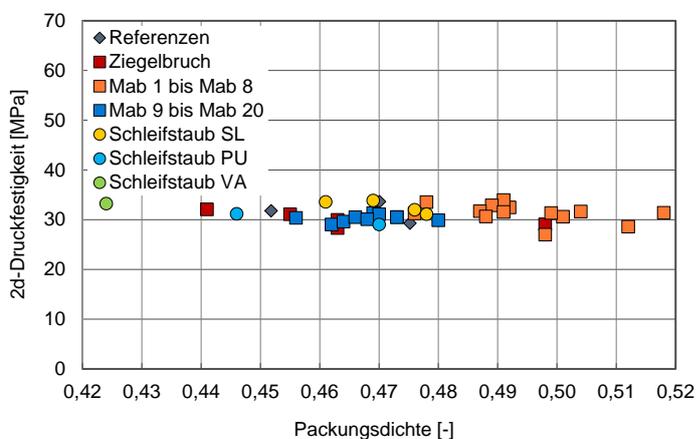


Bild 54 Anfangsfestigkeit der R-Zemente (Prüfalter: 2d) in Abhängigkeit ihrer Packungsdichte (Stampfvolumeter), R-Zemente mit 30 M.-% RC-Material, 70 M.-% CEM I 52,5 R

Im Projekt wurden die Packungsdichten der R-Zemente mittels Stampfvolumeter untersucht. Aus **Bild 54** und **Bild 55** lässt sich kein granulometrischer Einfluss auf die Anfangsfestigkeit der Normmörtel ableiten. Während sowohl die Packungsdichten der R-Zemente (von ca. 0,42 bis 0,52) als auch der Wasseranspruch nach Puntke (von ca. 39 Vol.-% bis 46 Vol.-%) in weiten Grenzen schwankte – je nach Art und Feinheit des RC-Materials – so veränderten sich die Druckfestigkeiten im Prüfalter von zwei Tagen nur geringfügig sowie unabhängig der granulometrischen Parameter. Insgesamt wurden an den R-Zementen Anfangsfestigkeiten zwischen 27 MPa und 34 MPa erzielt.

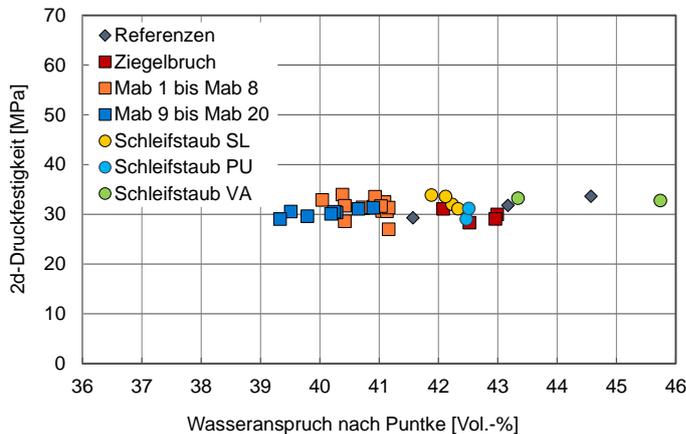


Bild 55 Anfangsfestigkeit der R-Zemente (Prüfalter: 2d) in Abhängigkeit ihres Wasseranspruchs (Puntke-Verfahren, R-Zemente mit 30 M.-% RC-Material, 70 M.-% CEM I 52,5 R)

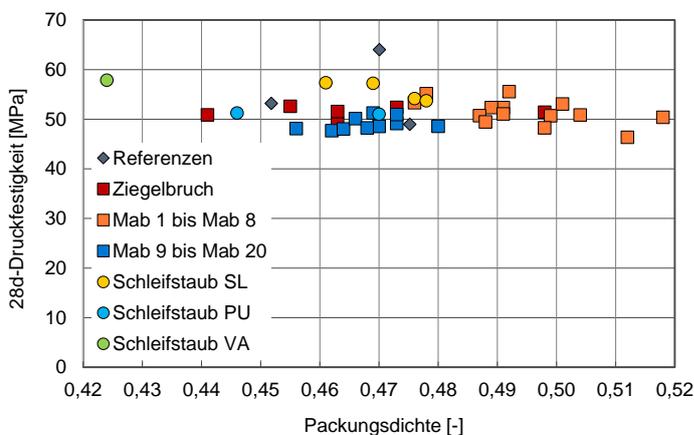


Bild 56 Normfestigkeit der R-Zemente (Prüfalter: 28d) in Abhängigkeit ihrer Packungsdichte (Stampfvolumeter), R-Zemente mit 30 M.-% RC-Material, 70 M.-% CEM I 52,5 R

Mit Blick auf die Normfestigkeiten zeigen sich in Abhängigkeit von der Packungsdichte oder dem Wasseranspruch keine eindeutigen Zusammenhänge. Aus **Bild 56** und **Bild 57** lässt sich ableiten, dass die Verwendung von Schleifstaub zu verringerten Packungsdichten < 0,48 und gleichzeitig zu einem Wasseranspruch > 42 Vol.-% führen kann. Die Druckfestigkeiten der Zemente mit Schleifstaub erreichten im Alter von 28 Tagen Werte zwischen 50 MPa und 58 MPa. Die R-Zemente mit Mauerwerksbruch erreichten bei vergleichsweise geringerem Wasseranspruch sowie höherer Packungsdichte Normfestigkeiten zwischen 46 MPa und 56 MPa.

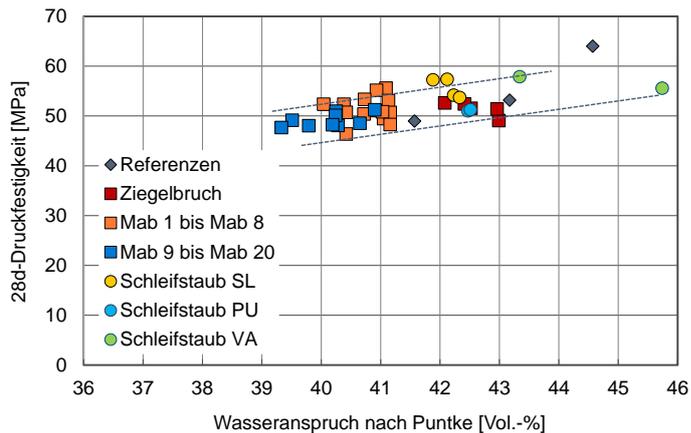


Bild 57 Normfestigkeit der R-Zemente (Prüfalter: 28d) in Abhängigkeit ihres Wasseranspruchs (Punkte-Verfahren), R-Zemente mit 30 M.-% RC-Material, 70 M.-% CEM I 52,5 R

Bild 58, Bild 59 und **Bild 60** stellen dar, welche Porositäten in den Normmörteln (Prüfalter 28d) entstehen, wenn R-Zemente sowohl mit unterschiedlichen RC-Materialien als auch mit unterschiedlichen granulometrischen Eigenschaften geprüft werden. Während die Gesamtporosität – unabhängig des Wasseranspruchs – deutliche Unterschiede in Abhängigkeit des RC-Materials zeigt (vgl. **Bild 51**), geht aus der Darstellung der dauerhaftigkeitsrelevanten Gelporenanteile ($< 0,01 \mu\text{m}$ der auf 100 % normierten PGV) hervor, dass die R-Zemente mit einem vergleichsweise geringen Wasseranspruch (z. B. $< 41 \text{ Vol.-%}$) im Normmörtel Gelporenanteile von bis zu 39 % erreichten. Bei Anwendung der R-Zemente mit hohem Wasseranspruch wurden im Normmörtel Gelporenanteile von etwa 23 % ermittelt.

In der Bewertung der Packungsdichte der R-Zemente und ihrem Einfluss auf die Gelporosität der Normmörtel wurde im **Bild 60** eine zusätzliche Unterscheidung von ziegelreichen (rot markierte Linie) und ziegelhaltigen RC-Materialien (blau markierte Linie) vorgenommen. Mit abnehmender Packungsdichte der mit ziegelreichen und ziegelhaltigen RC-Materialien hergestellten Zemente nahmen die Gelporenanteile (auf 100 % normierte PGV) der Normmörtel im Alter von 28 Tagen tendenziell zu. Bei vergleichbarer Packungsdichte der R-Zemente (z. B. im Bereich zwischen 0,46 und 0,48) wurden an den Mörteln mit ziegelhaltigem Mauerwerksbruch um bis zu 10 % höhere Gelporenanteile ermittelt als an den Mörteln mit Ziegelbruch oder Schleifstaub.

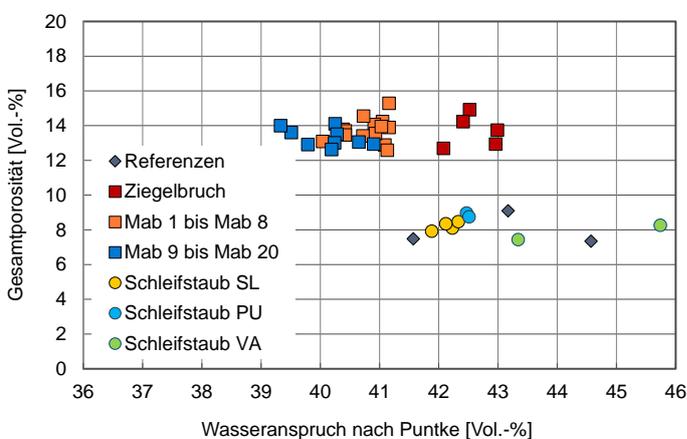


Bild 58 Gesamtporosität der R-Zement-Normmörtel (Prüfalter: 28d) in Abhängigkeit des Wasseranspruchs der R-Zemente (Punkte-Verfahren), R-Zemente mit 30 M.-% RC-Material, 70 M.-% CEM I 52,5 R

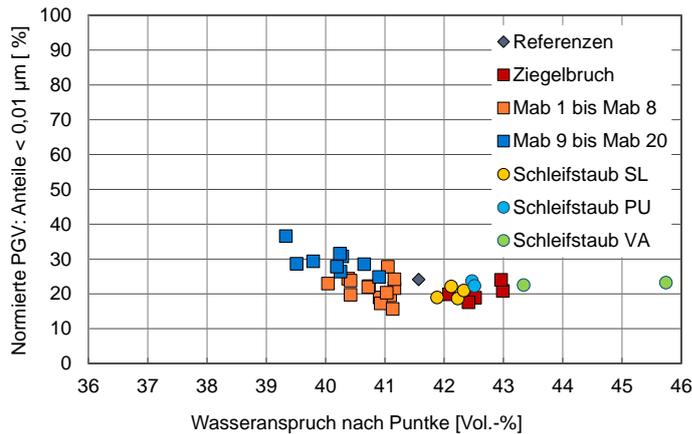


Bild 59 Gelporenanteile der R-Zement-Normmörtel < 0,01 µm (Prüfalter: 28d, ermittelt aus normierter PGV) in Abhängigkeit des Wasseranspruchs der R-Zemente (Punkte-Verfahren), R-Zemente mit 30 M.-% RC-Material, 70 M.-% CEM I 52,5 R

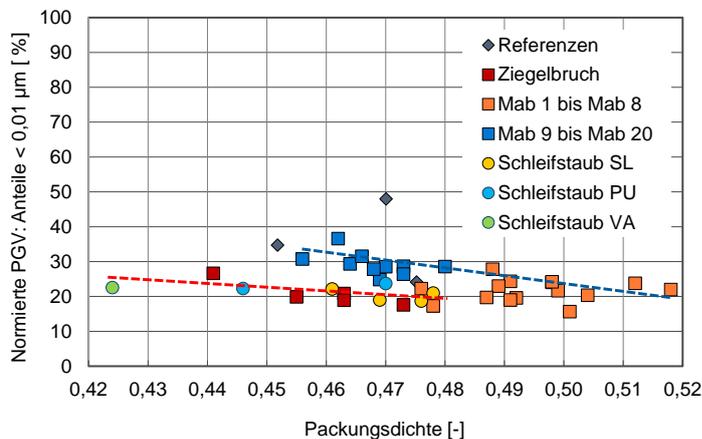


Bild 60 Gelporenanteile der R-Zement-Normmörtel < 0,01 µm (Prüfalter: 28d, ermittelt aus normierter PGV) in Abhängigkeit der Packungsdichte der R-Zemente (Stampfvolumeter), R-Zemente mit 30 M.-% RC-Material, 70 M.-% CEM I 52,5 R

10.10 Zusammenhang zwischen Porosität und Normfestigkeit

Der aus zahlreichen Untersuchungen von Normmörteln und Normzementen bekannte Zusammenhang zwischen der Normfestigkeit und der Gesamtporosität im Prüfalter von 28 Tagen ließ sich an den hier untersuchten R-Zement-Mörteln mit konstantem Recyclingfaktor sowie konstanter Klinkerkomponente nur tendenziell ableiten.

Aus dem **Bild 61** geht hervor, dass die Zemente auf der Basis von gemahlenem Ziegel- oder Mauerwerksbruch verhältnismäßig hohe Gesamtporositäten > 12 Vol.-% sowie Normfestigkeiten zwischen 46 MPa und 56 MPa erzielten. Wurden Zemente mit Schleifstaub untersucht, so lagen die Porositäten auf deutlich geringerem Niveau (< 10 Vol.-%) sowie in einem geringfügig höheren Festigkeitsbereich zwischen 51 MPa und 58 MPa.

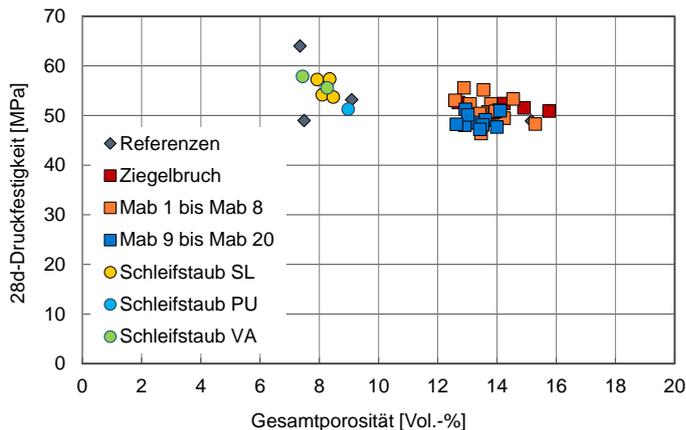


Bild 61 Druckfestigkeit der R-Zement-Normmörtel in Abhängigkeit der Gesamtporosität (kumulierte PGV), Prüfmörtel jeweils 28 Tage, Verwendung von R-Zementen mit 30 M.-% RC-Material, 70 M.-% CEM I 52,5 R

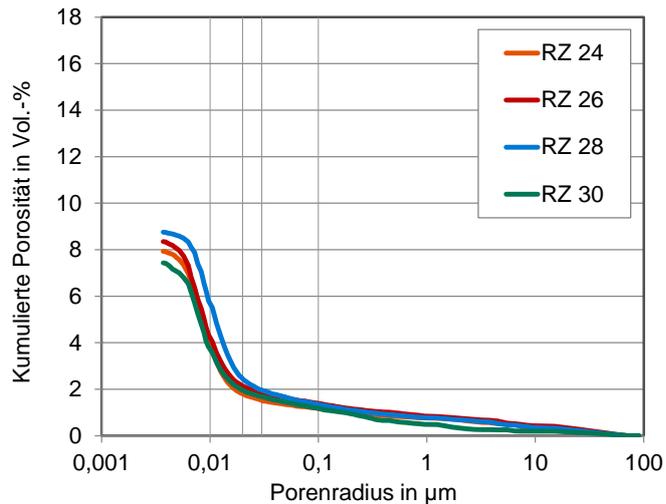
10.11 Porengrößenverteilungen ziegelhaltiger R-Zementmörtel im Vergleich sowie in Vorbereitung der Betriebsversuche

Die Anteile des ziegelhaltigen Recyclingmaterials aus den Recyclingwerken (z.B. Mab) sowie die Anteile des Ziegelmaterials aus den Ziegelwerken (z.B. Zib) nehmen deutlichen Einfluss auf die Zement- und Mörtel Eigenschaften. Neben den Anteilen im R-Zement haben auch ihre Korngrößenverteilungen sowie ihre Herkunft bzw. ihre stofflichen Zusammensetzungen Auswirkungen auf die Eigenschaften der R-Zemente.

Einige Effekte auf die Entstehung des Zementsteingefüges und seiner Porosität werden in den folgenden Beispielen anhand der Porengrößenverteilungen (PGV) dargestellt. Die PGV-Funktionen wurden an R-Zement-Normmörteln im Prüfmörtel von 28 Tagen ermittelt. Aus den Ergebnissen lässt sich ebenfalls der Einfluss des Klinkerfaktors sowie der Leistungsfähigkeit des Klinkers ableiten. Je nach Festigkeitsklasse der Klinkerkomponente und je nach Anteil der Zementbestandteile neben Klinker wurden die R-Zement-Mörtel Eigenschaften verändert. Außerdem wurden zum Vergleich R-Zementmörtel untersucht, die sowohl Ziegel als auch Kalkstein als Hauptbestandteil enthielten, um Klinker zu substituieren.

Aus den folgenden Bildern gehen ergänzende, detaillierte Informationen zu den Abschnitten 10.8, 10.9 und 10.10 hervor.

Bild 62 zeigt PGV-Kurven von Normmörteln, die unter Verwendung von R-Zementen mit jeweils 30 M.-% aufbereitetem Ziegelschleifstaub (Zib, LB) hergestellt wurden. Die Schleifstäube aus den Ziegelwerken wurden gesiebt, der Sieb-Rückstand wurde gemahlen und anschließend mit dem Sieb-Durchgang gemischt. Die Mörtel weisen im Vergleich zu anderen ziegelhaltigen R-Zement-Mörteln eine Gesamtporosität auf sehr niedrigem Niveau auf. Je nach Herkunft des Ziegels sowie je nach Anteil des gemahlenden Rückstands wurden Gesamtporositäten im Bereich zwischen 7 Vol.-% und 9 Vol.-% ermittelt. Der Großteil der Poren lag im Gelporenbereich $< 0,02 \mu\text{m}$ bzw. $< 0,01 \mu\text{m}$.

**Bild 62**

Porengrößenverteilung am Normmörtel im Prüfal-
ter von 28 Tagen, Verwendung von R-Zementen
mit 70 M.-% CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente
sowie 30 M.-% aufbereitetem Ziegelschleifstaub

RZ 24 mit Zib 8

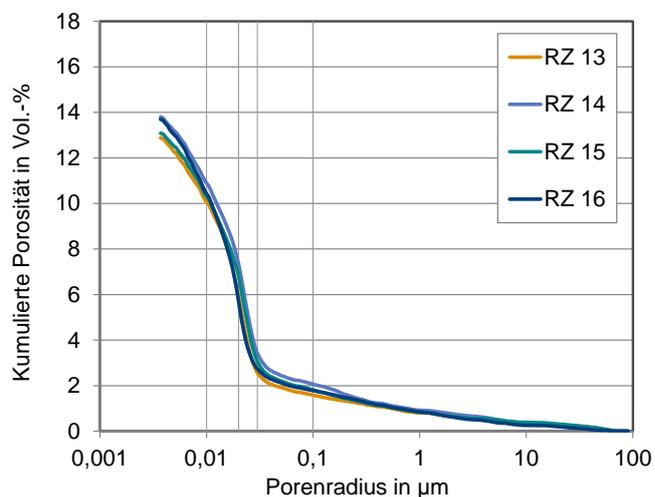
RZ 26 mit Zib 9

RZ 28 mit Zib 10

RZ 30 mit Zib 11

Wurden im R-Zement 30 M.-% Mauerwerksbruch aus den Recyclingwerken (Mab, S+K) verwendet, so lagen die PGV-Kurven in größeren Porenbereichen.

Aus **Bild 63** und **Bild 64** geht hervor, dass Gesamtporositäten zwischen ca. 13 Vol.-% und 15 Vol.-% ermittelt wurden. Im Vergleich zu reinem Ziegelschleifstaub variierten im Mauerwerksbruch sowohl der Ziegelanteil als auch die Ziegelart. Zudem wurden die Mab-Proben auf geringere Feinheiten von ca. 5000 cm²/g gemahlen, was aufgrund der geringeren spezifischen Oberfläche zu einer entsprechend geringeren Reaktivität führte. Im Vergleich zu R-Zementen mit feinst aufbereitetem Ziegelschleifstaub wurden unter Verwendung von gemahlenem Mauerwerksbruch geringere Anteile an Gelporen sowie etwas höhere Anteile an größeren Kapillarporen ermittelt.

**Bild 63**

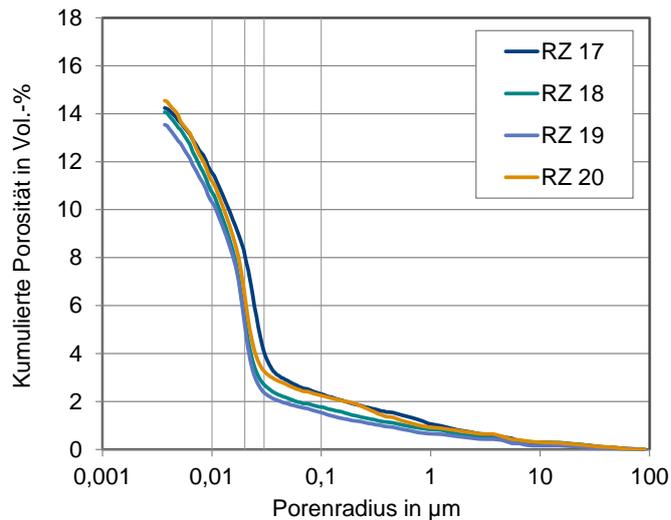
Porengrößenverteilung am Normmörtel im Prüfal-
ter von 28 Tagen, Verwendung von R-Zementen
mit 70 M.-% CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente
sowie 30 M.-% ziegelhaltigem Mauerwerksbruch

RZ 13 mit Mab 1 (Monocharge ziegelreich)

RZ 14 mit Mab 2 (Monocharge ziegelreich)

RZ 15 mit Mab 3 (Monocharge ziegelreich)

RZ 16 mit Mab 4 (Regelbetrieb ziegelhaltig)

**Bild 64**

Porengrößenverteilung am Normmörtel im Prüfalalter von 28 Tagen, Verwendung von R-Zementen mit 70 M.-% CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente sowie 30 M.-% ziegelhaltigem Mauerwerksbruch

RZ 17 mit Mab 5 (Monocharge ziegelreich)

RZ 18 mit Mab 6 (Monocharge ziegelreich)

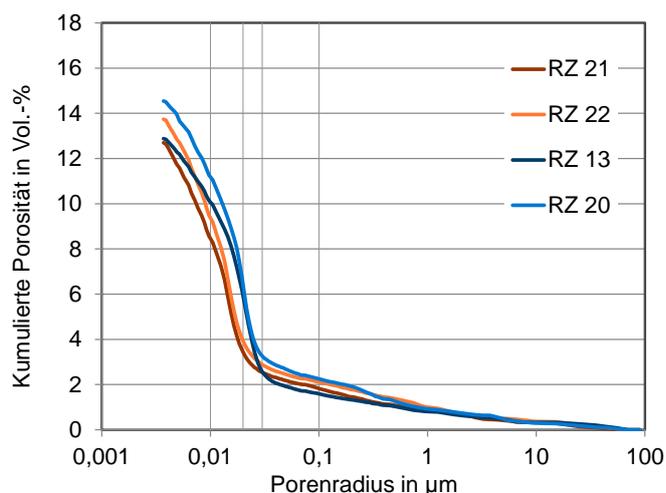
RZ 19 mit Mab 7 (Monocharge ziegelreich)

RZ 20 mit Mab 8 (Monocharge, ziegelreich)

Bild 65 vergleicht Einflussparameter auf die Lage und Form der PGV-Kurven. Während die R-Zemente RZ 21 und RZ 22 mit 30 M.-% reinem Ziegelbruch (Zib 1) aus Ziegelwerken hergestellt wurden, so wurden RZ 13 (mit Mab 1) und RZ 20 (Mab 8) mit ziegelreichem Mauerwerksbruch aus Recyclingwerken hergestellt. So lagen die Mörtel mit Ziegelbruch weiter in feinporigen Bereichen $< 0,02 \mu\text{m}$ und die Mörtel mit Mauerwerksbruch wiesen hingegen höhere Anteile größerer Poren μm auf.

Die Verwendung des besonders ziegelreichen Mauerwerksbruchs Mab 8 führte zu einer geringfügig höheren Gesamtporosität sowie zu höheren Anteilen feinerer Poren (vgl. 20) als bei Verwendung von Mab 1 (vgl. RZ 13). Ein ähnlicher Effekt zeigte sich, wenn die Mahlfineinheit von Ziegelbruch von $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ auf $6000 \text{ cm}^2/\text{g}$ erhöht wurde. Der Mörtel RZ 22 wies im Vergleich zum Mörtel RZ 21 eine höhere Gesamtporosität sowie höhere Anteile feinerer Poren auf.

Die o.g. Beispiele zeigen, dass sich die Porengrößenverteilungen von R-Zementmörteln trotz konstantem Klinkerfaktor (70% CEM I 52,5 R) signifikant beeinflussen lassen, insbesondere über die Ziegelherkunft, die Ziegelart, den Ziegelanteil und die Mahlfineinheit des verwendeten RC-Materials im R-Zement.

**Bild 65**

Porengrößenverteilung am Normmörtel im Prüfalalter von 28 Tagen, Verwendung von R-Zementen mit 70 M.-% CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente sowie 30 M.-% Ziegelbruch bzw. ziegelhaltigem Mauerwerksbruch

RZ 21 mit Zib 1 (Zib $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$)

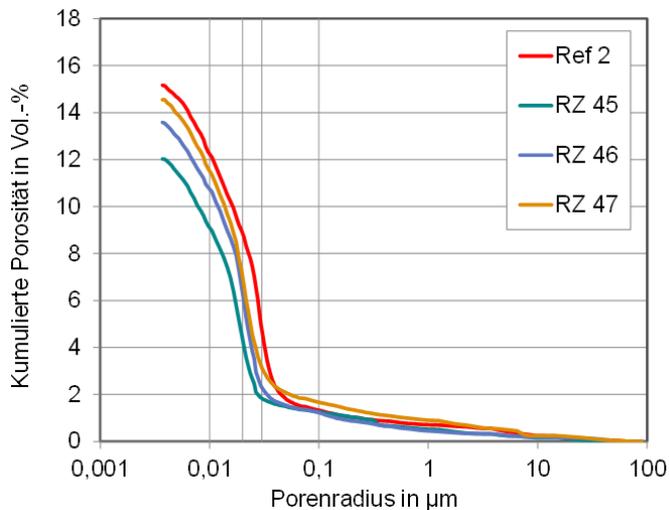
RZ 22 mit Zib 1 (Zib $6000 \text{ cm}^2/\text{g}$)

RZ 13 mit Mab 1 (Mab $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$)

RZ 20 mit Mab 8 (Mab $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$)

Die Porengrößenverteilungen (PGV) der Mörtel mit RZ 45 bis RZ 51 sind in **Bild 66** und **Bild 67** abgebildet. (Die Druckfestigkeiten dieser ziegel- und kalksteinhaltigen Zementmörtel gehen aus **Bild 37** und **Bild 38** hervor.) Die kumulierten Verteilungskurven der R-Zementmörtel wurden dem

Referenzmörtel Ref 2 (CEM II/B-LL mit 30 M.-% Kalkstein und 70 M.-% CEM I 52,5 R) gegenübergestellt. Der Kalkstein hatte mit ca. 3000 cm²/g eine geringere Mahlfineinheit als die ziegelhaltigen Materialien.

**Bild 66**

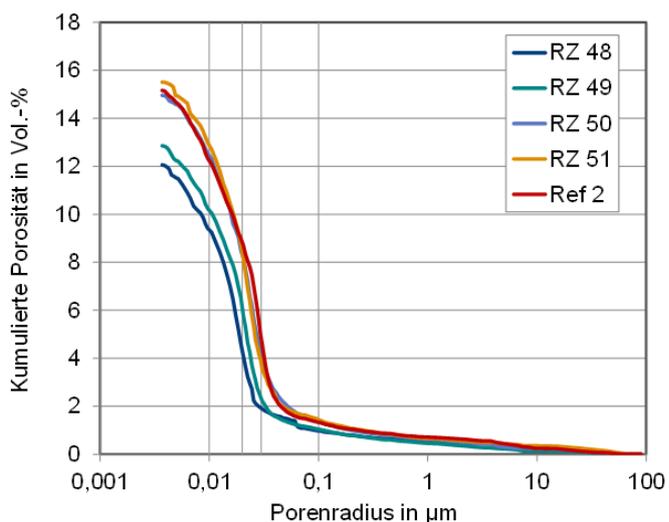
Porengrößenverteilung am Normmörtel im Prüfalalter von 28 Tagen, Verwendung von R-Zementen im Vergleich zum Referenzmörtel Ref 2 (30% LL)

Zemente mit gesiebttem Ziegelschleifstaub in Kombination mit Kalkstein sowie unterschiedlichen Klinkerfaktoren (R-Zemente mit 70 M.-%, 60 M.-%, 55 M.-% bzw. 50 M.-% CEM I 52,5 R)

RZ 45: 10% Zib 11, 20% LL

RZ 46: 10% Zib 11, 30% LL

RZ 47: 15% Zib 11, 30% LL

**Bild 67**

Porengrößenverteilung am Normmörtel im Prüfalalter von 28 Tagen, Verwendung von R-Zementen im Vergleich zum Referenzmörtel Ref 2 (30% LL)

Zemente mit gesiebttem Ziegelschleifstaub in Kombination mit Kalkstein sowie unterschiedlichen Klinkerfaktoren (R-Zemente mit 70 M.-%, 60 M.-%, 55 M.-% bzw. 50 M.-% CEM I 52,5 R)

RZ 48: 10% Zib 8, 20% LL

RZ 49: 10% Zib 8, 30% LL

RZ 50: 15% Zib 8, 30% LL

RZ 51: 30% Zib 8, 20% LL

Aus den Bildern geht hervor, dass der Referenzmörtel (Ref 2 mit 30 M.-% Kalkstein und 70 M.-% CEM I) mit ca. 15 Vol.-% eine vergleichsweise hohe Gesamtporosität aufweist. Zudem liegt der linke Ast seiner PGV-Kurve weiter im grobporigen Bereich (z. B. > 0,03 µm) als die vergleichbaren Mörtel RZ 45 und RZ 48 mit vergleichbarem Klinkerfaktor. Die Gesamtporositäten der Mörtel mit RZ 45 und RZ 48 lagen mit rd. 12 Vol.-% auf deutlich geringerem Niveau, was auf die Verwendung von gesiebttem Schleifstaub hoher Feinheit sowie auf die puzzolanische Reaktion des gebrannten Ziegeltons zurückzuführen ist. Stoffliche und granulometrische Einflüsse haben zu einem feineren Porengefüge geführt. Ein Einfluss auf die Normdruckfestigkeit wurde an den Zementen mit Klinkerfaktor 70 % nicht festgestellt.

Mit weiter abnehmendem Klinkerfaktor sowie zunehmenden Kalkstein- bzw. Ziegelgehalten im Zement nahmen die Gesamtporositäten der Normmörtel RZ 49 bis RZ 51 sowie RZ 46 und RZ 47 zu und lagen zwischen rd. 13 Vol.-% und 15 Vol.-%. Die PGV-Kurven der Zemente RZ 50, RZ 51 und RZ 47 näherten sich der PGV-Kurve des Referenzmörtels an, obwohl die ziegel-/kalksteinhaltigen R-Zemente mit 50 % bzw. 55 % einen deutlich geringeren Klinkerfaktor aufwiesen. Auch an den klinkereffizienten Zementen wurden auf die Druckfestigkeit sowie auf die Porosität unterschiedliche

Auswirkungen festgestellt. Den abnehmenden Festigkeiten infolge eines verringerten Klinkerfaktors stehen nicht zwingend zunehmende Porositäten gegenüber. Sich überlagernde stoffliche und granulometrische Einflüsse können zum Teil – je nach Zementzusammensetzung – kompensiert oder verstärkt werden.

In weiterführenden Versuchen wurden R-Zemente aus den folgenden Ausgangsstoffen hergestellt,

- Ziegelbruch bzw. Mauerwerksbruch als ziegelhaltiges RC-Material,
- Portlandzement bzw. Portlandkalksteinzement als Klinkerkomponente,
- Kalksteinmehl bzw. Portlandkalksteinzement als Kalksteinkomponente.

Auch in diesen Versuchen zeigte sich die Bedeutung der stofflichen und granulometrischen Zementzusammensetzungen. Je weiter der Klinkerfaktor eines R-Zements verringert wurde, desto wichtiger wurden Optimierungsarbeiten, um dem „Verdünnungseffekt“ auf Druckfestigkeit und Porengefüge entgegenzuwirken. Im Anhang (**Bild B-8**, **Bild B-9**, **Bild B-10**) wurden einige Versuchsergebnisse zusammengefasst.

MEILENSTEIN: Großtechnische Betriebsversuche zur Herstellung ziegelhaltiger R-Zemente

11 Vorbereitung großtechnischer Betriebsversuche zur Herstellung ziegelhaltiger R-Zemente im Zementwerk

11.1 Festlegung der Zusammensetzung der Werkzemente

11.1.1 Zusammensetzung der Zemente aus getrenntem Aufbereiten und anschließendem Mischen (BV1)

Die labortechnische Herstellung der kalksteinhaltigen R-Zemente und die Untersuchungen entsprechender Normmörtel bildeten ebenfalls eine Grundlage zur Vorbereitung der großtechnischen Betriebsversuche (kritischer Meilenstein). Die Bestandteile der kalksteinhaltigen Laborzemente wurden überwiegend getrennt aufbereitet (gemahlen/gesiebt) und anschließend gemischt. Einige Laborzemente wurden bis in den Beton untersucht.

In den Projektgesprächen der Verbundpartner wurde ein alternativer Betriebsversuch thematisiert, der am Mehrkammermischsilo (MKMS, SP) unter Verwendung eines puzzolanischen Schleifstaubs aus den Ziegelwerken (Hauptbestandteil Q, < 125 µm, LB) durchzuführen wäre. Zur Festlegung einer praktisch umsetzbaren Zementzusammensetzung wurden nunmehr R-Zemente mit 10 M.-% Schleifstaub (< 125 µm) untersucht, die am MKMS (SP) herstellbar wären (vgl. **Tabelle 23**).

Anmerkung: Der geringe Anteil Schleifstaub wurde auch aufgrund des hohen logistischen Aufwands bei der Aufbereitung des Schleifstaubs festgelegt (Lieferung des Schleifstaubs inkl. Abplatzer von LB zum VDZ, halbertechnische Siebung im VDZ-Technikum, Lieferung des Siebdurchgangs < 125 µm vom VDZ zu SP). Außerdem war zu berücksichtigen, dass für den Betrieb der Mischanlage ein Mindestvolumen zu befüllen wäre.

Tabelle 23 Zusammensetzung der Laborzemente CEM II/B-M (Q-LL) in Vorbereitung der Betriebsversuche

R-Zement CEM II/B-M (Q-LL)	Klinkerkomponente K	Puzzolanische Ziegelkomponente Q	Kalksteinkomponente LL
(VDZ)	(SP)	(LB)	(SP)
RZ-BV-1	70 M.-% CEM I 52,5 R	10 M.-% Schleifstaub	20 M.-% KSM
RZ-BV-2	70 M.-% CEM I 52,5 N	10 M.-% Schleifstaub	20 M.-% KSM
RZ-BV-3	65 M.-% CEM I 52,5 R	10 M.-% Schleifstaub	25 M.-% KSM
RZ-BV-4	65 M.-% CEM I 52,5 N	10 M.-% Schleifstaub	25 M.-% KSM

11.1.1.1 Druckfestigkeiten im Vergleich (in Vorbereitung der Betriebsversuche)

Die folgenden Bilder fassen die Druckfestigkeiten der R-Zemente CEM II/B-M (Q-LL) zusammen und vergleichen die Ergebnisse mit Portlandkalksteinzementen CEM II/A-LL unterschiedlicher Festigkeitsklassen (ohne Ziegelmehl).

Bild 68 verdeutlicht, dass ein kalksteinhaltiger R-Zement mit 10 M.-% Schleifstaub und einem Klinkerfaktor von 70 % (mittleres Balkenpaar) die Anforderungen an die höchste Festigkeitsklasse 52,5 R erreichte, wenn ein CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente eingesetzt wurde.

Bild 69 zeigt, dass eine Erhöhung des Kalksteinanteils von 20 M.-% auf 25 M.-% (Klinkerfaktor von 70 % auf 65 %, jeweils CEM I 52,5 R) zu einer Verringerung der Druckfestigkeit führte. Mit einer Anfangs-festigkeit von ca. 29 MPa und einer Normfestigkeit von ca. 51 MPa wurde die Festigkeitsklasse 42,5 R sicher erreicht. Die Ergebnisse des Zements mit 25 M.-% Kalkstein und 10 M.-% Ziegelmehl (vgl. Balken Mitte) liegen im Vergleich zum CEM II/A-LL 42,5 N (vgl. Balken links, ohne Ziegelmehl) – trotz eines deutlichen Unterschiedes im Klinkerfaktor – im ähnlichen Bereich.

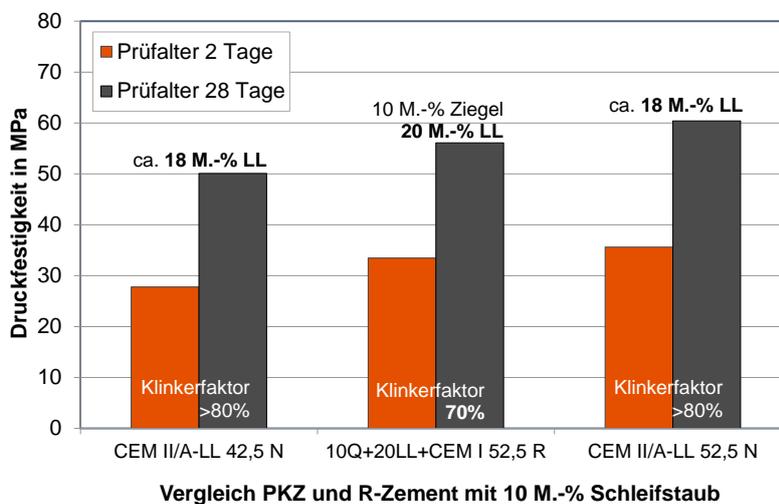


Bild 68 Portlandkalksteinzemente CEM II/A-LL im Vergleich zu einem kalksteinhaltigen R-Zement CEM II/B-M (Q-LL) mit einem RC-Anteil von 10 M.-% Ziegelschleifstaub (< 125 µm) und einem Kalksteinanteil von 20 M.-%, Druckfestigkeit im Prüfalalter von 2d und 28d

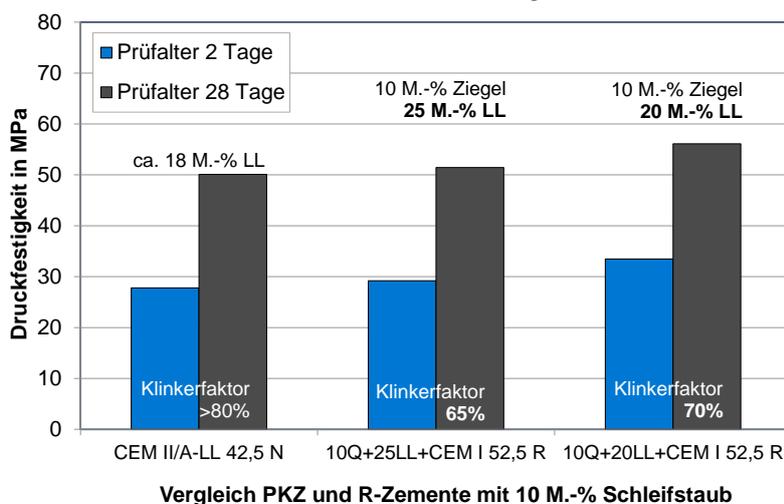


Bild 69 Portlandkalksteinzement CEM II/A-LL im Vergleich zu kalksteinhaltigen R-Zementen CEM II/B-M (Q-LL) mit einem RC-Anteil von 10 M.-% Ziegelschleifstaub (< 125 µm) und einem Kalksteinanteil von 25 M.-% bzw. 20 M.-%, Druckfestigkeit im Prüfalalter von 2d und 28d

Bild 70 fasst alle Ergebnisse der Zemente aus **Tabelle 23** zusammen. Unter der Verwendung von CEM I der Festigkeitsklassen 52,5 R und 52,5 N sowie mit Variationen der Kalksteingehalte (20 M.-%, 25 M.-%) wurden an den CEM II/B-M (Q-LL)-Zementen Festigkeitsklassen in einem breiten Bereich zwischen 52,5 R bis 32,5 R erzielt. Die Granulometrie der jeweiligen Ausgangsstoffe blieb konstant.

Aus dem Abschnitt 11.1.1.2 geht hervor, dass die Veränderung der Zementzusammensetzung auch Einfluss auf die Lage und Steigung der Porenradienverteilungen der Normmörtel im Alter von 28 Tagen hatte.

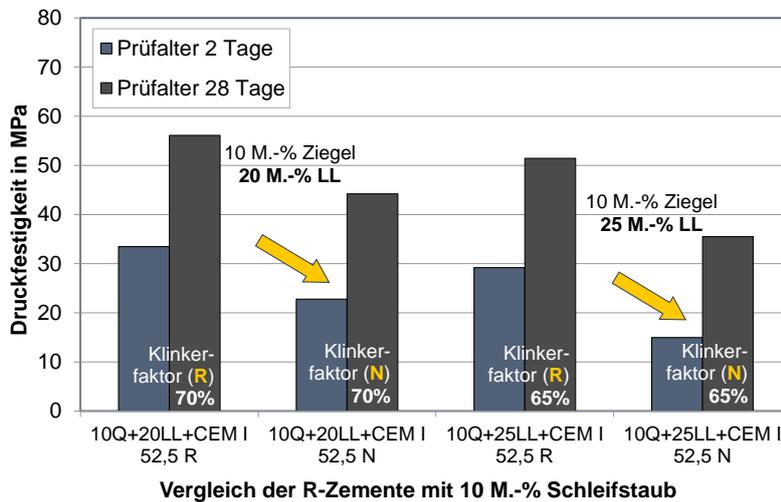


Bild 70 Kalksteinhaltige R-Zemente CEM II/B-M (Q-LL) mit einem RC-Anteil von jeweils 10 M.-% Ziegelschleifstaub (< 125 μm) und einem Kalksteinanteil von 20 M.-% (links) bzw. 25 M.-% (rechts), Vergleich der Druckfestigkeiten im Prüfalalter von 2d und 28d (Verwendung von CEM I unterschiedlicher Festigkeitsklassen als Klinkerkomponenten)

11.1.1.2 Porengrößenverteilungen im Vergleich (in Vorbereitung der Betriebsversuche)

Im **Bild 71** sind die Porengrößenverteilungen (PGV) der Normmörtel abgebildet: links als kumulierte Verteilung, rechts als normierte Verteilung. Die deutlich unterschiedlichen Verläufe der PGV-Kurven deuten darauf hin, dass sich das Porengefüge in sehr unterschiedlicher Weise gebildet hat, was insbesondere auf die KGV des Klinkers sowie auf den Anteil des Kalksteins zurückzuführen ist.

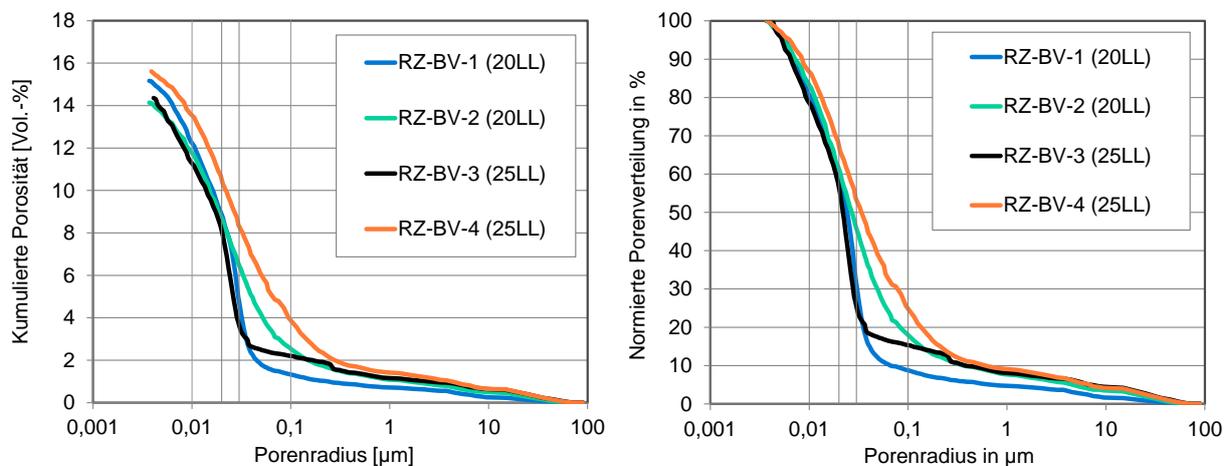


Bild 71 links: Porengrößenverteilungen der Normmörtel im Prüfalalter von 28d (kumulierte PGV), rechts: auf 100 % normierte Porengrößenverteilungen der Normmörtel im Prüfalalter von 28d, Gegenüberstellung der CEM II/B-M (Q-LL)-Mörtel mit einem RC-Anteil von 10 M.-% Ziegelschleifstaub (< 125 μm) im R-Zement, vgl. **Tabelle 23**

Die höchste Gesamtporosität am Mörtel wies der Zement RZ-BV-4 mit 25 M.-% Kalkstein sowie CEM I geringerer Festigkeitsklasse auf. Der flache Kurvenverlauf geht aus beiden Darstellungen deutlich hervor.

Der Mörtel mit RZ-BV-1 zeigte den Kurvenverlauf mit der deutlichsten Steigung des linken Astes, was auf einen hohen Anteil dauerhaftigkeitsrelevanter Gelporen hindeutet. Der Anteil im Bereich größerer Poren war vergleichsweise gering.

Aus den Balkendiagrammen (**Bild 72**) geht hervor, dass die Zemente mit geringerem Kalksteinanteil bzw. mit CEM I höherer Festigkeitsklasse eine Gesamtporosität zwischen ca. 14 Vol.-% und 15 Vol.-% erreichen konnten (linkes Bild: kumuliert). Gleichzeitig entstand ein Porengefüge, das einen Gelporenanteil von etwa 20-30 % aufwies (rechtes Bild: normiert).

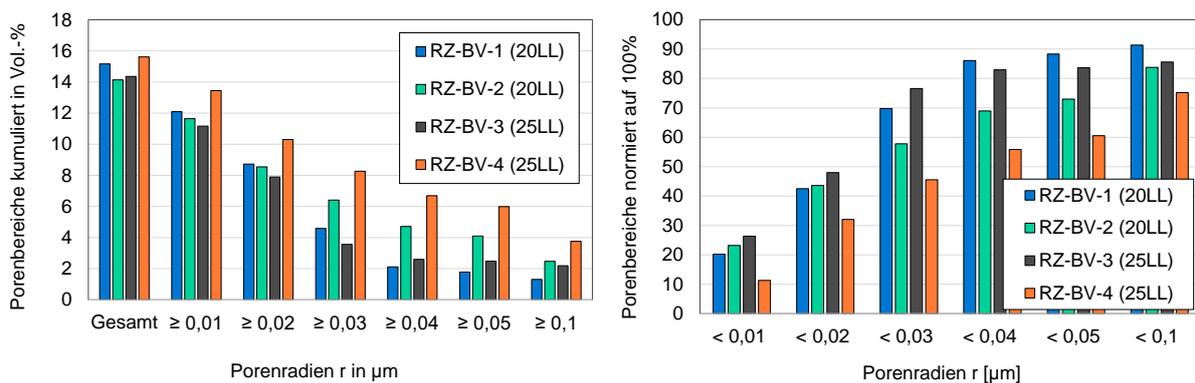


Bild 72 links: Auswertung der Porengrößenverteilungen der Normmörtel im Prüfalfer von 28d (kumulierte PGV), Vergleich der kumulierten Porenanteile und der Gesamtporosität, rechts: Auswertung der auf 100 % normierten Porengrößenverteilungen der Normmörtel im Prüfalfer von 28d, Vergleich der normierten Porenanteile, Gegenüberstellung der CEM II/B-M (Q-LL)-Mörtel mit einem RC-Anteil von 10 M.-% Ziegelschleifstaub (< 125 μm) im R-Zement, vgl. **Tabelle 23**

11.1.2 Zusammensetzung der Zemente aus gemeinsamer Mahlung der Ausgangsstoffe (BV2)

Die labortechnische Herstellung der R-Zemente mit einem RC-Anteil von 30 M.-% und die Untersuchungen entsprechender Normmörtel bildeten die Grundlage zur Vorbereitung der großtechnischen Betriebsversuche (kritischer Meilenstein). Die Bestandteile der Laborzemente wurden durchgehend getrennt aufbereitet (gemahlen/gesiebt) und anschließend gemischt.

Da in den Projektgesprächen der Verbundpartner vorrangig der Einfluss des RC-Materials (Zib: Ziegelbruch, Mab: ziegelhaltiger Mauerwerksbruch) auf die Zementeigenschaften thematisiert wurde (die Klinkerkomponente blieb mit 70 M.-% CEM I 52,5 R konstant), sollte im ersten Schritt eine annähernde RC-Stoffstromzusammensetzung festgelegt werden.

Aus betriebstechnischen und logistischen Gründen wurde für die im Projekt (kritischer Meilenstein) geplante großtechnische Herstellung eines ziegelhaltigen R-Zements die gemeinsame Mahlung auf einer kontinuierlich arbeitenden Umlaufmahanlage mit Kugelmühle und Sieber in Erwägung gezogen (SP). Auch der in diesem Betriebsversuch herzustellende R-Zement sollte einen RC-Anteil von etwa 30 M.-% (S+K) aufweisen. Da in der gemeinsamen Mahlung die Granulometrie der Zementbestandteile nicht getrennt einstellbar ist und zudem keine praktischen Erfahrungen für einen derartigen Mahlversuch vorlagen, wurden in die Auswahl der Zementzusammensetzung unterschiedliche verfahrenstechnische, logistische sowie stoffliche Kriterien einbezogen:

Was bedeutet „30 M.-% RC-Anteil im Frischgut“, wenn eine kontinuierliche, gemeinsame Mahlung auf einer Umlaufmahanlage mit Kugelmühle und Sieber durchzuführen ist?

- Das RC-Material (S+K) muss für die großtechnische Versuchsanwendung in ausreichender Menge (ca. 100 t) sowie in entsprechender Körnung (z. B. für Dosierung), Homogenität (z. B. für stationäre Betriebsbedingungen) und Qualität (z. B. zum Erreichen puzzolanischer Zementeigenschaften) verfügbar sein,
- das RC-Material ist aufgrund seines Ziegelanteils deutlich leichter mahlbar als Klinker, je mehr weichgebrannter Ziegel im RC-Material, umso leichter mahlbar,
- das RC-Material erreicht (im Vergleich zu Klinker) bei geringerem Energieaufwand bzw. innerhalb kürzerer Mahldauer/Verweilzeit höhere Feinheiten als Klinker,
- das RC-Material liegt bei gemeinsamer Mahlung mit Klinker überwiegend in deutlich feineren Fraktionen des Mahlgutes vor, im Kreislauf reichert es sich zunächst im Sichterfeingut an, im Sichterroggut ab,
- der RC-Anteil von 30 M.-% im Mahlgut kann aufgrund des Ziegelanteils zu einer deutlichen Erhöhung der Zementfeinheit und des Wasseranspruchs beitragen.

Mit Blick auf die Reaktivität bzw. die Hydratationswärme bedeutet das:

- der Ziegelanteil und die Ziegelart im RC-Material (Zib, Mab) hatten in den Vorversuchen in Kombination mit 70 M.-% CEM I 52,5 R keinen signifikanten Einfluss auf die Mörtelfestigkeiten (Normmörtel),
- je reaktiver das RC-Material, desto höher der Wasseranspruch nach Punkte,
- je feiner das RC-Material, desto höher der Wasseranspruch nach Punkte,
- ein reaktives RC-Material hoher Feinheit kann sich aufgrund der Erhöhung des Wasseranspruchs ungünstig auf die Konsistenz bzw. auf die Verarbeitbarkeit der Frischmörtel/-betone sowie auf das Ergebnis der Ausbreitversuche auswirken (d. h. ein höherer Verbrauch an Zusatzmittel wird notwendig),
- für eine bessere Verarbeitbarkeit bedeutet das: kein reines Ziegelmaterial (keine Monocharge) erforderlich.

Anmerkung zum kritischen Meilenstein: Beim Vergleich der Laborversuche (getrennte Mahlung und Kombination mit 70 M.-% CEM I 52,5 R) mit den geplanten Betriebsversuchen (gemeinsame Mahlung) ist zu beachten, dass die innere Korngrößenverteilung (KGV) des Klinkers im gemeinsam gemahlten R-Zement nicht identisch mit der KGV des CEM I 52,5 R ist. Die Betriebsbedingungen während der gemeinsamen Mahlung eines ziegelhaltigen R-Zements nehmen auf das Verhalten der Massenströme im Mahlkreislauf, auf die granulometrischen Eigenschaften der Massenströme und auf die Leistungsfähigkeit des Klinkers sehr deutlichen Einfluss (vgl. [19]). Die unbekannte innere KGV des Klinkers stellt ein hohes Restrisiko dar. Ein bei gemeinsamer Mahlung hergestellter R-Zement kann ggf. in seiner Leistungsfähigkeit eingeschränkt sein, sofern der Klinker nicht hinreichend mechanisch aktiviert würde.

In den Vorversuchen (Kombination mit CEM I 52,5 R) wurden unter Verwendung von ziegelhaltigem Mauerwerksbruch mit einer Reaktivität/Hydratationswärme im Bereich zwischen 50 J/g und 80 J/g Normfestigkeiten von bis zu 56 MPa ermittelt. Der Wasseranspruch der R-Zemente mit Mauerwerksbruch lag bei maximal 41 Vol.-% nach Punkte (was einem Wasseranspruch von ca. 30-32 M.-% für Normsteife entspricht). Damit lag der Wasseranspruch einiger „Mab-Zemente“ zum Teil deutlich unterhalb des Wasseranspruchs ziegelreicher „Zib-Zemente“. In der Gesamtporosität wurden bei vergleichbarer 28d-Druckfestigkeit Werte zwischen 12 Vol.-% und 13 Vol.-% ermittelt. Die dauerhaftigkeitsrelevanten Gelporen < 0,01 µm haben somit Anteile zwischen 20-30 % erreicht und können damit zur Erfüllung zulassungsrelevanter Bewertungskriterien beitragen.

Aufgrund der am RC-Material, am R-Zement und am Normmörtel ermittelten Ergebnisse sowie einiger Ergebnisse aus Vorversuchen im Würfelfrostverfahren (vgl. Abschnitt 16.4) wurde für den RC-Stoffstrom aus den Recyclingwerken eine ziegelhaltige Zusammensetzung aus Mauerwerksbruch, jedoch keine ziegelreiche Zusammensetzung (keine Monochargen analog zum Projektbeginn) empfohlen. Mit einer Hydratationswärme zwischen 50 J/g und 100 J/g im RC-Material sollte der Wasseranspruch entsprechender R-Zemente im Bereich gut verarbeitbarer Normmörtel liegen.

Eine weitere Erhöhung der Reaktivität > 100 J/g oder der Feinheit (> 6000 cm²/g) hätte ggf. eine höhere Festigkeit, aber auch ungünstige Verarbeitungseigenschaften zur Folge. Dies wäre der Fall, wenn ziegelreiches RC-Material das ziegelhaltige RC-Material ersetzen würde.

Eine Verringerung der Reaktivität < 50 J/g oder Feinheit (< 4000 cm²/g) hätte ggf. den Wasseranspruch verringert und die Verarbeitbarkeit der Frischmörtel verbessert. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass die Gelporenanteile < 0,01 µm abnehmen können, während die Gesamtporosität zunehmen kann, sobald ein ziegelreiches RC-Material durch ein ziegelarmes RC-Material (Regelbetrieb) ersetzt würde.

Zur Vorbereitung der Betriebsversuche sollte nunmehr in den Recyclingwerken ein Stoffstrom (S+K) erzeugt werden, der zu etwa 50 % aus Ziegelbruch und Mauerwerksbruch (Vergleich Monocharge S+K) sowie zu etwa 50 % aus Abbruchschutt/Bauschutt (Vergleich Regelbetrieb S+K) besteht, um nach Zusammenführen der beiden Materialqualitäten eine Reaktivität im mittleren Bereich (Zielwert Hydratationswärme zwischen 50 J/g und 100 J/g) anzustreben. Insgesamt sollte sich im RC-Stoffstrom ein Ziegelgehalt zwischen ca. 40 % und 60 % einstellen lassen, vgl. **Tabelle 24**.

Tabelle 24 Ziegelgehalte in RC-Materialien aus den Recyclingwerken

ziegelarmes RC-Material (sog. Regelbetrieb)	ziegelhaltiges RC-Material (für Betriebsversuche R-ZiEMENT)	ziegelreiches RC-Material (sog. Monocharge)
Reaktivität/Hydratationswärme < 50 J/g	Reaktivität/Hydratationswärme Zielwert: ca. 50 J/g bis 100 J/g	Reaktivität/Hydratationswärme > 100 J/g
geschätzter Ziegelanteil ca. 5 % bis 30 %	geschätzter Ziegelanteil ca. 40 % bis 60 %	geschätzter Ziegelanteil ca. 70 % bis 95 %

Anmerkung: In diesem Verfahrensabschnitt ist zu berücksichtigen, dass ziegelreiche RC-Materialien i. d. R. eine kleinere Dichte als RC-Materialien ohne Ziegel aufweisen und damit bei gleicher Trockenmasse ein größeres Stoffraumvolumen einnehmen können.

11.2 Festlegung der Verfahrenstechnik zur Herstellung der Werkzemente (SP)

Die Projektpartner haben sich auf zwei Technologien sowie auf zwei Zementzusammensetzungen geeinigt, um großtechnische Betriebsversuche (kritischer Meilenstein) im Zementwerk zu planen und durchzuführen.

- **Erster Betriebsversuch: BV 1 an einem Mehrkammermischsilo (MKMS)**
getrennte Aufbereitung der Ausgangsstoffe und anschließendes Mischen zur Herstellung eines ziegel- und kalksteinhaltigen R-Zements CEM II/B-M (Q-LL) mit einem Klinkerfaktor von ca. 70 % sowie mit ca. 10 M.-% Ziegelschleifstaub aus den Ziegelwerken (LB),
- Ziegelanteil im Schleifstaub: ca. 100 %
- **Zweiter Betriebsversuch: BV 2 an einer Umlaufmahlanlage mit Kugelmühle und Sichter**
gemeinsame Mahlung der Ausgangsstoffe zur Herstellung eines ziegelhaltigen R-Zements „CEM II/B-X“ mit einem Klinkerfaktor von ca. 70 % sowie mit ca. 30 M.-% ziegelhaltigem Recyclingsand (RC-Brechsand/ RC-Feinstoff 0/4) aus den Recyclingwerken (S+K),
- Ziegelanteil im RC-Material: ca. 40-60 %

11.3 Planung und Vorbereitung in den Ziegelwerken (LB) für BV1

11.3.1 Probenahme und Versand von Schleifstaub

Im Rahmen des Arbeitspakets AP 12.1 wurden größere Stoffmengen von Ziegelmehl aus dem Schleifprozess der Planziegel im Werk Schönwind bereitgestellt.



Bild 73

Probenversand des Ziegelschleifstaubs (SL)

11.3.2 Schleifstaubsiebung und Versand von klassiertem Schleifstaub

Etwa 500 kg Ziegelschleifstaub (LB) wurden im Aufbereitungstechnikum des VDZ halbtechnisch, das heißt mittels direkt erregter Vibrations-Siebmaschine klassiert. Der Schleifstaub wurde bei einer Maschenweite von 125 µm abgesiebt. In Vorversuchen an Schleifstäuben zeigte sich, dass feiner abgesiebte Schleifstäube zu einer höheren Festigkeit sowie zu einem dichteren Porengefüge im Normmörtel beitragen können als gröber abgesiebte Schleifstäube (z. B. > 250 µm) oder ungesiebte/ungemahlene Schleifstäube.



Bild 74

Schleifstaubsiebung im Aufbereitungstechnikum des VDZ: halbtechnische Klassierung mittels Vibrations-Siebmaschine

Anmerkung: Eine zusätzliche Verbesserung der Mörtel­eigenschaften wurde bei selektiver Mahlung der Schleifstäube (Mahlung der Abplatzer bzw. des Siebrückstandes) festgestellt. Dieses Verfahren hätte jedoch im großtechnischen Betriebsversuch einen erheblich größeren Massenstrom an Schleifstaub erforderlich gemacht. Außerdem hätten auf Seiten der Zementverfahrenstechnik zusätzliche apparative Vorkehrungen mit hohem technischem und wirtschaftlichem Aufwand getroffen werden müssen.

Im halbtechnischen Siebversuch ergaben sich etwa 315 kg Siebdurchgang (Feingut < 125 µm) sowie etwa 188 kg Siebrückstand (Grobgut > 125 µm, zzgl. 3 kg gröbere Abplatzer). Der Großteil des Feingutes wurde zur Vorbereitung des BV 1 nach Erwitte zu Spanner geliefert.

11.4 Planung und Vorbereitung in den Recyclingwerken (S+K) für BV2

11.4.1 Mauerwerksbruch: Monochargen vs. Regelbetrieb

Anhand der Ergebnisse der Farbmessungen (IZF) an ziegelhaltigem Mauerwerksbruch bzw. Recyclingbrechsanden (RC-Feinstoffen), die sowohl aus sog. Monochargen als auch in der Regelproduktion (S+K) hergestellt wurden, ergaben sich Empfehlungen für die Zusammensetzung des im BV 2 einzusetzenden RC-Stoffstromes. Auch aus den in Vorversuchen (VDZ) ermittelten Reaktivitäten der RC-Materialien (Hydratationswärme nach ASTM) sowie Druckfestigkeiten der entsprechenden R-Zemente (mit jeweils konstantem Klinkerfaktor) wurden Empfehlungen abgeleitet:

- a) wie der RC-Stoffstrom für den BV 2 zusammengesetzt werden könnte (z. B. Ziegelanteil), wenn Aspekte der Zementverfahrenstechnik sowie Aspekte der Zementeigenschaften zu berücksichtigen sind,
- b) wie der RC-Stoffstrom vorsortiert und auf der Schotteranlage aufbereitet werden könnte (z. B. Fraktion), wenn Aspekte der RC-Aufbereitungstechnik sowie Aspekte der RC-Produkteigenschaften zu berücksichtigen sind,
- c) wie beide Empfehlungen im RC-Werk (S+K) praktisch (z. B. logistisch) und wirtschaftlich umgesetzt werden könnten und zugleich den technischen sowie umweltrelevanten Anforderungen gerecht würden.

Anmerkung: Auf der einen Seite stellt die Herstellung von ziegelangereicherten Monochargen (Abbruchschutt/Bauschutt mit überdurchschnittlichem Ziegelanteil) einen hohen wirtschaftlichen Aufwand dar. Auf der anderen Seite geht aus der wirtschaftlichen Regelproduktion zwar ein ziegelhaltiges RC-Produkt, jedoch kein ziegelangereichertes RC-Produkt hervor.

11.4.2 Herstellung und Versand einer Monocharge mit gezielt eingestelltem Ziegelgehalt

Auf der Grundlage der in den Probenahmekampagnen gewonnenen Ergebnisse wurde der Großversuch geplant. Die Hauptplanung fand während des Verbundtreffens im September 2023 im Recyclingwerk Scherer & Kohl (Ludwigshafen) statt. Im Zuge der Klärung, wie viel Zement in welcher Zusammensetzung bei dem technischen Großversuch hergestellt werden sollte, wurde die benötigte Menge an ziegelhaltigem Recyclingbrechsand (RC-Feinstoff 0/4) auf ca. 100 t geschätzt. Auf den labortechnischen und praktischen Erfahrungen basierend wurde festgelegt, dass in den Brechsanden (die im zementtechnischen Großversuch eingesetzt werden sollten) ein Ziegelgehalt von ca. 40–60 % eingestellt werden sollte (vgl. Abschnitt 11.1).

Die Sortierung des Ausgangsmaterials wurde – analog der Monochargen der ersten Probenahmekampagne – durch das Fachpersonal in den Recyclingwerken (S+K) durchgeführt. Dabei wurde der festgelegte Zielbereich (40-60 % Ziegelgehalt im Brechsand) bereits im Ausgangsmaterial angesteuert. Für die Herstellung von ca. 100 t ziegelhaltigem Brechsand wurden von Dezember 2023 bis Januar 2024 ca. 500 t Ausgangsmaterial als ziegelhaltige Monocharge gezielt zusammengestellt und

anschließend im Werk Ludwigshafen als Monocharge aufbereitet. Dieses Material wurde unter optimalen Bedingungen gelagert, um die Feuchtigkeit auf unter 10 % zu begrenzen.

Nach Aufbereitung dieses ziegelhaltigen RC-Materials (sortierte Monocharge) bzw. nach Herstellung des ziegelhaltigen Brechsandes für den großtechnischen Betriebsversuch wurden umgehend Proben entnommen und umweltanalytisch untersucht (UVU). Die Ergebnisse der UVU gehen aus den Übersichten in **Tabelle 25** hervor. Ausführliche Analysenberichte sind im Anhang aufgelistet (**Tabellen A-4**). Der ziegelhaltige Brechsand Mab 24 hat alle Grenzwerte nach DAfStb-Richtlinie sowie nach DIN 4226-101 eingehalten. In Abstimmung mit dem Verbundpartner Spenner sollte das Material ca. eine Woche vor dem geplanten Großversuch angeliefert werden. Bis zur Auslieferung war das Material überdacht zu lagern, sodass es vor Witterung geschützt war und eine Feuchte von 10 % nicht überschritten wurde.

Tabelle 25 Übersicht umweltrelevanter Höchstwerte und Analysenergebnisse aus den UVU am ziegelhaltigen Brechsand Mab 24 (S+K)

Grenzwerte Tabelle 1 gemäß DAfStb-Richtlinie Betonbauteile in Kontakt mit Boden, Grundwasser			Grenzwerte gemäß DIN 4226-101		
Feststoff	Höchstwerte	Mab 24	Feststoff	Höchstwerte	Mab 24
PAK	30 mg/kg	4,21	MKW	1000 mg/kg	u.d.B.
PCB	0,5 mg/kg	u.d.B.	PAK	25 mg/kg	4,21
PCDD/PCDF	100 ng TEQ/kg	-	EOX	10 mg/kg	u.d.B.
			PCB	1 mg/kg	u.d.B.
Arsen	150 mg/kg	8,4	Eluat		
Blei	700 mg/kg	12			
Cadmium	10 mg/kg	0,17	pH-Wert	12,5	11,5
Chrom gesamt	600 mg/kg	14	elektrische		
Kupfer	400 mg/kg	6,7	Leitfähigkeit	3000 µS/cm	1200
Nickel	500 mg/kg	8,9	Chlorid	150 mg/l	33
Quecksilber	5 mg/kg	u.d.B.	Sulfat	600 mg/l	240
Thallium	7 mg/kg	u.d.B.	Arsen	50 µg/l	u.d.B.
Vanadium	1500 mg/kg	16	Blei	100 µg/l	u.d.B.
Zink	1500 mg/kg	54	Cadmium	5 µg/l	u.d.B.
			Chrom gesamt	100 µg/l	22
			Kupfer	200 µg/l	u.d.B.
			Nickel	100 µg/l	u.d.B.
			Quecksilber	2 µg/l	u.d.B.
			Zink	400 µg/l	u.d.B.
			Phenolindex	100 µg/l	u.d.B.

TEQ = (Toxizitätsäquivalent)

Anmerkung: Gezielt hergestellte sowie qualitätsüberwachte ziegelhaltige bzw. ziegelreiche RC-Materialien/RC-Brechsande, die gleichfalls als Zementhauptbestandteil einsetzbar wären, könnten eine adäquate Ergänzung zum neuen Zementhauptbestandteil „F“ (recycled concrete fines) in EN 197-6 darstellen. Ziegelhaltige RC-Baustoffe aus den Recyclingwerken weisen – je nach Ziegelanteil – eine zum Teil deutlich höhere puzzolanische Reaktivität (Hydratationswärme nach ASTM) auf als Betonrecyclingmehle (vgl. [15], [5]).

11.5 Planung und Vorbereitung im Zementwerk (SP)

11.5.1 Planung BV1 - Einsatz von Ziegelschleifstaub im Zement (SP, LB)

Für den Einsatz des Ziegelschleifstaubs im Zement stehen bei Spenner grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Zum einen kann der Schleifstaub bei der Mahlung mit der Zementmühle (gemeinsame Vermahlung) dem Klinker und Sulfatträger zugesetzt werden. Zum anderen kann das Material mit anderen Zementen, wie Portlandzement und Kalksteinmehl, mit einer Mischanlage des Mehrkammermischsilos großtechnisch homogenisiert werden. Aus diesem Mischer kann eine Probe entnommen oder direkt in den LKW verladen werden.

Für den Versuch stand eine Menge von ca. 500 kg Schleifstaub aus den Ziegelwerken zur Verfügung. Diese ist zu gering für eine Zudosierung in der Zementmühle. Das Risiko, die Rezepturvorgabe nicht zu treffen, ist sehr hoch. Deswegen wurde entschieden, den Versuch mit der Mischanlage durchzuführen. Zur Sicherheit wurde vereinbart, dass der Schleifstaub im Aufbereitungstechnikum des VDZ abgeseiht und für den Versuch die Fraktion < 125 µm verwendet wird.

Zur Rezepturfindung wurden im Labor (SP) in kleinem Maßstab Zementmischungen erstellt. Diese Labormischungen enthielten als Portlandzementkomponente CEM I 52,5 N (tb) (nachfolgend M2 und M4) bzw. CEM I 52,5 R (nachfolgend M1 und M3) sowie Kalksteinmehl und Ziegelmehl. Ziel war die Herstellung eines Zements mit der Festigkeitsklasse 42,5 N oder R. An den im Labor hergestellten Mischzementen wurden folgende Prüfungen durchgeführt: Wasseranspruch, Blaine, Korngrößenverteilung (Lasergranulometer), Druckfestigkeiten am Normmörtel (2d, 28d) und Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und Röntgenbeugungsanalyse (RBA).

Rezepturen und Ergebnisse sind in **Tabelle 26** aufgeführt. Zum Vergleich wurden auch die reinen Portlandzemente untersucht. Bewertet wurden die Festigkeiten, auch anhand des Vergleichs mit der rechnerischen Verdünnungslinie der jeweiligen Portlandzemente. Die Verdünnungslinie wird aus den Festigkeiten der Portlandzemente multipliziert mit dem jeweiligen Portlandzementanteil der Mischzemente berechnet. Hieraus kann ein Beitrag des Schleifstaubs bzw. des Kalksteinmehls zur Festigkeitsentwicklung abgeleitet werden. Die Labormischungen mit dem CEM I 52,5 N (tb) zeigen 28d-Festigkeitsentwicklung identisch mit der Verdünnung. Die Labormischungen mit CEM I 52,5 R weisen 28d-Festigkeitsentwicklung 3-4 MPa oberhalb der Verdünnung auf. Es ist unklar, ob der Festigkeitsbeitrag auf die Reaktivität des Schleifstaubs oder auf Packungsdichteeffekte bzw. das Saugverhalten zurückzuführen ist.

Tabelle 26 Rezeptur und Messergebnisse der Voruntersuchungen anhand der Labormischungen zum BV1 (SP)

Komponente	Einheit	CEM I 52,5 N (tb)	M2	M4	CEM I 52,5 R	M1	M3
Mischungszusammensetzung							
CEM I 52,5 R	[%]	0	-	-	100	70	70
CEM I 52,5 N (tb)	[%]	100	70	70	0	-	-
Kalksteinmehl	[%]	0	20	15	0	20	15
Schleifstaub LB, VDZ	[%]	0	10	15	0	10	15
Physikalische Analyse							
Wasseranspruch	Mass.-%	27	28	28	33	30	30
E-Beginn	min	140	150	150	135	100	90
E-Ende	min	200	205	215	190	155	130

Komponente	Einheit	CEM I 52,5 N (tb)	M2	M4	CEM I 52,5 R	M1	M3
Steigungsmaß		0,98	0,93	0,91	1,08	0,93	0,97
Lageparameter d'	µm	25,1	26,0	25,5	10,8	14,6	13,6
Druckfestigkeiten (DF)							
DF 2d	MPa	32,0	19,5	19,6	49,1	32,2	34,9
DF 2d Verdünnung 30%	MPa	22,4	22,4	22,4	34,4	34,4	34,4
DF 7d	MPa	-	33,0	33,4	-	46,4	48,3
DF 28d	MPa	62,4	42,4	43,8	73,5	54,6	56,2
DF 28d Verdünnung 30%	MPa	43,7	43,7	43,7	51,5	51,5	51,5
Chemische Analyse							
SO ₃	Mass.-%	3,5	2,5	2,5	3,6	2,5	2,4
Cl ⁻	Mass.-%	0,074	0,052	0,046	0,076	0,046	0,042
Na ₂ O-Äqu.	Mass.-%	0,63	0,72	0,83	0,63	0,72	0,81
Kalksteingehalt	Mass.-%	3,2	22,4	16,1	0,8	20,3	14,8

Auf Grundlage dieser Ergebnisse entschied sich der Verbund für die folgende Rezeptur im Betriebsversuch 1 (BV1) am MKMS:

70 % CEM I 52,5 R (SP), 20 % Kalksteinmehl (SP), 10 % Ziegelschleifstaub (LB).

Es wurde entschieden, die Probe nach dem Mischen direkt aus dem Mischer zu entnehmen. Die Eigenschaften des hergestellten Zements sollten anschließend bei Spenner, Spenner Herkules (Betonversuche) und dem VDZ untersucht werden.

11.5.2 Planung BV2 - Einsatz von RC-Feinstoffen aus Mauerwerksbruch im Zement (SP, S+K)

Nach Abstimmung in der Projektgruppe über die zur Verfügung stehende Menge an aufbereiteten Mauerwerksbrechsanden (RC-Feinstoffe aus ziegelhaltigem Mauerwerksbruch) wurde bei Spenner intern erörtert, auf welcher Zementmühle der Zement mit den geforderten Eigenschaften hergestellt wird. Hierbei standen keine energetischen Aspekte im Vordergrund, sondern die Machbarkeit der gemeinsamen Vermahlung von ziegelhaltigem Mauerwerksbruch, Klinker und Sulfatträger.

Es sollte eine Konzentration von 30 – 35 % Recyclingmaterial eingestellt werden. Aufgrund der Feuchtigkeit und der Feinheit des Mauerwerksbruchs wurde eine Mahlanlage (Zementmühle 3 nachfolgend ZM3) mit vorgeschaltetem Heißgaserzeuger (Trockner) ausgewählt. Bei der ZM3 handelt es sich um eine 2-Kammerkugelmühle. Es wurde ein Zielsilo für den Zement ausgewählt, welches vor dem Versuch vollständig geleert und gesäubert werden muss (spülen). Aufgrund der erwarteten Zementmenge wurde das Zementsilo 1 ausgewählt. Dieses muss vor dem Versuch vollständig geleert und gesäubert werden (spülen).

Da das Zementwerk im „24/7-Betrieb“ arbeitet, stellten die Planung und Vorbereitung des Werksversuchs eine große Herausforderung dar. Um den Werksablauf möglichst wenig zu beeinflussen, war

eine enge Abstimmung mit der Produktion, dem Vertriebsinnendienst und der Spedition erforderlich. Aber auch der Mauerwerksbruch muss punktgenau angeliefert werden, da der Ablagebunker auch für andere Ausgangsstoffe, wie z. B. Hüttensand, Gips und Kalkstein, benötigt wird. Deswegen wurde auch Scherer & Kohl in die Planungen des Werksversuchs von Anfang an mit einbezogen.

Der hergestellte Zement sollte bei Spenner Herkules (Unterauftragnehmer) im Transportbetonwerk Erwitte in der Betonanlage getestet werden. Weiterhin war ein Test in der Betonrohrherstellung im Betonwerk Bieren geplant. Je Werk sollte ein Silofahrzeug geliefert werden.

Die Mahlanlage benötigt i.d.R. einige Stunden Einstellzeit, bis die vorgegebene Zusammensetzung und die Mahlfeinheit erreicht sind. Daher musste vor der Verladung für Herkules und Betonwerk Bieren eingeplant werden, dass 1-2 LKW vorab aus dem Silo verladen und zur Entsorgung umgefahren werden.

12 Durchführung großtechnischer Betriebsversuche zur Herstellung ziegelhaltiger R-Zemente im Zementwerk (SP) (Meilenstein)

12.1 Erster Betriebsversuch zur getrennten Aufbereitung der Ausgangsstoffe mit anschließendem Mischen (BV1)

12.1.1 Großtechnischer Mischversuch im Zementwerk Erwitte

Der großtechnische Mischversuch wurde am 24.01.2024 im Zementwerk Erwitte durchgeführt.

Der ziegelhaltige R-Zement wurde unter Verwendung eines Chargenmischers des Typs IB-M 6000 der Fa. IBAU hergestellt. Die Größe der hergestellten Mischzementcharge lag bei 2.600 kg. Es wurden 1.890 kg CEM I 52,5 R, 540 kg Kalksteinmehl und 270 kg Schleifstaub (Siebdurchgang) eingewogen und 45 s gemischt. Nach dem Mischvorgang erfolgte die Probenahme an unterschiedlichen Stellen des Mixers. Insgesamt wurden 300 kg Proben genommen. Davon wurden 100 kg dem VDZ zur Verfügung gestellt. 150 kg wurden an Spenner Herkules für Betonversuche zur Verfügung gestellt. Vor Versand erfolgte für beide Teilproben eine Probenteilung.



Bild 75 Ausgangsstoffe für ziegelhaltige R-Zemente, Symbolbilder aus dem R-ZIEMENT-Forschungsflyer (siehe www.vdz-online.de), links: Ziegelbruch, Portlandzementklinker, Kalkstein; rechts: Ziegelschleifstaub

Die Symbolbilder aus dem R-ZIEMENT-Forschungsflyer (**Bild 75**) stellen typische Ausgangsstoffe bzw. Hauptbestandteile für die Herstellung eines ziegel- und kalksteinhaltigen R-Zements dar. Vor Beginn eines Mischversuches sind alle Zementbestandteile (inkl. Sulfatträger) mittels mechanischer Aufbereitungsverfahren auf zementähnliche Feinheiten einzustellen und erst anschließend im entsprechenden Verhältnis zu mischen.

12.1.2 Untersuchungen des ziegelhaltigen Mischzements im Werkslabor

Der Prüfungsumfang des beim Betriebsversuch (BV1) hergestellten Mischzements war identisch mit den Labormischungen der Voruntersuchungen (vgl. Abschnitt 11.5.1). Die Ergebnisse sind in **Tabelle 27** zusammengefasst. Die Messergebnisse des im Betriebsversuch hergestellten Mischzements entsprechen den Ergebnissen der Labormischung M1 aus den Vorversuchen. Die 28d-Druckfestigkeit lag wie in den Labormischungen oberhalb der erwarteten Verdünnungslinie. Die Druckfestigkeiten im Prüfalter von zwei und 28 Tagen entsprechen den bei Spenner definierten Zielen (Druckfestigkeitsklasse 42,5 R). Damit wurde die Anforderung an den Mischzement erfüllt.

Tabelle 27 Rezeptur, Mess- und Prüfergebnisse des im Betriebsversuch 1 hergestellten Mischzements

Komponente	Einheit	Ziegelhaltiger Mischzement BV1
Mischungszusammensetzung		
CEM I 52,5 R	%	70
CEM I 52,5 N (tb)	%	-
Kalksteinmehl	%	20
Schleifstaub / LB / VDZ	%	10
Physikalische Analyse		
Wasseranspruch	Mass.-%	30
Erstarren Beginn	min	125
Erstarren Ende	min	185
RRSB Steigungsmaß n	-	0,93
RRSB Lageparameter d'	µm	15,2
Druckfestigkeit 2d (Verdünnung)	MPa	32,7 34,4 (- 5 %)
Druckfestigkeit 7d	MPa	45,9
Druckfestigkeit 28d (Verdünnung)	MPa	54,2 51,5 (+ 5 %)
Chemische Analyse		
SO ₃	Mass.-%	2,9
Cl ⁻	Mass.-%	0,045
Kalksteingehalt	Mass.-%	19,2

12.2 Zweiter Betriebsversuch zur gemeinsamen Mahlung der Ausgangsstoffe (BV2)

Der großtechnische Mahlversuch wurde am 06.02.2024 im Zementwerk Erwitte durchgeführt.

Fünf Tage vor Beginn des Mahlversuches erfolgte die Anlieferung von 150 t ziegelhaltigem Recyclingbrechsand aus den Recyclingwerken von Scherer + Kohl. In **Bild 76** ist die Körnung des frisch angelieferten RC-Materials erkennbar. Es wurde im Aufgabebunker der Zementmühle zwischengelagert und während des Betriebsversuches über die Bandwaage (**Bild 77**) dosiert.

Eine repräsentative Probe des ziegelhaltigen Recyclingmaterials wurde umfassend analysiert. Zur späteren Bestimmung der Zementzusammensetzung (nach gemeinsamer Mahlung) erfolgten Herstellung und Analyse von Labormischungen mit unterschiedlichem RC-Anteil im Zement. An diesen Mischungen wurden die chemische Zusammensetzung mittels RFA und die mineralogische Zusammen-

setzung per RBA bestimmt und ausgewertet, welcher Parameter am besten mit dem RC-Anteil korreliert. Hierbei hat sich der SiO_2 -Anteil als vielversprechend erwiesen (**Bild 78**).



Bild 76

Ziegelhaltiger Recyclingbrechsand (RC-Finestoff), Fraktion nach mechanischer Aufbereitung in verschiedenen Brecheranlagen des Recyclingwerks: 0/4 mm (zufällige Probe nach Anlieferung)



Bild 77

Dosierung des ziegelhaltigen Recyclingbrechsandes/ RC-Finestoffes (0/4) über die Bandwaage (Frischgutmassenstrom vor gemeinsamer Mahlung)

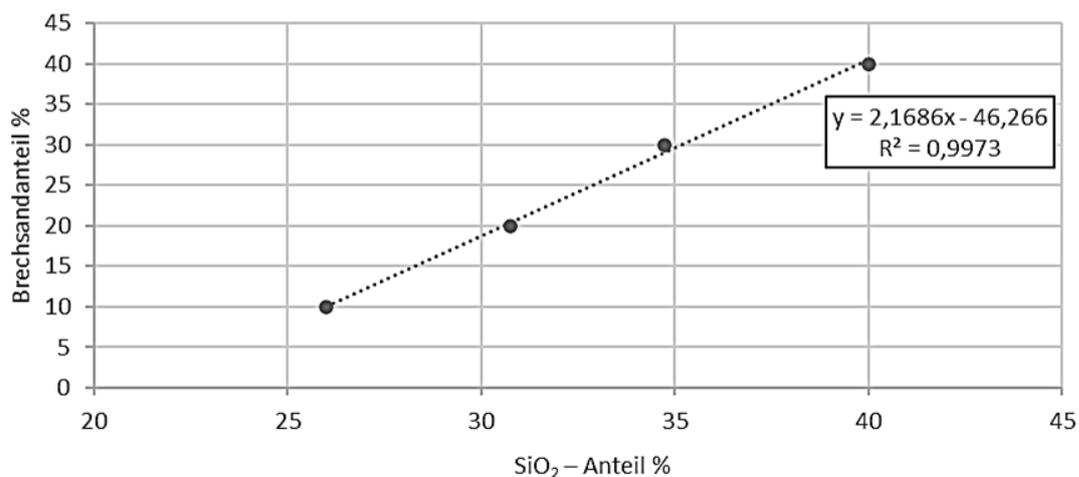


Bild 78

Anteil des ziegelhaltigen Recyclingmaterials (Brechsandanteil) in labortechnisch hergestellten Mischzementen (R-Zemente mit unterschiedlichem Recyclingfaktor) in Abhängigkeit des im Recyclingmaterial ermittelten SiO_2 -Gehaltes; Korrelation von RC-Anteil und SiO_2 -Gehalt

Beim Mahlversuch wurde der RC-Anteil (Brechsandanteil) des gemeinsam gemahlten R-Zements anhand seines SiO₂-Gehaltes mit folgender Formel berechnet:

$$\text{Brechsandanteil} = 2,1686 \cdot \text{SiO}_2 - 46,266 \quad (\text{Formel 4})$$

Trotz der guten Korrelation war die Bestimmung des RC-Anteils im R-Zement eine große Herausforderung, da die genaue chemische Zusammensetzung von RC-Materialien schwanken kann. Somit war eine Rückrechnung auf Basis der Zusammensetzung der Ausgangsstoffe etwas ungenauer (im Vergleich zur Rückrechnung bzw. zur Bestimmung eines Kalkstein- bzw. Hüttensandanteils).

Der Mahlversuch wurde mit warmer Mühle durchgeführt. Das bedeutet, aus der Produktion eines Portlandzements wurde auf das Zielsilo umgestellt, und die Brechsandzugabe wurde gestartet. Hierdurch war gewährleistet, dass die Mühlentemperatur während der Zementproduktion ausreichend hoch ist, um die Restfeuchtigkeit auszutreiben und den Gipsanteil im Sulfatträger zu entwässern. Bei dem Betriebsversuch handelt es sich um eine gemeinsame Vermahlung von Klinker, Brechsand und Sulfatträger unter der Zugabe einer aminbasierten Mahlhilfe. Während der Produktion wurde kontinuierlich von dem Zielsilo in LKWs entladen und so lange zur internen Verwertung gefahren, bis die Zielzusammensetzung erreicht war. Alle 30 Minuten wurde eine Probe aus dem Fertiggut entnommen. An jeder Probe wurden die Kornverteilung sowie die Zusammensetzung bestimmt. Die Mühle zeigte nach Start der Brechsandzugabe einen ruhigen Lauf. Nach drei Stunden war der Zielbereich von 30- 35 % Brechsandanteil (Recyclingfaktor im R-Zement) erreicht. Es wurden 100 kg Probenmaterial aus dem Fertiggutstrom entnommen. Hiervon wurde je eine Teilprobe dem VDZ und Spenner Herkules für Laborversuche zur Verfügung gestellt.

Von dem ab dem Zeitpunkt der Probenahme im Silo gesammelten R-Zement wurde ein Silo-LKW an Spenner Herkules für einen Werksversuch in der Transportbetonanlage geliefert. Weiterhin wurde ein Silo-LKW an das Betonwerk Bieren geliefert, um den Zement in der Betonrohrherstellung zu testen.

Eine Teilprobe des Versuchszements wurde im Labor bei Spenner analysiert. Die Messergebnisse sind in **Tabelle 28** dargestellt. Der im BV2 hergestellte R-Zement wies einen berechneten Brechsandanteil von 34 % (sulfatträgerhaltig) und eine spezifische Oberfläche von 5850 cm²/g (nach Blaine) auf. Die spezifische Oberfläche des R-Zements war höher als bei einem Portlandzement CEM I 52,5 R aus der Spenner-Produktion, gleichzeitig war der RRSB-Feinheitsparameter (Lageparameter d') aus der Korngrößenverteilung mit 18,3 µm größer. Das RRSB-Steigungsmaß des R-Zements war mit n = 0,87 relativ niedrig und deutet auf eine vergleichsweise breite Kornverteilung hin. Gewöhnlich weisen im Werk produzierte Zemente ein Steigungsmaß von 1,05 ± 0,10 auf. Dies ist mit der im Vergleich zum Klinker leichteren Mahlbarkeit des Brechsands zu erklären. In der gemeinsamen Mahlung wurde der Brechsandanteil vermutlich sehr fein aufgemahlen, während der Klinkeranteil einen deutlich größeren Korndurchmesser aufweisen kann. Der Wasseranspruch lag mit 32,9 M.-% in Bezug zur hohen spezifischen Oberfläche auf vergleichsweise niedrigem Niveau. Der R-Zement wies eine Druckfestigkeit nach 2 Tagen von 28,5 MPa auf. Die Druckfestigkeit nach 28 Tagen betrug 53,7 MPa. Damit entspricht der Zement der Festigkeitsklasse 42,5 N oder R. Auffällig ist der geringe Druckfestigkeitszuwachs zwischen 7 und 28 Tagen. Der Unterschied zwischen Beginn und Ende der Erstarrung war mit 30 Minuten gering.

Tabelle 28 Mess- und Prüfergebnisse des im Betriebsversuch 2 hergestellten R-Zements aus gemeinsamer Mahlung (Recyclingfaktor im Zement: 34,4 %)

Komponente	Einheit	Ziegelhaltiger R-Zement BV2
Physikalische Analyse		
Wasseranspruch	Mass.-%	32,9
Erstarren Beginn	min	205
Erstarren Ende	min	235
RRSB Steigungsmaß n	-	0,87
RRSB Lageparameter d'	µm	18,3

Komponente	Einheit	Ziegelhaltiger R-Zement BV2
Spezifische Oberfläche Blaine	cm ² /g	5830
Druckfestigkeit 2d	MPa	28,5
Druckfestigkeit 7d	MPa	45,7
Druckfestigkeit 28d	MPa	53,7
Chemische Analyse		
SO ₃	Mass.-%	2,94
Cl ⁻	Mass.-%	0,043
SiO ₂	Mass.-%	37,1
Brechsandanteil (sulfathaltig)*	Mass.-%	34,4

*) Der sog. Recyclingfaktor eines Zements (RC-Anteil/ Brechsandanteil im R-Zement) bezieht sich grundsätzlich auf die sulfathaltige Zementzusammensetzung.

13 Nachbereitung der Betriebsversuche und Probenmanagement (SP)

13.1 Werkzemente zur Betonherstellung im Labor Herkules – Vergleich zum CEM III/A-Standardbeton (Unterauftrag SP)

Der im ersten Betriebsversuch durch Mischen mit Ziegelschleifstaub und Kalksteinmehl hergestellte R-Zement (BV1, Werk Erwitte) wurde im Zentrallabor Essen der Spenner Herkules GmbH & Co. KG in einer Standardbetonrezeptur eingesetzt. Hierbei wurde der Versuchszement BV1 mit einem CEM III/A 42,5 N (na) von Spenner (Werk Duisburg) verglichen.

Anmerkung: Da der Ziegelschleifstaub aufgrund seines Anteils an reaktionsfähiger Kieselsäure entsprechende Eigenschaften natürlicher getemperter Puzzolane gemäß EN 197-1 aufwies, wurde der R-Zement aus dem ersten Betriebsversuch (BV1) in Anlehnung an EN 197-1 sowie entsprechend seiner Mischungszusammensetzung innerhalb des Projektverbundes als „Portlandkompositzement CEM II/B-M (Q-LL)“ bezeichnet.

Die Versuche wurden unter kontrollierten Laborbedingungen durchgeführt. Die Mischungen wurden im Eimermischer hergestellt, wobei als Zuschläge Rhein-Kies und Sand verwendet wurden. Die Rezeptur ist in **Tabelle 29** aufgeführt. Bei dem Standardbeton handelte es sich um einen C25/30 sowie der Korngröße 0/32 mit der Eignung für die Expositionsklassen XC4, XF1 und XA1. Zur Einstellung der Konsistenzklasse wurde der Betonverflüssigeranteil (BV) von 1,740 kg/m³ auf 1,305 kg/m³ reduziert. Dieser positive Effekt ist möglicherweise auf die vergleichsweise breite Kornverteilung des Zements BV1 sowie das gute Sorptionsverhalten des Verflüssigers auf den Ziegelpartikeln zurückzuführen.

Tabelle 29 Betonrezepturen C25/30

Komponente	Referenz CEM III/A 42,5 N (na)	R-Zement BV1 CEM II/B-M (Q-LL)
	[kg/m ³]	[kg/m ³]
Zement	290	290
Zusatzstoff	-	-
Zusatzmittel	1,740	1,305
Wasser	168	168
w/z bzw. w/z eq	0,58	0,58
Sand 0/ 2	676	676
Rheinkies 2/ 8	263	263
Rheinkies 2/16	488	488
Rheinkies 16/32	451	451

Das Ausbreitmaß des Standardbetons mit dem Versuchszement im Vergleich zum CEM III/A 42,5 N (na) ist in **Tabelle 30** aufgeführt. Das Ausbreitmaß wurde nach 10 min und 45 min bestimmt. Beide

Betone zeigten ein vergleichbares Rücksteifverhalten, der A45-Wert entspricht der Konsistenzklasse F4.

Tabelle 30 Vergleich der Ausbreitmaße der Frischbetone

Zeit [min]	Referenz CEM III/A 42,5 N (na)	R-Zement BV1 CEM II/B-M (Q-LL)
	Ausbreitmaß [mm]	
10	580	560
45	500	500

Mit dem Frischbeton wurden Würfel für die Druckfestigkeitsprüfung hergestellt. Die erste Festigkeitsprüfung fand aus betriebstechnischen Gründen nach fünf Tagen statt. Die weiteren Prüfungen erfolgten im Prüfaller von 7 Tagen, 28 Tagen und 56 Tagen. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 31** dargestellt. Die Druckfestigkeit nach fünf bzw. nach sieben Tagen wies bei dem Beton mit dem ziegelhaltigen R-Zement höhere Werte auf als bei der Referenz. Die Messwerte nach 28 Tagen und 56 Tagen sind vergleichbar zum Beton mit CEM II/A 42,5 N (na). **Bild 79** fasst den Vergleich der Betondruckfestigkeiten zusammen.

Tabelle 31 Vergleich der Druckfestigkeiten der Festbetone

Prüfaller [d]	Referenz CEM III/A 42,5 N (na)	R-Zement BV1 CEM II/B-M (Q-LL)
	Druckfestigkeit [MPa]	
5	13,2	22,6
7	19,7	26,7
28	34,8	33,9
56	36,2	35,6

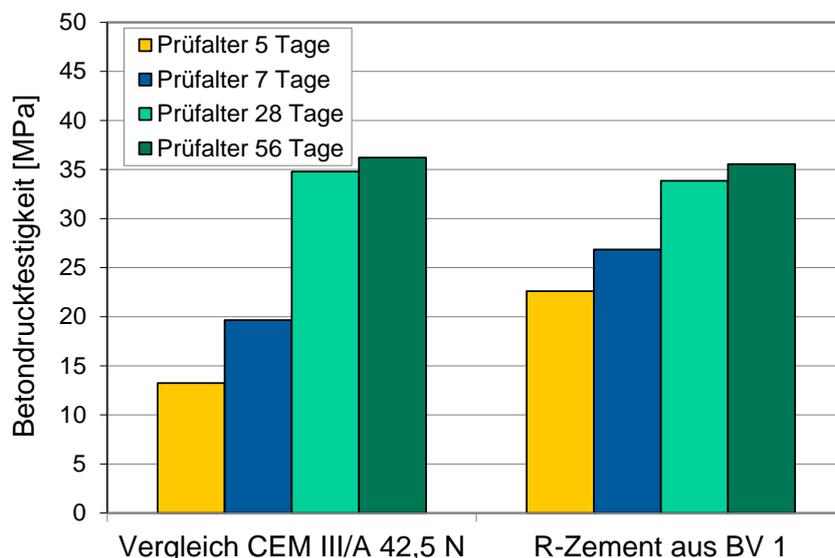


Bild 79 Vergleich der Betondruckfestigkeiten; links: Referenzbeton unter Verwendung von Hochofenzement; rechts: R-Zement-Beton unter Verwendung eines ziegel- und kalksteinhaltigen Zements aus BV 1 (Zusammensetzung in Anlehnung an EN 197-1: CEM II/B-M (Q-LL))

13.2 Werkzeuge zur Herstellung von Herkules Transportbeton im Vergleich zum Referenzbeton mit Portlandkalksteinzement und Flugasche als Zusatzstoff (Unterauftrag SP)

Der im zweiten Betriebsversuch über die gemeinsame Mahlung von ziegelhaltigem Recyclingbrechsand (RC-Feinstoff) und Klinker hergestellte R-Zement (BV2, Werk Erwitte) wurde in einem von

Herkules zur Verfügung gestellten Zementsilo zwischengelagert. Anschließend fand ein Versuch an der Transportbetonanlage statt, welche mit einem Tellermischer ausgerüstet ist. Die maximale Chargengröße betrug 2,5 m³. Der Versuch fand am 26.02.2024 bei trockenem Wetter und 7°C statt. Es wurde eine Standardbetonsorte C25/30 (XC4, XF1, XA1) mit der Konsistenzklasse F3 und der Korngröße 0/22 hergestellt (vgl. **Tabelle 32**).

Zum Vergleich kam zunächst ein CEM II/A-LL 42,5 N (na) zum Einsatz. Anschließend erfolgte die Herstellung des Betons mit dem R-Zement aus BV2. An dem Frischbeton wurde das Ausbreitmaß geprüft. Es wurden Würfel für die Druckfestigkeitsprüfung hergestellt. Mit dem restlichen Teil der Mischung wurde ein Betonblockstein mit 1 m³ Inhalt gegossen. Ziel des Anlagenversuches war der Vergleich der Eigenschaften der Frisch- und Festbetone, die mit CEM II/A-LL 42,5 N (na) sowie mit dem R-Zement hergestellt wurden.

Anmerkung: Beim Wechsel des Zements von CEM II/A-LL auf den R-Zement aus BV2 wurden an der Transportbetonanlage alle weiteren Randbedingungen (z.B. Betonzusammensetzung) konstant gehalten.

Tabelle 32 Betonrezepturen C25/30

Komponente	Referenz CEM II/A-LL 42,5 N (na)	R-Zement BV2
	[kg/m ³]	[kg/m ³]
Zement	285	285
Zusatzstoff Flugasche	50	50
Zusatzmittel	1,850	1,850
Wasser	173	173
w/z bzw. w/z eq	0,57	0,57
Gesteinskörnung: Natursand, Kalksteinsplitt		

Das Ausbreitmaß nach 10 Minuten des Referenzbetons CEM II/A-LL 42,5 N (na) lag bei 540 mm, was der Konsistenzklasse F4 entspricht. Der Beton mit dem Versuchszement aus BV2 erreichte ein geringeres Ausbreitmaß von 430 mm und ist damit in die Konsistenzklasse F3 einzuordnen. Daraus lässt sich ableiten, dass zur Erzielung der gleichen Verarbeitbarkeit mehr Zusatzmittel dosiert werden müsste. Alternativ könnte geprüft werden, ob ein - für den ziegelhaltigen R-Zement aus gemeinsamer Mahlung (hier BV2 mit einem Recyclingfaktor von ca. 34%) - besser geeignetes Zusatzmittel eingesetzt werden kann.

Tabelle 33 Vergleich der Druckfestigkeiten der Festbetone

Prüfalter [d]	Referenz CEM II/A-LL 42,5 N (na)	R-Zement BV2
	Druckfestigkeit [MPa]	
5	8,7	10,6
7	24,2	27,9
56	35,2	40,0

Das Ergebnis der Druckfestigkeitsprüfung ist in **Tabelle 33** dargestellt. Der Beton mit dem R-Zement aus BV2 weist nach 2, 7, 28 und 56 Tagen eine höhere Druckfestigkeit auf. Ursächlich für die höheren Festigkeiten kann eine Reaktivität des ziegelhaltigen Recyclingmaterials, die unterschiedliche Feinheit der Zemente, aber auch die niedrigere Konsistenz sein. Es ist nicht auszuschließen, dass ziegelhaltige Partikel im Zement ein „Saugverhalten im Frischbeton“ aufweisen und damit den effektiven Wasserzementwert senken. **Bild 80** fasst den Vergleich der Betondruckfestigkeiten zusammen.

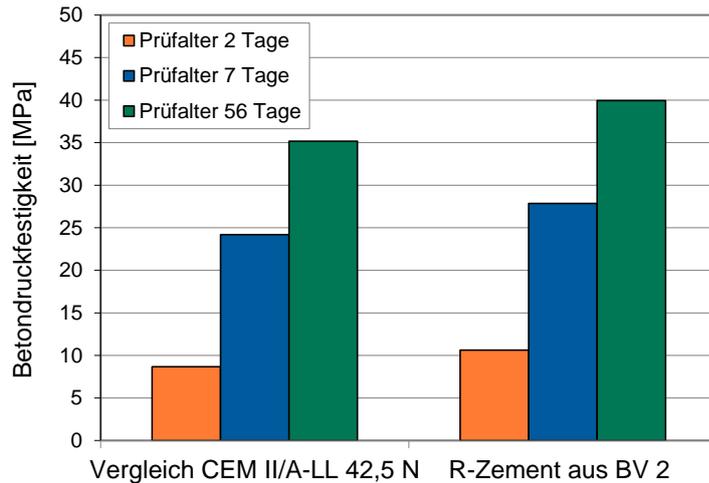


Bild 80 Vergleich der Betondruckfestigkeiten; links: Referenzbeton unter Verwendung von Portlandkalksteinzement; rechts: R-Zement-Beton unter Verwendung eines ziegelhaltigen Zements aus gemeinsamer Mahlung, BV 2 (Zusammensetzung in Anlehnung an EN 197-1: CEM II/B))

Anmerkung: Jede Veränderung der stofflichen und granulometrischen Zementzusammensetzung hat – unter sonst konstanten Randbedingungen - Auswirkungen auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften. Der Referenzzement CEM II/A-LL hatte einen höheren Klinkerfaktor als der R-Zement aus der gemeinsamen Mahlung von ziegelhaltigem RC-Material und Klinker (BV2). In Anlehnung an EN 197-1 dürfte die Zusammensetzung des R-Zements als CEM II/B an der Grenze zu vergleichsweise minimalen Klinkergehalten eingeordnet werden. Auch die Composite Kalkstein (Referenz) und ziegelhaltiges RC-Material (BV2) unterscheiden sich in ihrer stofflichen und granulometrischen Zusammensetzung deutlich.

Quelle: A. Winkel, N. Holländer

ReMin
Reparaturwirtschaft
Kreislaufwirtschaft
Baum und Mineralische Stoffwirtschaft

spenner hercules

Anwendung der R-Zemente
aus den großtechnischen
Betriebsversuchen:

- in der Herstellung von
Transportbeton

ReMin-Abschlusskonferenz | Goslar | 18. bis 20. Juni 2024

Bild 81 Beispiel für wissenschaftliche Kommunikation aus der Praxis (Zementwerk) für die Praxis (Transportbeton), Präsentation der R-ZIEMENT-Forschungsergebnisse im Rahmen der ReMin-Abschlusskonferenz

13.3 Werkzemente in der Fertigung von Betonrohren (Erfahrungen aus dem Betonwerk Bieren) (SP)

Aufgrund der Eigenschaften, wie hoher Blainwert und ein mögliches Saugverhalten der Ziegelpartikel wurde der R-Zement aus BV2 für einen Versuch in der Betonrohrherstellung im Betonwerk Bieren eingesetzt. Für die Betonrohrherstellung mit Direktentschalung ist eine hohe Grünstandfestigkeit zwingend erforderlich.

Der Zement wurde in einer werkseigenen Rezeptur eingesetzt. Aufgrund der hohen Grünstandfestigkeit ließen sich die Betonrohre problemlos ausschalen. Die Güte der Oberfläche der R-Zement-Betonrohre war nicht von den Betonrohren zu unterscheiden, welche mit dem Standardzement hergestellt wurden. Lediglich die Betonfarbe war leicht rötlich im Vergleich zur Standardrezeptur (vgl. **Bild 82**). Die folgende Tabelle listet einige Festbetoneigenschaften auf.

Tabelle 34 Eigenschaften der Festbetone* unter Verwendung des R-Zements aus dem Werksversuch BV2

	Prüfalter 2 Tage		Prüfalter 7 Tage		Prüfalter 28 Tage	
	Festbetonrohddichte	Druckfestigkeit	Festbetonrohddichte	Druckfestigkeit	Festbetonrohddichte	Druckfestigkeit
	[kg/dm ³]	[MPa]	[kg/dm ³]	[MPa]	[kg/dm ³]	[MPa]
Versuch 1	2,373	26,3	-	-	2,418	67,6
Versuch 2	2,403	29,7	2,394	48,0	2,409	64,5

*) Quelle: Betonwerk Bieren




Quelle: Betonwerk Bieren

bieren betonwerk

Anwendung der R-Zemente aus den großtechnischen Betriebsversuchen:

- in der Fertigung von Betonrohren




ReMin-Abschlusskonferenz | Goslar | 18. bis 20. Juni 2024

R-ZIEMENT

Bild 82 Beispiel für wissenschaftliche Kommunikation aus der Praxis (Zementwerk) für die Praxis (Betonrohre), Präsentation der R-ZiEMENT-Forschungsergebnisse im Rahmen der ReMin-Abschlusskonferenz

14 Ziegelhaltige Laborzemente mit gesteigertem Recyclingfaktor sowie reduziertem Klinkerfaktor – Herstellung auf Grundlage der im Betriebsversuch hergestellten Werkzemente (VDZ, SP)

Aufgrund ihrer hohen Leistungsfähigkeit wurden die in den Betriebsversuchen BV1 und BV2 hergestellten Werkzemente als Basiszemente für weitere Zementmischungen, z.B. mit zusätzlichem Ziegelschleifstaub Zib 23, mit separat gemahlenem Mauerwerksbruch Mab 24, mit Kalksteinmehl LL oder

Zementsteinmehl F, verwendet. Ziel der Laborversuche war es, den Klinkerfaktor der Werkzemente nochmals zu senken und dabei möglichst wenig Leistungsfähigkeit (z.B. Druckfestigkeit) zu verlieren. Je nach Art und Anteil des nachträglich zugesetzten Stoffes wurde somit auch der Recyclingfaktor des gemischten Laborzements verändert.

Die Werkzemente wurden demnach sowohl als Klinkerkomponente als auch als „Ziegelkomponente“ verwendet (vgl. CEM II/A-LL als Klinker-/Kalksteinkomponente in den Abschnitten 10.3, 10.4, 10.6). Je nach Zementzusammensetzung lag die Ziegelkomponente im Werkzement als reiner Ziegel (BV1: Zib 23 aus Ziegelwerken) oder als ziegelhaltiges RC-Material (BV2: Mab 24 aus Recyclingwerken) vor. Der aussichtsreichste, nachträglich gemischte Zement sollte anschließend in zusätzlichen dauerhaftigkeitsrelevanten Betonprüfungen angewendet werden.

Aus **Bild 83** geht hervor, dass das nachträgliche Anreichern des Zements BV1 mit 10 M.-% Ziegelschleifstaub zu einer Verringerung des Klinkerfaktors auf ca. 60% und folglich zu einer Verringerung der Druckfestigkeiten führte. Der Recyclingfaktor verdoppelte sich auf ca. 20%. Die Anfangsfestigkeit lag mit ca. 30 MPa auf vergleichsweise hohem Niveau. Mit einer Normfestigkeit von ca. 50 MPa wurde die Festigkeitsklasse 52,5 nicht mehr erreicht. Auf die Lage und Steigung der Porengrößenverteilung (PGV) hatte die Veränderung der Zementzusammensetzung (hier von CEM II/B auf CEM II/C) keinen signifikanten Einfluss.

Wurde hingegen der Zement aus BV2 mit 10 M.-% inertem Kalkstein „verdünnt“, verringerte sich der Klinkerfaktor des Zements aus gemeinsamer Mahlung auf etwa 58%. Der Recyclingfaktor nahm ebenfalls geringfügig ab. Erwartungsgemäß verringerten sich die Festigkeiten und erreichten Werte von ca. 23 MPa (2d) und 44 MPa (28d).

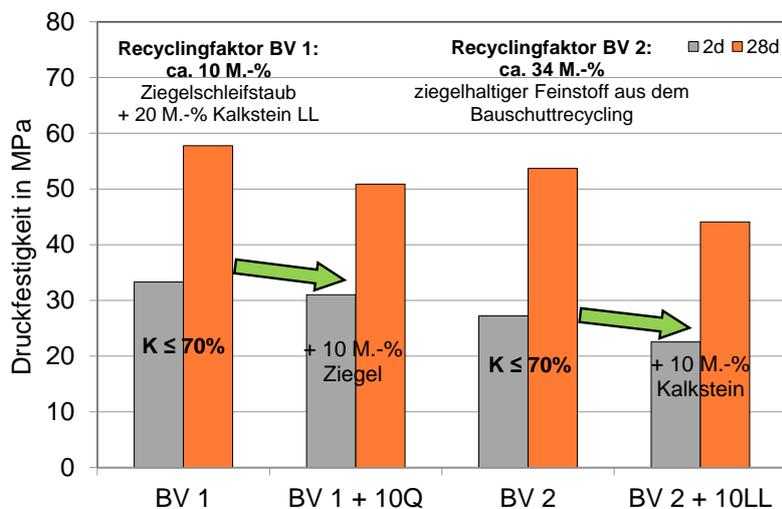


Bild 83 Druckfestigkeit der Werkzemente aus BV1 (mit gesiebttem Ziegelschleifstaub Zib 23 aus Ziegelwerken) und aus BV2 (mit zerkleinertem Mauerwerksbruch Mab 24 aus Recyclingwerken) im Prüfalter von zwei und 28 Tagen, Zement BV1 wurde nachträglich mit 10% Ziegelschleifstaub gemischt, Zement BV2 wurde nachträglich mit 10% Kalkstein gemischt

Bild 84 zeigt die Porengrößenverteilungen der Normmörtel im Vergleich. Während die PGV-Kurven der Mörtel BV1 und BV2 trotz deutlich unterschiedlicher Zementzusammensetzungen und Mahlverfahren ähnliche Verläufe aufweisen, so wies der Mörtel des mit Kalkstein gemischten Zements (BV2+ 10LL) eine höhere Gesamtporosität > 14 Vol.-% sowie einen höheren Anteil größerer Poren auf. Die PGV-Kurve lag aufgrund des Kalksteinanteils deutlich in größeren Porenbereichen.

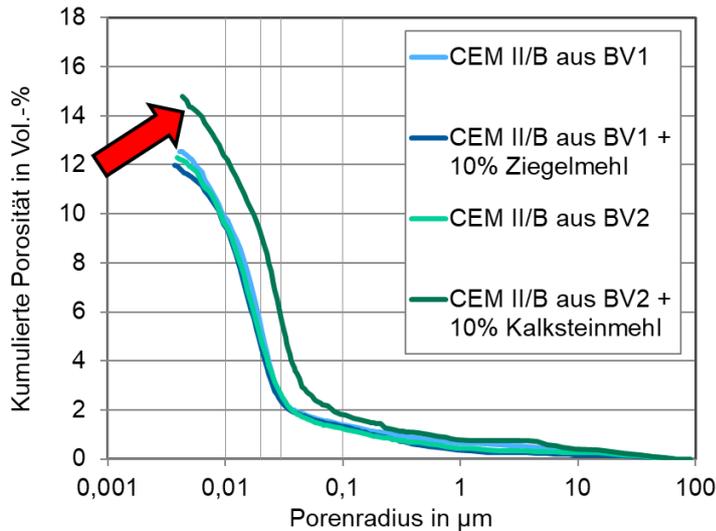


Bild 84
 Porengrößenverteilung am Normmörtel im Prüfmörtel von 28 Tagen, Verwendung von R-Zementen aus den Betriebsversuchen BV1 und BV2 sowie nachträglich gemischter R-Zemente (vgl. **Bild 84**)

Der Zement aus BV1 wurde in unterschiedlichen Rezepturen nachträglich gemischt mit:

- 10 M.-% Ziegelschleifstaub Zib 23, Durchgang nach Siebung auf 125 µm (vgl. **Bild 83**)
- 10 M.-% Ziegelschleifstaub Zib 23, Rückstand nach Siebung gemahlen auf ca. 6000 cm²/g,
- 10 M.-% Kalksteinmehl, Mahlfineinheit ca. 3000 cm²/g.

Dabei wurde der Klinkerfaktor auf ca. 60% verringert und im Vergleich zum Werkzement BV1 nahmen die Druckfestigkeiten in jedem Prüfmörtel ab (vgl. **Bild 85**). Während die Laborzemente im Alter von zwei Tagen – unabhängig ihrer Zusammensetzung - etwa 30 MPa erzielten, so wurden nach 28 Tagen Werte zwischen 51 MPa und 47 MPa ermittelt. Die geringste Normfestigkeit wurde an dem Zement festgestellt, der nachträglich mit Kalkstein versetzt wurde.

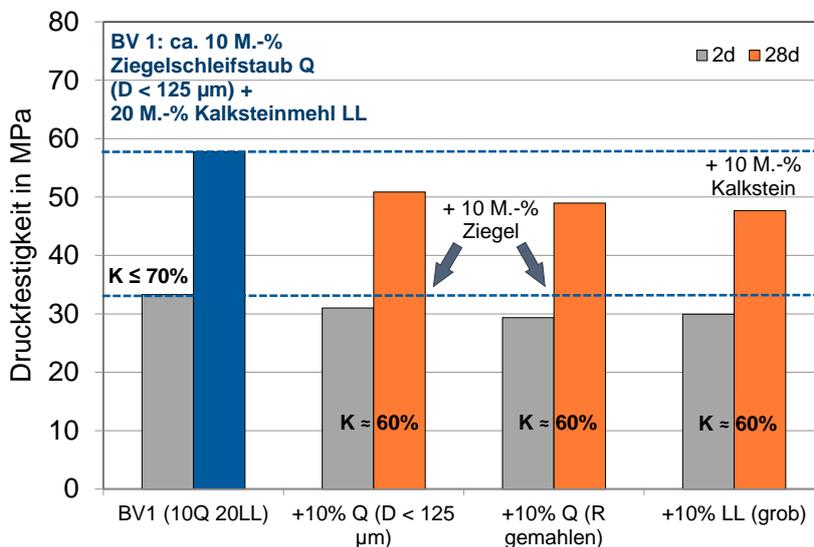


Bild 85 Druckfestigkeit des Werkzements BV1 (mit gesiebttem Ziegelschleifstaub Zib 23 aus Ziegelwerken) im Vergleich zu nachträglich gemischten Zementen, jeweils im Prüfmörtel von zwei und 28 Tagen

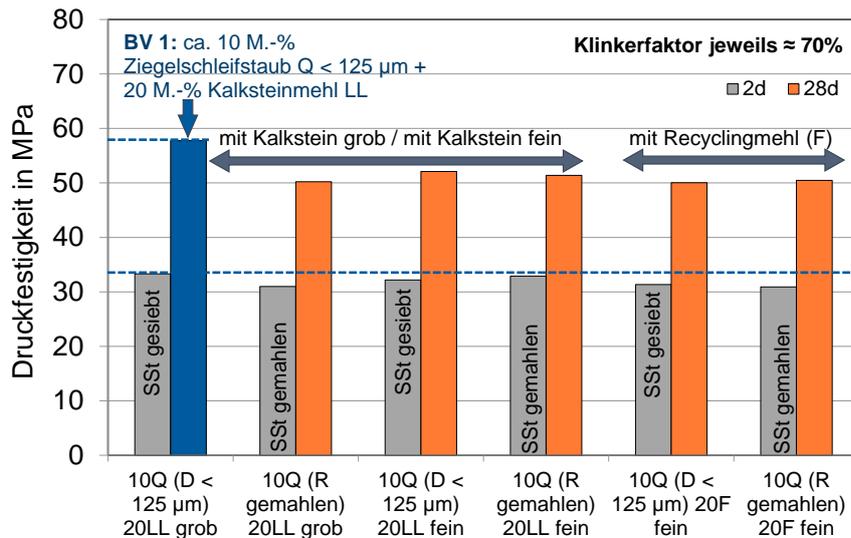


Bild 86 Druckfestigkeit des Werkzements BV1 (mit gesiebttem Ziegelschleifstaub Zib 23 aus Ziegelwerken) im Vergleich zu Laborzementen mit 10 M.-% Zib 23 sowie 20 M.-% Kalkstein unterschiedlicher Feinheiten bzw. Recyclingmehl, jeweils im Prüfmalter von zwei und 28 Tagen

Bild 86 vergleicht Ergebnisse an Zementen mit ähnlichen stofflichen Zusammensetzungen, jedoch unterschiedlichen granulometrischen Zusammensetzungen bei konstantem Klinkerfaktor (70 M.-% CEM I 52,5 R). Folgende Ausgangsstoffe wurden variiert:

- 10 M.-% Ziegelschleifstaub Zib 23, Durchgang nach Siebung auf 125 µm (SSt gesiebt),
- 10 M.-% Ziegelschleifstaub Zib 23, Rückstand gemahlen auf ca. 6000 cm²/g (SSt gemahlen),
- 20 M.-% Kalksteinmehl, Mahlfineinheit ca. 3000 cm²/g (LL grob)
- 20 M.-% Kalksteinmehl, Mahlfineinheit ca. 7000 cm²/g (LL fein)
- 20 M.-% Recyclingmehl aus der Betonaufbereitung, ca. 7000 cm²/g gemahlen (F fein)

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen bestätigen, dass die für den Betriebsversuch BV1 ausgewählte Zementzusammensetzung in jedem Prüfmalter die höchsten Werte erreichte und die Ausgangsstoffe sowohl granulometrisch als auch stofflich optimal auf einander abgestimmt waren. Die anderen Zemente erreichten mit rd. 31 MPa – 33 MPa (2d) sowie mit rd. 50 MPa – 52 MPa (28d) auf etwas geringerem Festigkeitsniveau.

Bild 87 stellt Ergebnisse nachträglich mit Kalkstein gemischter Zemente dar (im Bild rechts). Als Basiszement wurde der Werkzement aus der gemeinsamen Mahlung (BV2) verwendet. Der im Betriebsversuch BV2 hergestellte Zement hatte einen Recyclingfaktor von ca. 34% unter Verwendung von ziegelhaltigem Recyclingbrechsand/ Recyclingfeinstoff Mab 24 aus den Recyclingwerken. Zum Vergleich wurden getrennt gemahlene Laborzemente – ebenfalls mit Mab 24 – hergestellt, die einen höheren Recyclingfaktor (40%) bzw. einen geringeren Recyclingfaktor (30%) aufwiesen und mit CEM I 52,5 R gemischt wurden (im Bild links). Der getrennt aufbereitete Mab 24 wurde zuvor auf eine spezifische Oberfläche von ca. 5000 cm²/g gemahlen.

Aus dem Bild geht hervor, dass der im BV2 hergestellte Werkzement sowie der getrennt gemahlene Zement mit 30 M.-% Mab 24 vergleichbare Anfangsfestigkeiten von ca. 29 MPa erzielten. Die anderen Zemente wiesen einen geringeren Klinkerfaktor von ca. 60% sowie geringere Anfangsfestigkeiten von ca. 23 MPa auf. Im Vergleich der Normfestigkeiten wurde das Niveau des Zements BV2 nicht erreicht. Bei Verwendung von 30 M.-% Mab 24 und 70 M.-% CEM I wurden ca. 49 MPa erreicht, bei Verwendung von 40 M.-% Mab 24 wurden ca. 42 MPa erzielt. Auch die nachträgliche Zugabe von 10 M.-%

Kalkstein führte im Vergleich zum Werkzeugement BV2 zu einer Abnahme der Normfestigkeit auf etwa 43-44 MPa, die Feinheit des Kalksteins hatte keinen Einfluss auf das Ergebnis.

Die Auswertung der Ergebnisse verdeutlicht, dass das Ziel der gemeinsamen Mahlung erfüllt wurde und der im Mahlgut enthaltene Klinker trotz gemeinsamer Mahlung und eines erhöhten Recyclingfaktors so aktiviert werden konnte, dass Vergleichswerte zu getrennt aufbereiteten Laborzementen eingehalten bzw. übertroffen werden konnten.

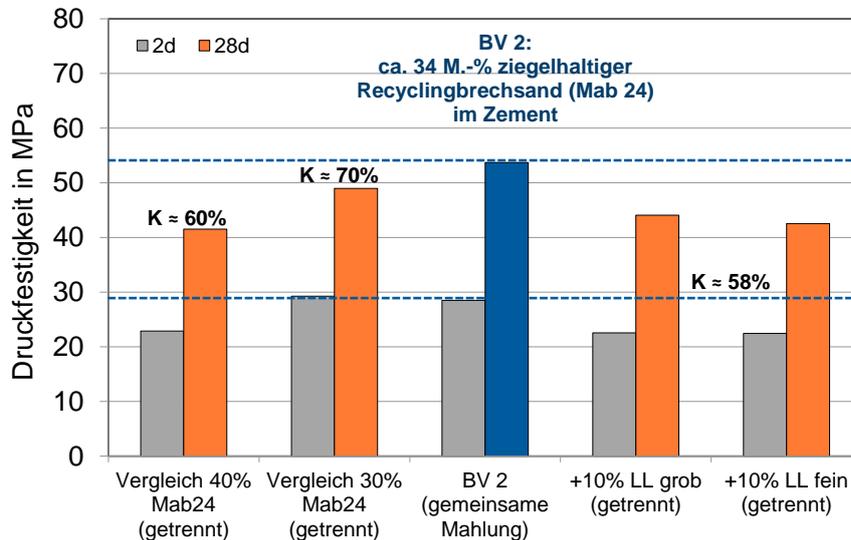


Bild 87 Druckfestigkeit des Werkzeugzements BV2 (gemeinsame Mahlung von Mab 24 aus den Recyclingwerken) im Vergleich zu nachträglich mit Kalkstein gemischten Zementen (rechts, LL grob, LL fein) sowie im Vergleich zu Laborzementen aus getrennter Mahlung mit 40 M.-% bzw. 30 M.-% Mab 24 im Kombination mit CEM I 52,5 R (links), jeweils im Prüffalter von zwei und 28 Tagen

Für die Untersuchungen im Beton wurde ein Zement auf Basis des ersten Betriebsversuches BV1 ausgewählt (BV 11 = BV1 + 10%Q). Der Zement BV 11, der zusätzliche 10 M.-% gesiebten Schleifstaub ($D < 125 \mu\text{m}$) enthielt und einen Klinkerfaktor von ca. 60% aufwies, sollte nunmehr in folgenden Zulassungsprüfungen am Beton untersucht werden (vgl. Kapitel 16):

- im Würfelverfahren (Frostwiderstand)
- im CDF-Test (Frost-Tausalz-Widerstand)
- im Migrationsschnelltest (Chlorideindringwiderstand).

15 Betrachtung von Schad- und Störstoffen (zu Themenschwerpunkt D)

15.1 Ziegelwerke der Leipfinger-Bader GmbH

Die in den Ziegelwerken der Leipfinger-Bader GmbH aufkommenden Stoffströme weisen eine große Homogenität auf. Insbesondere Schleifstaub und Produktionsausschuss, aber auch sortierte Materialien aus Baustellenrücklauf sind als sortenrein zu betrachten (vgl. Abschnitt 3).

Zudem erfolgte im Projekt eine Prozessanalyse der Recyclinganlage in Puttenhausen, um die Materialreinheit im Bereich geringer Korngrößen ($< 4\text{mm}$) weiter zu verbessern. Dabei lag ein Schwerpunkt auf der Reduzierung oder Minimierung von Dämmstoff- und Faseranteilen im Aufbereitungsprozess. Für eine effiziente Weiterverarbeitung von ziegelhaltigen Materialien ist ein hochwertiges und sortenreines Vorliegen des Ausgangsrohstoffes essentiell, um nachgelagerte Bearbeitungsschritte reduzieren zu können.

15.2 Recyclingwerke der Scherer & Kohl GmbH

Der Umgang mit möglichen Schad- und Störstoffen, die in den Recyclingwerken der Scherer & Kohl GmbH nach Anlieferung bzw. vor Aufbereitung von Abbruch- bzw. Bauschuttmassen anfallen können, bildet einen zentralen Aspekt bei der Verwertung von Recyclingmaterialien. Die Identifikation und Minimierung von Störstoffen, die die Qualität der aufbereiteten Materialien beeinträchtigen oder Umweltprobleme verursachen könnten, hat eine sehr hohe Relevanz. Im Rahmen dieses Projekts wurden die angelieferten Abbruch- und Bauschuttmassen sowohl bei der Anlieferung als auch während der Aufbereitung systematisch auf Störstoffe untersucht.

Zu den typischen Störstoffen zählten organische Materialien wie Holz und Kunststoff, aber auch mineralische Fremdstoffe wie Gips, Porenbeton und Asphalt. Darüber hinaus wurden metallische Verunreinigungen durch gezielte magnetische Abscheidung reduziert. Besonders problematisch waren leichte Störstoffe, da diese die mechanischen Eigenschaften der Endprodukte negativ beeinflussen können. Die Anteile häufig identifizierter Störstoffe gehen aus der folgenden Tabelle hervor.

Tabelle 35 Störstofftypen und Anteile

Störstofftyp	Anteil im Material (%)
Holz und Kunststoffe	5-10
Gips und Porenbeton	3-7
Asphalt	2-5
Metalle	1-3

Die Entfernung von Störstoffen erfolgte in mehreren Schritten. Zunächst wurde das Material bei der Anlieferung einer optischen Kontrolle durch geschultes Personal unterzogen. Auffällige Störstoffe wurden manuell entfernt, bevor das Material in die Produktionskette gelangte. Zusätzlich erfolgte eine Trennung von Metallen über Magnetabscheider, während leichte organische Stoffe (z.B. Kunststoffe) über Windsichter aussortiert wurden. In der nassen Aufbereitung wurden feine Störstoffe mittels Siebung und Filtration separiert.

Die Eliminierung von Störstoffen war entscheidend, um die Qualität der Recyclingbrechsande und der groben RC-Gesteinskörnungen zu gewährleisten. Proben mit hohem Anteil an Störstoffen zeigten signifikante Verschlechterungen der mechanischen Eigenschaften, wie z. B. reduzierte Druckfestigkeit und erhöhte Porosität. Im Gegensatz dazu wiesen Proben, die effektiv von Störstoffen befreit wurden, eine deutlich höhere Homogenität und Stabilität auf. Die strikte Kontrolle der Störstoffe ermöglichte somit eine gleichbleibend hohe Qualität der recycelten Baustoffe und eine Einhaltung der Umweltstandards.

Themenschwerpunkt C: Leistungsfähigkeit ziegelhaltiger R-Zemente im Beton

16 Untersuchungen an Betonen unter Verwendung ziegelhaltiger R-Zemente (VDZ)

16.1 Forschungsergebnisse "von dritter Seite"

Vor und während der Laufzeit des Projektes R-ZiEMENT wurden im **IGF-Projekt 20920 N „Verbesserung der Energieeffizienz und Reaktivität durch separate Mahlung von Ziegelbrechsand für den Einsatz in Portlandpuzzolanzementen“** (IZF Essen, VDZ Düsseldorf, 2022) R-Zemente mit 30 M.-% RC-Anteil (Klinkerfaktor 70 %) bis in den Beton untersucht [6]. Aus dem Projekt ging beispielsweise hervor, dass die Betone in zulassungsrelevanten Dauerhaftigkeitsprüfungen die wesentlichen Bewertungskriterien des DIBt für den Frostwiderstand, den Frost-Tausalz-Widerstand, den Chlorideindringwiderstand und den Carbonatisierungswiderstand erfüllten. Beide im IGF-Projekt untersuchten R-Zemente mit 30 M.-% Ziegelbruch bzw. Mauerwerksbruch bestanden die entsprechenden Betonprüfungen (vgl. Anwendungszulassungen des DIBt).

Weitere parallele Projekte (VDZ Düsseldorf, FH Aachen, FIB Weimar) befassten sich unter anderem mit klinkereffizienten Zementen, die einen Klinkerfaktor < 70 % aufwiesen. In der Masterarbeit „*Randbedingungen für die Anwendung von Recyclingmehlen in ressourceneffizienten, zementgebundenen Baustoffen*“ [16] (Laschet, Pierre; 2023) wurde beispielsweise untersucht, welche Auswirkungen die Einstellung einer konstanten, plastischen Mörtelkonsistenz, z. B. durch gezieltes Absenken des w/z-Wertes, auf das Zementsteingefüge haben kann. Der Bereich zwischen steifplastischer (SP) und weichplastischer Konsistenz (WP) wurde in [20] [17] [16] als Bewertungskorridor definiert. In der Masterarbeit wurde auch der Frage nachgegangen, inwieweit bei der Herstellung leistungsstarker R-Zemente der RC-Anteil auf > 30 M.-% erhöht bzw. der Klinkerfaktor entsprechend verringert werden könnte, wenn granulometrische Aspekte (z. B. KGV der Hauptbestandteile) berücksichtigt würden. Der RC-Anteil der R-Zemente bestand aus Ziegelstein, aus Zementstein sowie aus RC-Gemischen.

Im DBU-Projekt „*Granulometrische Optimierung klinkereffizienter Zemente – Effekte auf die Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit von Beton*“ [20] [21] (AZ 34647/01, VDZ Düsseldorf, FIB Weimar, 2023) wurden erstmalig – unter Verwendung eines puzzolanischen Ziegelschleifstaubs – kalksteinhaltige R-Zemente der Zusammensetzung CEM II/C-M (Q-LL) mit einem Klinkerfaktor von 50 % bis in den Beton untersucht. In den dauerhaftigkeitsrelevanten Untersuchungen unter Verwendung klinkereffizienter R-Zemente mit 30 M.-% RC-Material (hier Ziegelschleifstaub aus einem Ziegelwerk) und 20 M.-% ungebranntem Kalkstein wurden die Zulassungskriterien für die Prüfungen des Chlorideindringwiderstandes am Beton (Migrationsschnelltest) und des Carbonatisierungswiderstandes an Feinbetonprismen eingehalten, die Prüfungen des Frostwiderstandes (Würfelverfahren) sowie des Frost-Tausalz-Widerstandes (CDF-Test) nicht ohne w/z-Wert-Absenkung bestanden. Die Methode, den w/z-Wert bzw. den Wassergehalt zementspezifisch, d. h. bis zur steifplastischen Konsistenzgrenze abzusenken (w/z (SP)), wurde im DBU-Projekt erstmalig am Beton erprobt.

Anmerkung: Die Erkenntnisse aus diesen Projekten gingen in das R-ZiEMENT-Projekt ein – insbesondere in die Versuchsplanungen des dritten Projektjahres, z. B. in die Optimierung der Zementzusammensetzungen sowie der Zement- und Betoneigenschaften. Wie in den Zulassungsprüfungen für klinkereffiziente CEM II/C-M-Zemente mit Hüttensand oder Flugasche standen auch im R-ZiEMENT-Projekt die Untersuchungen des Frostwiderstandes nach dem Würfelverfahren im Vordergrund der Betonprüfungen.

16.2 Erste ziegelhaltige Laborzemente CEM II/C-M (Q-LL) in der Anwendung: Frostprüfungen bei abgesenktem w/z-Wert - Erfahrungen aus dem DBU-Projekt (VDZ, SP)

Bild B-12 und **Bild B-13** im Anhang stellen Auswertungen von Frostversuchen unter Verwendung ziegelhaltiger Zemente CEM II/C-M (Q-LL) mit Zusammensetzung 50K 30Q 20LL dar. Als RC-Material

wurde ein gemahlener Ziegelschleifstaub (Q) hoher Feinheit verwendet. Die Bilder zeigen erste Ergebnisse aus dem Würfelverfahren zur Untersuchung des Frostwiderstandes sowie erste Ergebnisse aus dem CDF-Test zur Untersuchung des Frost-Tausalz-Widerstandes (vgl. Abschnitt 16.1: DBU-Projekt [19]).

Dem Diagramm im **Bild B-12** aus [19] ist beispielsweise zu entnehmen, dass an Betonen mit einem Wasserzementwert $w/z = 0,60$ Abwitterungen ≥ 10 M.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln ermittelt wurden. Der in den Zulassungsprüfungen des DIBt verwendete Grenzwert für Abwitterungen (10 M.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln) wurde von den Betonen ($w/z = 0,60$) nicht eingehalten. Diese Betone haben somit auch das Kriterium für die Anwendung in der Expositionsklasse XF3 nicht erfüllt und die Frostprüfung gemäß den Zulassungsverfahren des DIBt nicht bestanden. Bei Anwendung einiger ziegelhaltiger Zemente wurde nach der Prüfung der Betone im Würfelverfahren eine w/z -Wert-Absenkung im Beton (SP) vorgenommen:

Beton-SP mit Zement Nr. 9: w/z (SP) = 0,56; Abwitterungen nach 100 FTW: 7,4 M.-%

Beton-SP mit Zement Nr. 18: w/z (SP) = 0,58; Abwitterungen nach 100 FTW: 5,7 M.-%.

Das Bild zeigt, dass die SP-Betone auf Basis der Zemente 9 und 18 (vgl. DBU-Projekt) nach 100 Frost-Tau-Wechseln Abwitterungen < 10 M.-% aufwiesen. Diese SP-Betone haben die Frostprüfung bei abgesenktem w/z -Wert für die Expositionsklasse XF1 bestanden.

Auch an Luftporenbetonen war diese Methode erfolgreich anwendbar. Nach gezielter w/z -Wert-Absenkung wurde die Frost-Tausalz-Prüfung im CDF-Test bestanden (**Bild B-13**).

Im DBU-Projekt [19] haben die Untersuchungen des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes gezeigt, dass die stoffliche und granulometrische Optimierung klinkereffizienter R-Zemente (mit Klinkerfaktor 50 %) für die Anwendung in den Expositionsklassen XF3 und XF4 an gewisse Grenzen kommen kann. Eine Absenkung des w/z -Wertes im Beton kann eine Möglichkeit darstellen, die Abwitterungen zu verringern und die Frostprüfungen zu bestehen.

16.3 Herstellung der Betone und Frischbetoneigenschaften im R-ZiEMENT-Projekt

In den Betonversuchen wurde die Eignung der Versuchszemente für Anwendungsgebiete nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 anhand von Dauerhaftigkeitsuntersuchungen überprüft. **Tabelle 36** gibt einen Überblick der Betonzusammensetzungen sowie der Betonprüfungen zur Bestimmung der Frischbetoneigenschaften und der dauerhaftigkeitsrelevanten Betoneigenschaften.

Tabelle 36 Versuchsprogramm Beton - Betonzusammensetzung, Eigenschaften und Prüfverfahren

Beton	z	w/z	Betoneigenschaften und Prüfverfahren
	kg/m ³	-	
B1	300	0,60	Frischbetoneigenschaften, 28d-Druckfestigkeit, Frostwiderstand nach dem Würfelverfahren (DIN CEN/TS 12390-9)
B2	320	0,50	Frischbetoneigenschaften, 28d-Druckfestigkeit, Chlorideindringwiderstand im Schnellverfahren (BAW-Merkblatt „Chloridmigration“, MDCC)
B3 *)	320	0,50	Frischbetoneigenschaften, 28d-Druckfestigkeit, Frost-Tausalz-Widerstand nach dem CDF-Verfahren (DIN CEN/TS 12390-9)
FB	(vgl. Abschnitt 16.7)	0,50	Feinbetone mit Sieblinie A8/B8 in Anlehnung an DIN EN 196-1 Prüfung gemäß Zulassungsverfahren des DIBt Druckfestigkeit und Carbonatisierungstiefe an Feinbetonprismen

*) - Luftporengehalt im Frischbeton 4,5 – 5,5 Vol.-%

Anmerkung: Mit Ausnahme eines Luftporenbildners für die Herstellung von CDF-Betonen wurden alle Betone (B1, B2) und Feinbetone (FB) ohne Verwendung von Betonzusatzmitteln hergestellt.

Die Mischungszusammensetzungen der Betone orientierten sich an den Grenzwerten für die Zusammensetzung und Eigenschaften von Betonen nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 in Abhängigkeit der Umwelteinwirkungen (Expositionsklassen). Hieraus ergaben sich drei charakteristische Betonrezepturen für die Betonversuche. Für die Herstellung der Betone wurden Gesteinskörnungen (Rheinsand und Rheinkies) aus den Beständen der Forschungsstelle mit der Kornzusammensetzung A16/B16 bzw. B32/C32 nach DIN 1045-2, Anhang L verwendet.

An allen Betonen wurden die Frischbetontemperatur und die Frischbetonrohichte nach DIN EN 12350-6 sowie der Luftgehalt mittels Druckausgleichsverfahren im Luftporentopf nach DIN EN 12350-7 gemessen. 10 Minuten nach Mischende wurde das Ausbreitmaß des Frischbetons mit dem Ausbreitversuch nach DIN EN 12350-5 ermittelt. In den Fällen, bei denen das Ausbreitmaß zur Bestimmung der Konsistenz nicht geeignet war, wurde zu diesem Zeitpunkt das Verdichtungsmaß mit dem Verdichtungskasten nach DIN EN 12350-4 bestimmt. Eine Übersicht wesentlicher Ergebnisse ist im Anhang dargestellt.

16.4 Frostwiderstand der Betone im Würfelverfahren

An allen Betonen B1 wurde im Alter von 28 Tagen die Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 und die Rohdichte nach DIN EN 12390-7 an Würfeln mit der Kantenlänge 150 mm bestimmt. Die Lagerung der Probekörper erfolgte nach DIN EN 12390-2:2001-06, Anhang NA. Die Druckfestigkeiten (Mittelwerte) der Betone sind im Anhang zusammengefasst.

Die Prüfung des Frostwiderstandes nach dem Würfelverfahren entspricht den Maßstäben, die bisher bei der Zulassung von Zementen durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) angelegt wurden. Die Prüfung der Betone mit dem Würfelverfahren erfolgte bis zu 100 Frost-Tau-Wechseln (FTW), im Projekt abweichend mit zwei Wechseln pro Tag.

Die folgenden Bilder werten die Untersuchungen des Frostwiderstandes aus und zeigen die Abwitterungen der Betone B1 in Abhängigkeit der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel (FTW).

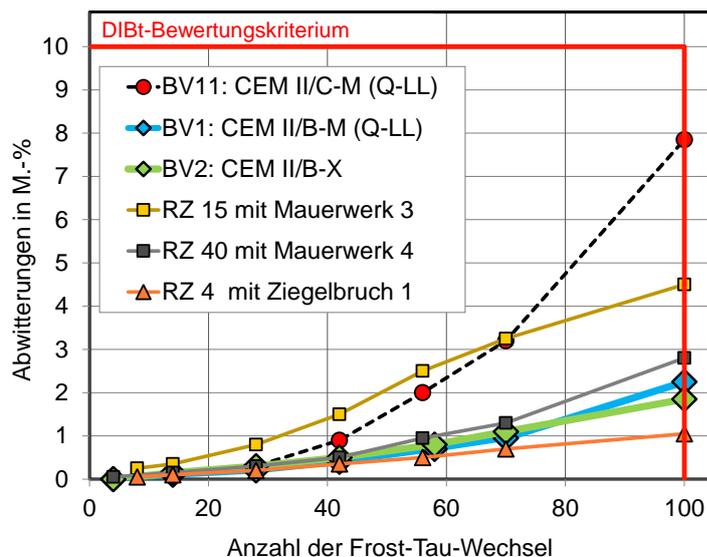


Bild 88 Untersuchungen der Betone B1 im Würfelverfahren ($z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$), Abwitterungen der Betone in Abhängigkeit der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, Verwendung ziegelhaltiger R-Zemente mit einem Recyclingfaktor von ca. 10% bis 30% bei einem Klinkerfaktor von ca. 70% bis 60%

Bild 88 ist zu entnehmen, dass bei Anwendung der Laborzemente mit 30 M.-% RC-Material (Zib/Mab) in Kombination mit 70 M.-% CEM I 52,5 R, der Werkzemente aus den Betriebsversuchen BV1 und BV2 sowie des modifizierten Werkzements (BV11) mit verringertem Klinkerfaktor Abwitterungen von maximal 8 M.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln ermittelt wurden. Der in den Zulassungsprüfungen des DIBt verwendete Grenzwert für Abwitterungen von 10 M.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln wurde von diesen Betonen mit einem Wasserzementwert $w/z = 0,60$ eingehalten. Diese Betone haben somit auch das Kriterium für die Anwendung in der Expositionsklasse XF3 (einschließlich XF1) erfüllt und die Frostprüfung gemäß der Zulassungsverfahren des DIBt bestanden.

Während unter Verwendung der R-Zemente mit einem RC-Anteil von 30 M.-% in Kombination mit 70 M.-% CEM I 52,5 R die Prüfungen des Frostwiderstandes im Würfelverfahren durchweg bestanden wurden, lagen die Abwitterungen der Betone zum Teil deutlich über dem Bewertungskriterium > 10 M.-%, sobald neben dem RC-Anteil auch Kalkstein verwendet und damit der Klinkerfaktor der Zemente auf ca. 50% reduziert wurde. Aus **Bild 89** geht hervor, dass zwei Betone (mit RZ 75 und mit RZ 77) das Bewertungskriterium mit ca. 12 M.-% Abwitterungen geringfügig überschritten haben. Nach Absenkung des Wasserzementwertes bzw. nach Einstellen einer steifplastischen Konsistenz (SP) sollte es in der Anwendung der beiden Zemente möglich sein, die Abwitterungen nach 100 Frost-Tau-Wechseln deutlich auf < 10 M.-% zu reduzieren (vgl. z.B. DBU-Projekt, Abschnitte 16.1 und 16.2 sowie **Bild B-12** im Anhang).

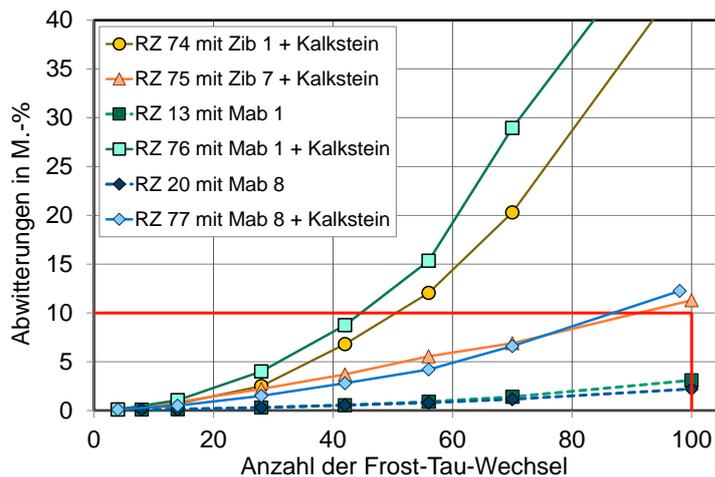


Bild 89 Untersuchungen der Betone B1 im Würfelverfahren ($z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$), Abwitterungen der Betone in Abhängigkeit der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, Verwendung ziegelhaltiger R-Zemente mit einem Recyclingfaktor 30% (Mab1, Mab8) im Vergleich zu R-Zementen mit 20 M.-% Kalkstein und 30 M.-% Ziegelbruch (Zib) bzw. Mauerwerksbruch (Mab), jeweils im Kombination mit 70 M.-% bzw. 50 M.-% CEM I 52,5 R

Die folgenden Bilder stellen die Abwitterungen der Betone nach 100 Frost-Tau-Wechseln in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit im Prüfalalter von 28 Tagen dar. Zum Vergleich wurden Ergebnisse früherer Projekte (z. B. [6] [22] [19] [23]) eingetragen.

Bild 90 verdeutlicht, dass die Betone B1 ($w/z = 0,60$) mit ziegelhaltigen R-Zementen und einem Klinkerfaktor von ca. 70% sowie mit einer Druckfestigkeit von mindestens 35 MPa die Zulassungsprüfung im Würfelverfahren bestanden haben und mit Abwitterungen < 10 M.-% nach 100 FTW das Kriterium für die Anwendung in der Expositionsklasse XF3 (inkl. XF1) erfüllen. Auch der kalksteinhaltige R-Zement aus dem Betriebsversuch BV1 (10% Ziegel, 20% LL) erfüllt das Kriterium sicher. Mit einer Druckfestigkeit von ca. 42 MPa wurden Abwitterungen von ca. 2 M.-% nach 100 FTW ermittelt. Unter Verwendung des im Betriebsversuch BV2 hergestellten Zements wurden trotz des Recyclingfaktors von 34% (Klinkerfaktor ca. 64-66%, gemeinsame Mahlung) eine Betonfestigkeit von ca. 55 MPa und vergleichsweise geringe Abwitterungen von < 2 M.-% nach 100 FTW ermittelt. Vor der Herstellung des

Betons BV11 wurde der R-Zement aus dem Betriebsversuch BV1 nachträglich mit 10 M.-% Ziegelschleifstaub angereichert, was zu einer Verringerung seines Klinkerfaktors auf ca. 60% führte. Der Beton erreichte im Prüfalalter von 28 Tagen eine Druckfestigkeit von ca. 38 MPa, die Abwitterungen nach 100 FTW lagen mit 7,9 M.-% unterhalb des DIBt-Bewertungskriteriums. Das **Bild 90** vergleicht ebenfalls Betone, die ohne und mit w/z-Wert-Absenkung hergestellt wurden. Die Zemente wiesen 20 M.-% Kalkstein LL und 30 M.-% RC-Baustoffe (z.B. Ziegelschleifstaub) auf. Nach Absenkung des w/z-Wertes nahmen erwartungsgemäß die Druckfestigkeiten zu und die Abwitterungen wurden auf Werte < 10 M.-% verringert (vgl. [19]).

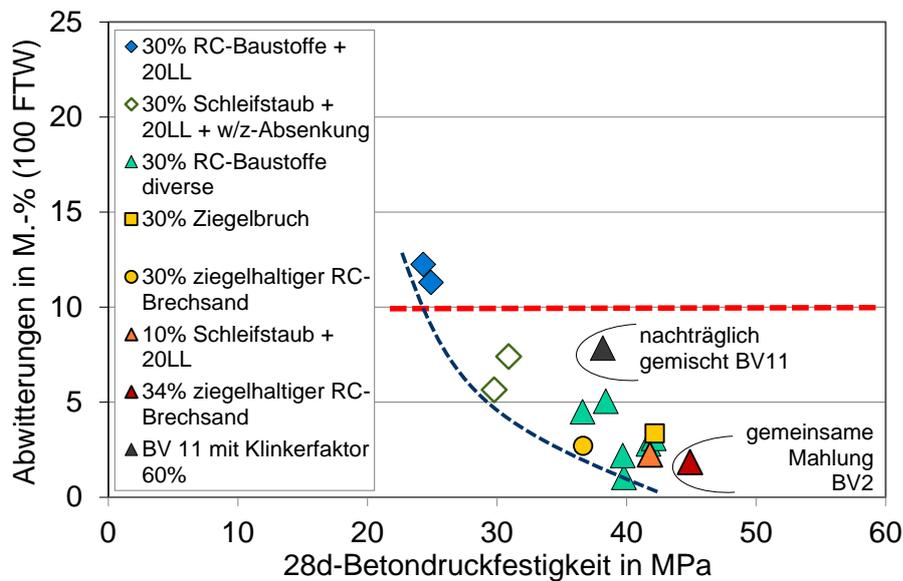


Bild 90 Untersuchungen der Betone im Würfelverfahren ($z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$ bzw. abgesenkt), Abwitterungen der Betone (100 FTW) in Abhängigkeit ihrer Druckfestigkeit im Prüfalalter von 28 Tagen, Verwendung von ziegelhaltigen, zum Teil kalksteinhaltigen R-Zementen mit unterschiedlichen ziegelhaltigen RC-Materialien sowie maximal 70 M.-% Klinker

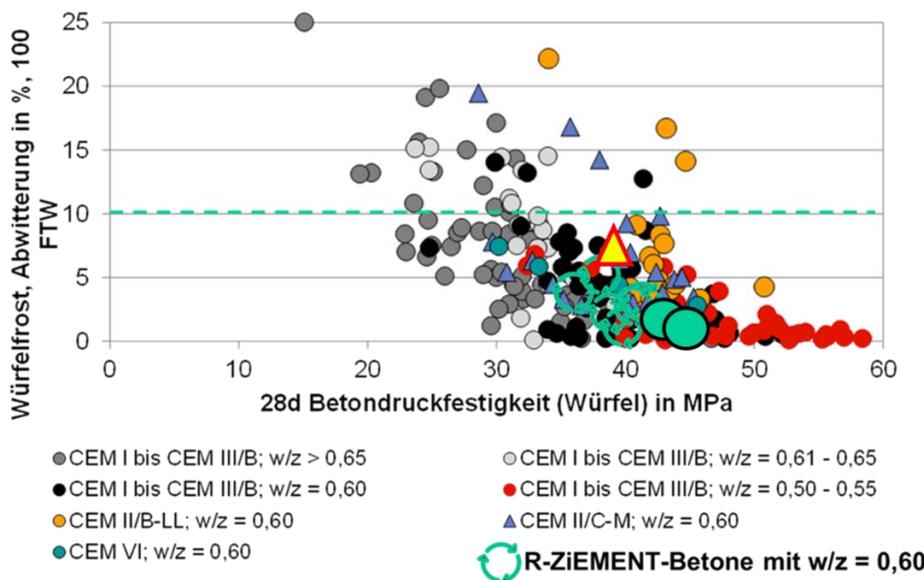


Bild 91 Zusammenhang zwischen Wasserzementwert, Druckfestigkeit und Abwitterungen im Würfelverfahren nach 100 Frost-Tau-Wechseln, *) Quelle: Martin Schneider: The cement industry on the way to a low-carbon future, Cement and Concrete Research 124 (2019), Fig. 12. Relation between water/cement ratio, compressive strength and scaling in the cube test method after 100 freeze thaw cycles according to CEN/TS 12390-9 (XF1-criterion: 10% mass loss) (data collected by VDZ) [23]

Demgegenüber wurden im **Bild 91** zum Vergleich die Abwitterungen zahlreicher Betone nach 100 FTW im Würfelfrostverfahren in Abhängigkeit der 28d-Betondruckfestigkeit dargestellt. Das Bild zeigt Prüfergebnisse des VDZ aus [23], die an Betonen mit unterschiedlichen Wasserzementwerten sowie unter Verwendung verschiedener Zementarten ermittelt wurden. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes R-ZIEMENT sind kreisförmig grün (CEM II/B-Zusammensetzung) bzw. als gelb-rotes Dreieck (CEM II/C-Zusammensetzung) eingetragen. Im Vergleich zur Gesamtübersicht können die R-ZIEMENT-Betone (Klinkerfaktor im Zement ca. 60% bis 70%) z. B. bei CEM I bis CEM III/B mit $w/z = 0,60$ (schwarze Markierungen) sowie bei CEM II/C-M mit $w/z = 0,60$ (Dreieck Markierungen) eingeordnet werden.

Beide Bilder verdeutlichen, dass in der Anwendung klinkereffizienter R-Zemente mit einem Klinkerfaktor von ca. 50% mit Abwitterungen > 10 M.-% im Würfelfrostverfahren zu rechnen ist. Sollen die Abwitterungen nach 100 FTW auf Werte < 10 M.-% verringert werden, können für ziegel- und kalksteinhaltige R-Zemente drei Optimierungsschritte in Ansatz gebracht werden:

- gezielte Veränderung der stofflichen Zementzusammensetzung, z. B. Erhöhung des Klinkerfaktors, Verringerung des Kalksteingehaltes, Veränderung der Ziegelreaktivität,
- gezielte granulometrische Optimierung der Zementhauptbestandteile und des Zements, z. B. durch Veränderung der Korngrößenverteilungen durch mechanische Aufbereitung,
- gezielte Absenkung des Wasserzementwertes bzw. des Wassergehaltes des Betons.

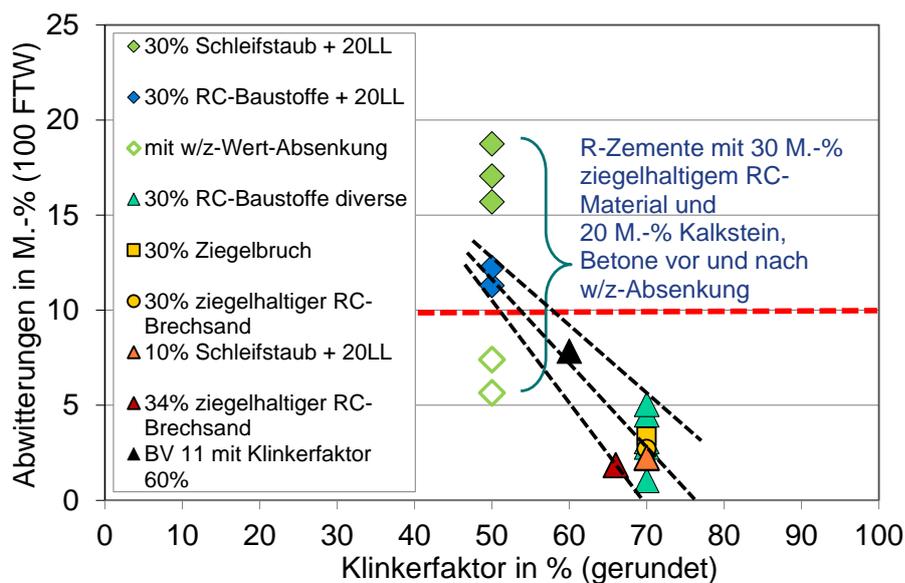


Bild 92 Untersuchungen der Betone im Würfelverfahren ($\rho = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$ bzw. abgesenkt), Abwitterungen der Betone (100 FTW) in Abhängigkeit des Klinkerfaktors der R-Zemente, Verwendung von ziegelhaltigen, zum Teil kalksteinhaltigen R-Zementen mit unterschiedlichen ziegelhaltigen RC-Materialien sowie maximal 70 M.-% Klinker

Ergänzend zu **Bild 90** stellt **Bild 92** die Abwitterungen der Würfelfrostbetone nach 100 FTW in Abhängigkeit des im R-Zement eingestellten Klinkerfaktors dar. Es geht daraus hervor, dass die Abwitterungen bei Verringerung des Klinkerfaktors in unterschiedlicher Weise abnehmen. Je nach stofflicher und granulometrischer Zementzusammensetzung kann die Veränderung des Klinkerfaktors alleine deutliche oder geringfügige Auswirkungen auf den Frostwiderstand der Betone haben. Werden zusätzlich granulometrische bzw. stoffliche Eigenschaften der Zementbestandteile (z.B. des Ziegels) optimiert sowie der w/z -Wert des Betons reduziert, können die Abwitterungen der Betone auf Werte < 10 M.-% verringert werden.

16.5 Frost-Tausalz-Widerstand der Betone im CDF-Verfahren

An den Betonen B3 wurde im Alter von 28 Tagen die Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 und die Rohdichte nach DIN EN 12390-7 an Würfeln mit der Kantenlänge 150 mm bestimmt. Die Lagerung der Probekörper erfolgte nach DIN EN 12390-2:2001-06, Anhang NA. Die Druckfestigkeiten (Mittelwerte) der Betone lagen zwischen 37 MPa und 45 MPa, sie sind im Anhang zusammengefasst.

Mit dem CDF-Test wurde der Widerstand gegenüber einer Frost-Tauwechsel-Beanspruchung bei gleichzeitiger Taumittelbelastung geprüft. Bei der Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands von Betonen B3 mit künstlichen Luftporen ist die Oberflächenabwitterung dominant und für die Beurteilung vorrangig. Die Betone wurden mit einem Wasserzementwert $w/z = 0,50$ sowie einem Zementgehalt von $z = 320 \text{ kg/m}^3$ hergestellt.

Anmerkung: In der Herstellung der Luftporenbetone B3 unter Verwendung des Werkzementes BV2 (CEM II/B-M (Q-LL)) und des klinkereffizienten Zementes BV11 (CEM II/C-M (Q-LL)) wurden erstmalig verflüssigende Zusatzmittel angewendet.

Das Diagramm in **Bild 93** zeigt die Abwitterungen der LP-Betone B3 in Abhängigkeit der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel. Aus dem Bild geht hervor, dass die hier untersuchten ziegelhaltigen R-Zemente die Anwendungsprüfung im CDF-Test durchweg und ohne w/z -Wert-Absenkung bestanden haben. Das im BAW-Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ angegebene Kriterium von maximal $1,50 \text{ kg/m}^2$ Abwitterungen nach 28 Frost-Tau-Wechseln wurde eingehalten. Auch in den DIBt-Zulassungsprüfungen ist dieses Bewertungskriterium für die Anwendung klinkereffizienter Zemente in der Expositionsklasse XF4 relevant.

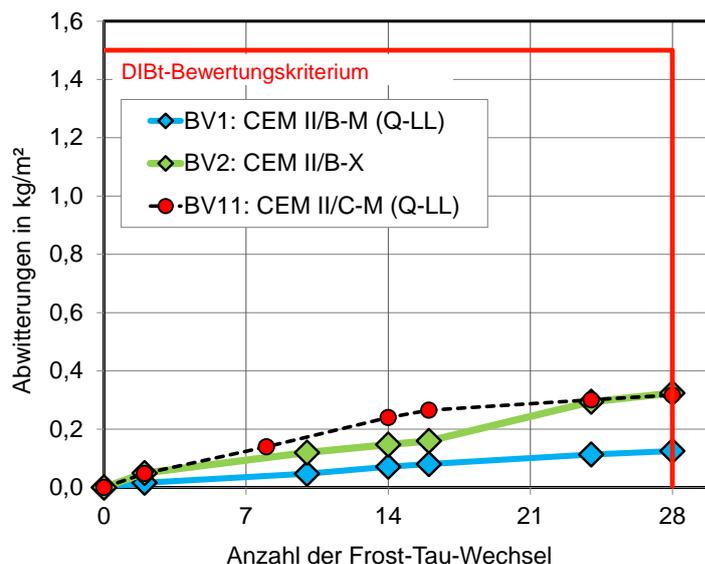


Bild 93 Untersuchungen der Luftporenbetone B3 im CDF-Verfahren ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$), Abwitterungen der LP-Betone in Abhängigkeit der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, Verwendung der R-Zemente aus den Betriebsversuchen BV1 und BV2 sowie des klinkereffizienten R-Zements BV11

Aus [19] sowie **Bild B-13** im Anhang lässt sich ableiten, dass eine weitere Verringerung des Klinkerfaktors – z.B. von 60% (vgl. BV 11) auf 50% - zu einem deutlichen Anstieg der Abwitterungen im CDF-Test führen könnte. Insbesondere für zulassungsrelevante Anwendungen sollten ziegel- und kalksteinhaltige R-Zemente mit geringem Klinkerfaktor stofflich und granulometrisch optimiert werden. Des Weiteren könnte im LP-Beton eine w/z -Wert-Absenkung in Ansatz gebracht werden.

16.6 Chlorideindringwiderstand der Betone im Migrationsschnelltest

Der Widerstand der Betone B2 gegenüber eindringenden Chloriden wurde mit Hilfe des Migrations-tests nach BAW-Merkblatt (Schnelltest) untersucht. Die Prüfkörper wurden bis zum Prüfalter von 35 bzw. 98 Tagen wassergelagert. Die Druckfestigkeiten (Mittelwerte) der Betone lagen zwischen 55 MPa und 61 MPa, sie sind im Anhang zusammengefasst. Darüber hinaus wurde ein Betonprobekörper aus der Herstellung des Transportbetons (Spenner Herkules) untersucht. Es wurden der Zement aus dem Betriebsversuch BV2 sowie Flugasche als Zusatzstoff eingesetzt.

Die Ergebnisse aus der Untersuchung des Chlorideindringwiderstandes der Betone B2 sind im **Bild 94** zusammengefasst. Das in den Zulassungsverfahren des DIBt herangezogene Beurteilungskriterium für den Chloridmigrationskoeffizienten von $25 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ im Prüfalter von 35 Tagen wurde in den Versuchen unter Verwendung der Werkzemente aus BV1 und BV2 sowie des nachträglich mit Ziegel angereicherten R-Zements BV11 eingehalten.

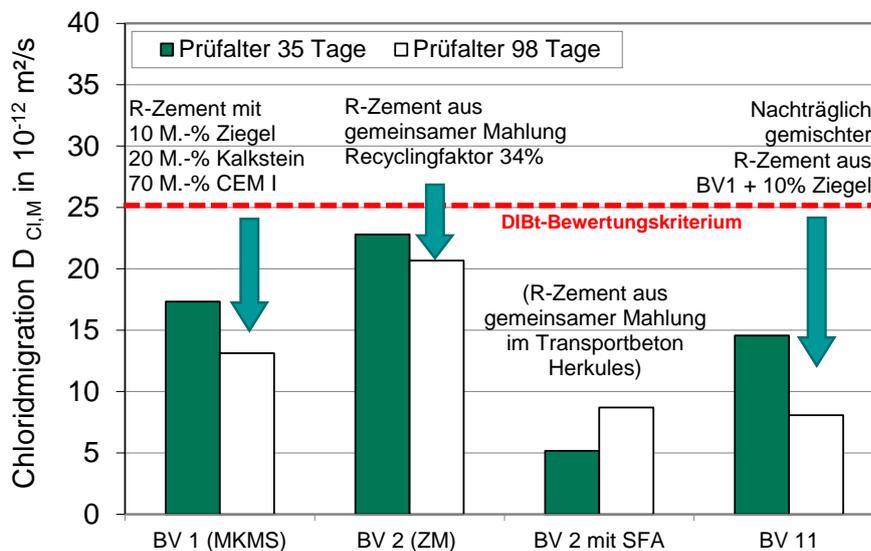


Bild 94 Chloridmigrationskoeffizienten der Betone B2 ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$) im Migrationsschnelltest, Prüfalter 35 Tage und 98 Tage, Verwendung von ziegelhaltigen R-Zementen aus den Betriebsversuchen

Die Betone B2 unter Verwendung der ziegelhaltigen R-Zemente wiesen im Prüfalter von 35 Tagen mit ca. 15 bis $23 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ Werte unterhalb des DIBt Beurteilungskriteriums für den Chloridmigrationskoeffizienten auf.

Die BAW-Anforderungen an den Chlorideindringwiderstand für Anwendungen im Wasserbau ($\leq 10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ für die Exposition XS1-2, XD1-2 bzw. mit $\leq 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ für die Exposition XS3 bzw. XD3) wurden von den Betonen nicht eingehalten. Nur der mit Flugasche hergestellte Beton (Herkules) wies mit ca. $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ deutlich geringere Migrationskoeffizienten im Prüfalter von 35 Tagen auf.

16.7 Carbonatisierungswiderstand an Feinbetonen gemäß DIBt-Prüfplan

Das Carbonatisierungsverhalten wurde in Anlehnung an die Zulassungsversuche des DIBt ermittelt. Die Versuche wurden an Feinbetonprismen mit den Abmessungen $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ mit Rheinkies und Rheinsand nach DIN EN 12620 aus Beständen des VDZ der Kornzusammensetzung A8/B8 durchgeführt.

Folgende Mischungszusammensetzung des Feinbetons wurde verwendet:

Zement:	450 g
deionisiertes Wasser:	225 g
Wassermenge w/z:	0,50
Gesteinskörnung:	1350 g

Zur Anwendung kamen die R-Zemente aus den Betriebsversuchen BV1 und BV2. Die Feinbetone wurden sieben Tage bzw. 28 Tage vorgelagert (VL 7d, VL 28d).

In Bezug auf die Druckfestigkeit der Feinbetone im Prüfalalter von sieben Tagen bzw. 28 Tagen (jeweils nach Vorlagerung) wurden die Carbonatisierungstiefen nach 140 Tagen Hauptlagerung (HL) ausgewertet und anhand des DIBt-Bewertungshintergrundes eingeordnet. Die Ergebnisse wurden darüber hinaus mit Projektergebnissen aus [19] verglichen.

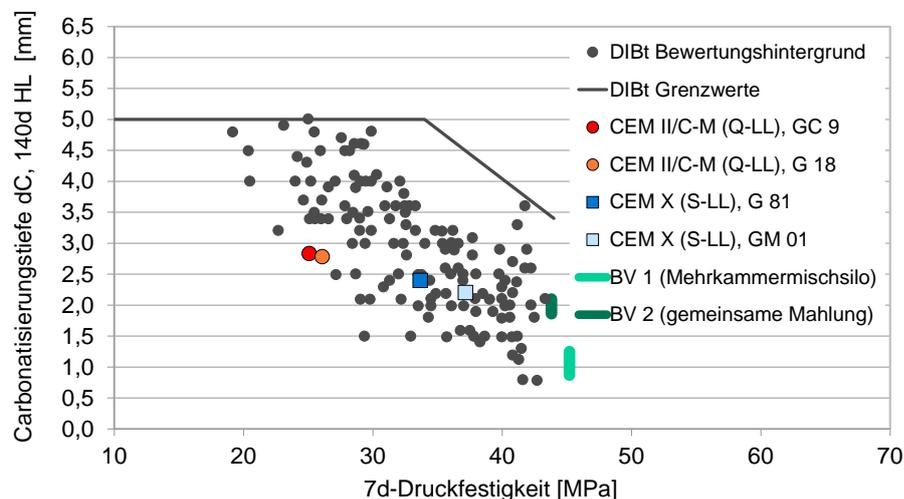


Bild 95 Carbonatisierungstiefe der Feinbetone FB ($w/z = 0,50$, Vorlagerung sieben Tage) nach einer Hauptlagerung von 140 Tagen in Abhängigkeit der Druckfestigkeit der Feinbetone (Prüfalalter nach einer Vorlagerung von sieben Tagen), Verwendung von ziegelhaltigen R-Zementen aus den Betriebsversuchen BV1 und BV2 im Vergleich zu Beispiel-Feinbetonen mit klinkereffizienten Zementen

Aus dem **Bild 95** gehen die Carbonatisierungstiefen der Feinbetone nach einer Vorlagerung von sieben Tagen sowie im Prüfalalter von 140 Tagen bei Hauptlagerung hervor. Alle Feinbetone liegen im Bereich des DIBt-Bewertungshintergrundes. Nach ihrer Vorlagerung (VL7) erreichten die Feinbetone Druckfestigkeiten von 45,2 MPa (BV1) bzw. 43,8 MPa (BV2) und damit vergleichsweise hohe Werte am Rande des Bewertungshintergrundes. Die Carbonatisierungstiefen lagen mit 1,3 mm bzw. 1,9 mm unterhalb der Carbonatisierungstiefen der ziegelhaltigen bzw. hüttensandhaltigen Beispiel-Feinbetone (vgl. CEM II/C-M (Q-LL), CEM X (S-LL)) aus [19].

Die Carbonatisierungstiefen der Feinbetone nach einer Vorlagerung von 28 Tagen sowie im Prüfalalter von 140 Tagen bei Hauptlagerung gehen aus dem **Bild 96** hervor. Die Feinbetone liegen im Bereich des DIBt-Bewertungshintergrundes. Nach ihrer Vorlagerung (VL28) erreichten die Feinbetone Druckfestigkeiten von 56,4 MPa (BV1) bzw. 50,6 MPa (BV2) sowie innerhalb des Bewertungshintergrundes. Die Carbonatisierungstiefen lagen mit 0,4 mm bzw. 1,8 mm erneut unterhalb der Carbonatisierungs-

tiefen der ziegelhaltigen bzw. hüttensandhaltigen Beispiel-Feinbetone (vgl. CEM II/C-M (Q-LL), CEM X (S-LL)) aus [19].

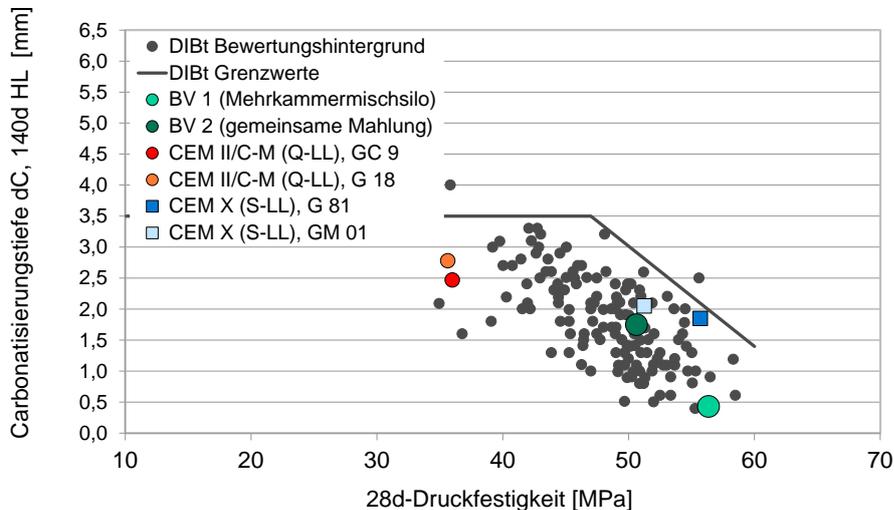


Bild 96 Carbonatisierungstiefe der Feinbetone FB ($w/z = 0,50$, Vorlagerung sieben Tage) nach einer Hauptlagerung von 140 Tagen in Abhängigkeit der Druckfestigkeit der Feinbetone (Prüfalter nach einer Vorlagerung von 28 Tagen), Verwendung von ziegelhaltigen R-Zementen aus den Betriebsversuchen BV1 und BV2 im Vergleich zu Beispiel-Feinbetonen mit klinkereffizienten Zementen

16.8 Umweltverträglichkeitsuntersuchungen am Beton

Die Umweltverträglichkeit der im Projekt untersuchten ziegelhaltigen Recyclingbaustoffe wurden mehrfach nachgewiesen (z. B. gemäß LAGA, DAfStb-Richtlinie, DIN 4226-101 - vgl. z.B. Abschnitte 4 und 11.4). Die in bauaufsichtlichen Zulassungsverfahren für gemischten Bauschutt, Abbruchschutt oder andere mineralische Bauabfälle geforderten Höchstwerte in Feststoffen und Eluatens wurden gemäß DIN 4226-101 sowohl an den im Labor verwendeten RC-Materialien als auch an den im Betriebsversuch eingesetzten RC-Stoffstrom aus den Recyclingwerken eingehalten.

Anmerkung: Gemäß DIBt-Prüfplan wäre unter Verwendung entsprechender R-Zemente keine Auslaugprüfung am Beton erforderlich, wenn die ziegelhaltigen Stoffströme aus den Recyclingwerken die Höchstwerte gemäß DIN 4226-101 einhalten. Zur finalen Absicherung der Projektergebnisse wurde unter Verwendung des großtechnisch hergestellten, ziegelhaltigen Werkzements aus dem Betriebsversuch BV2 (Recyclingfaktor von 34%) eine ergänzende DSLT-Auslaugprüfung an Betonwürfeln durchgeführt. Die Prüfung wurde erfolgreich bestanden.

Die Betonherstellung erfolgte am 18.03.2024. Die Betonzusammensetzung entsprach den Vorgaben der DAfStb-Richtlinie [24] für den Standardbeton für Auslaugprüfungen. Für die Auslaugprüfung wurden drei 100 mm x 100 mm x 100 mm Betonwürfel hergestellt und entsprechend der DAfStb-Richtlinie „Bestimmung der Freisetzung umweltrelevanter Stoffe aus zementgebundenen Baustoffen in der dynamischen Oberflächenauslaugprüfung“ [24] nach dem Entschalen dreifach in eine 0,2 mm starke PE-Folie luftdicht verpackt. Die Lagerung der verpackten Betonwürfel bis zum Beginn der Auslaugprüfung erfolgte im Klimaraum bei 20 °C und 65 % relativer Feuchtigkeit.

Die Auslaugprüfungen der Betonwürfel wurden entsprechend der DIN EN 16637-2 in Verbindung mit der DAfStb-Richtlinie [24] 56 Tage nach der Herstellung am 13.05.2024 gestartet. Unmittelbar vor dem Beginn der Auslaugprüfung wurden die Betonwürfel aus der luftdichten Verpackung entnommen und die Oberfläche der Probekörper rechnerisch bestimmt. Zusätzlich wurde die Masse der

Probekörper erfasst und das für das Eluat-Volumen zu Oberflächenverhältnis von 80 L/m² erforderliche Wasservolumen berechnet. Anschließend wurden die Probekörper so in die Auslaugbehälter aus inertem, lebensmittelechtem Polyethylen gestellt, dass ein Abstand von 20 mm zwischen dem Probekörper und der Behälterwand gegeben war. Unmittelbar danach wurden die Auslaugbehälter mit den rd. 4,8 L Reinstwasser für die Spurenelementanalytik befüllt (L/A-Verhältnis 80 L/m²) und dann die Auslaugbehälter mit einem Schraubdeckel verschlossen. Die verschlossenen Behälter wurden im Klimaraum bei 20 °C und 65 % relativer Feuchte eingelagert. Die Entnahme der Eluate und die Wasserwechsel erfolgten gemäß DIN CEN/TS 16637-2.

Zu den Probenahmezeitpunkten wurden je Probekörper zwei Eluateilproben entnommen, eine Probe für die Bestimmung des pH-Werts, der elektrischen Leitfähigkeit sowie der Anionen und eine Probe für die Spurenelemente. Die Proben für die Spurenelementbestimmungen wurden mit 65 %iger Salpetersäure (Suprapur) im Volumenverhältnis von 50:1 zur Konservierung angesäuert. Die angesäuerten Proben und die Proben für die Bestimmung der Anionen wurden bis zur Analyse bei 4 ± 2 °C im Kühlschrank gelagert. Direkt nach den Probenahmen wurden die Auslaugbehälter vollständig entleert und erneut mit 4,8 L Reinstwasser für die Spurenelementanalytik befüllt. Bei den Wasserwechseln wurde weder nachgespült noch getrocknet.

Die Bestimmung der Spurenelemente und der Anionen in den Eluaten erfolgte mittels der in der DAfStb-Richtlinie [24] angegebenen Verfahren. Dabei wurden für die Bestimmung der Spurenelemente das Verfahren mit induktiv gekoppeltem Plasma – Massenspektrometrie (ICP-MS) bzw. für Quecksilber die Kaltdampf-Atomabsorptionsspektrometrie (CV-AAS) eingesetzt. Zusätzlich zu den in der DAfStb-Richtlinie für Betoneluat angegebenen zu untersuchenden Parametern, wurden an den Eluaten der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit ermittelt. Dabei erfolgten die Messungen des pH-Werts und der elektrischen Leitfähigkeit kurzzeitig nach den Probenahmen.

Tabelle 37 Anforderungswerte und Mittelwerte der kumulierten Freisetzungsmengen nach 64 Tagen in mg/m² sowie in % bezogen auf die Anforderungswerte

Parameter	zulässige Freisetzung [mg/m ²]	Mittelwert [mg/m ²]	Mittelwert bezogen auf den Anforderungswert [%]
Natrium (Na)	---	2841	---
Kalium (K)	---	9064	---
Calcium (Ca)	---	41467	---
Sulfat (SO ₄ ²⁻)	264.500	976	0,37
Chlorid (Cl ⁻)	275.500	447	0,16
Cyanid (CN ⁻)	5,5	<3,20	58,2
Fluorid (F ⁻)	826	<64,0	7,75
Antimon (Sb)	5,5	0,19	3,40
Arsen (As)	11,0	<0,01	0,12
Barium (Ba)	375	55,8	14,9
Blei (Pb)	7,7	0,05	0,68
Bor (B)	816	<8,80	1,08
Cadmium (Cd)	0,6	<0,01	2,29
Chrom (Cr)	7,7	0,56	7,33
Kobalt (Co)	8,8	0,08	0,96
Kupfer (Cu)	15,4	0,37	2,39
Molybdän (Mo)	38,6	0,07	0,17
Nickel (Ni)	15,4	<0,06	0,42
Quecksilber (Hg)	0,2	<0,003	1,54
Selen (Se)	7,7	<0,51	6,65
Thallium (Tl)	0,9	0,01	0,98

Parameter	zulässige Freisetzung [mg/m ²]	Mittelwert [mg/m ²]	Mittelwert bezogen auf den Anforderungswert [%]
Vanadium (V)*	4,4	0,27	6,22
Zink (Zn)	63,9	0,66	1,03

* derzeit ausgesetzter Grenzwert

In **Tabelle 37** sind die Anforderungswerte gemäß MVV-TB Anhang 10 für industrielle Gesteinskörnungen [25], die Mittelwerte der kumulierten Freisetzungsmengen nach 64 Tagen der Spurenelemente der drei Betonprüfkörper in mg/m² sowie in % bezogen auf die Anforderungswerte zusammengestellt.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Anforderungen der MVV-TB Anhang 10 für industrielle Gesteinskörnungen [25] an die Freisetzung von Stoffen aus industriellen Gesteinskörnungen für den geprüften Zement eingehalten wurden. Für die meisten Parameter beträgt die Freisetzung weniger als 10% der zulässigen Freisetzung. Bei acht der 20 Parameter mit einem Anforderungswert liegt die beobachtete Freisetzung sogar unter 1 % des Anforderungswertes.

Anmerkung: Aktuell liegt für die MVV-TB eine neue, sog. Anhörungsfassung 2025 mit zum Teil angehobenen Grenzwerten für die zulässige Freisetzung vor. Die Anhörungsfassung wurde noch nicht veröffentlicht.

Themenschwerpunkt D: Ökobilanzielle und sozioökonomische Betrachtungen, Praxispartner und Transfer, Kommunikation und Veröffentlichungen

17 Ökobilanzielle Betrachtungen: Treibhauspotenziale von labortechnisch und großtechnisch hergestellten R-Zementen (VDZ)

Im Rahmen des BMBF-Projektes „R-Beton – Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation“ wurden umfangreiche Ökobilanzen zur Herstellung von RC-Gesteinskörnungen sowie zur Anwendung in der Zementherstellung (RC-Material als Hauptbestandteil im Zement) und in der Betonherstellung (RC-Material als Gesteinskörnung im Beton) berechnet. Sie sind im R-Beton-Schlussbericht, Teil 3, zusammengefasst und bilden eine Grundlage der ökobilanziellen Betrachtungen im Projekt „R-ZIEMENT“ [3].

Es sollte nunmehr untersucht werden, welche Treibhauspotenziale ziegelhaltige Zementzusammensetzungen erreichen können, wenn gleichzeitig ein möglichst geringer Klinkerfaktor im R-Zement vorliegt. Daher wurden neben den Beispielbilanzen für R-Zemente aus dem Projekt „R-Beton“ auch Beispielbilanzen für neue klinkereffiziente Zemente CEM II/C-M (S-LL) gemäß EN 197-5 herangezogen [19].

Seit dem 10. Juli 2023 liegt eine verifizierte EPD für einen Zement CEM II/C-M (S-LL) mit 50 M% Klinker, 30% Hüttensand und 20% Kalkstein vor. Diese Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804+A2 wurde vom Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) herausgegeben. Deklarationsinhaber ist der Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Deklarationsnummer EPD-VDZ-20230234-IAG1-DE). Grundlage der Berechnungen waren Daten von VDZ-Mitgliedsunternehmen aus dem Jahr 2020.

Basierend auf den in der o.g. EPD vorliegenden Ergebnissen und Erkenntnissen wurden nunmehr die Treibhauspotenziale der in **Tabelle 38** dargestellten ziegelhaltigen Versuchszemente errechnet und gegenübergestellt. Außerdem wurden kalksteinhaltige Vergleichszemente aus dem DBU-Projekt „Granulometrische Optimierung klinkereffizienter Zemente“ [19] ergänzt, die einen Klinkerfaktor von 50% aufwiesen. In die Berechnungen der zu untersuchenden Zementzusammensetzungen gingen Sulfat-träger mit 50 kg/t Zement sowie Stäube, Chromatreduzierer und Mahlhilfen mit 11 kg/t Zement ein. Die Eingangsdaten orientierten sich an Labormischungen, z. B. hinsichtlich der RC-Gehalte im Zement (Recyclingfaktor).

Tabelle 38 Zusammensetzung ziegelhaltiger R-Zemente und des hüttensandhaltigen Basis-Zements zur Berechnung der Treibhauspotenziale, die Eingangsdaten der prozentualen Zementzusammensetzung beziehen sich auf Labormischungen, „Q als Hauptbestandteil“ vgl. DIN 197-1 sowie **Abschnitt 2.3** dieses Berichtes

Zement	Klinker K	Hüttensand S	Kalkstein LL	Anmerkungen Besonderheiten aus der Praxis und für die Praxis
CEM II/C-M (S-LL)	50 M.-%	30 M.-%	20 M.-%	Basis-Zement
Zement	Klinker K	Ziegel z. B. Q	Kalkstein LL	
CEM II/C-M (Q-LL) Beispiel: klinkereffizienter Laborzement	50 M.-% CEM I 52,5 R (SP)	30 M.-% Q (LB)	20 M.-% LL (SP)	kalksteinhaltiger R-Zement mit gesiebttem Ziegelschleifstaub aus der Produktion wärmedämmender Planziegel als Hauptbestandteil, in DIBt-Zulassungsverfahren sind neben dem Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand der Betone (ggf. mit w/z-Wert-Absenkung) auch der Chlorideindringwiderstand und der Carbonatisierungswiderstand nachzuweisen
CEM II/B-M (Q-LL) Beispiel BV 1: im großtechnischen Betriebsversuch hergestellter R-Zement	70 M.-% CEM I 52,5 R (SP)	10 M.-% Q (LB)	20 M.-% LL (SP)	kalksteinhaltiger R-Zement mit gesiebttem Ziegelschleifstaub aus der Produktion wärmedämmender Planziegel als Hauptbestandteil, neben dem Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand der Betone wurden in den zulassungsrelevanten Versuchen (lt. DIBt) auch der Chlorideindringwiderstand und der Carbonatisierungswiderstand nachgewiesen

Zement	Klinker K	Ziegel z. B. Q	Kalkstein LL	
CEM II/B-X Beispiel BV 2: im großtechnischen Betriebsversuch hergestellter R-Zement	70 M.-% K Klinker, Sulfatträger, Nebenbestandteile* (SP)	30 M.-% „X“ ziegelhaltiger Recyclingbrechsand/ RC-Feinstoff* (S+K)	-	gemeinsames Mahlen der R-Zement-Bestandteile Klinker, Sulfatträger und ziegelhaltiges RC-Material in einer Umlaufmahanlage, Mahlgut in „Grenz-zusammensetzung CEM II/B und CEM II/C“ mit bis zu ca. 35 M.-% RC-Anteil (X), der sowohl „Q“ als auch „F“ enthält, neben dem Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand der Betone wurden in den zulassungsrelevanten Versuchen (lt. DIBt) auch der Chlorideindringwiderstand und der Carbonatisierungswiderstand nachgewiesen

*) abweichend zu den Eingangsdaten der Ökobilanzen (vgl. Laborzemente) wurde im Werkzement aus BV2 ein höherer RC-Anteil von 34,4 M.-% (sulfathaltig) ermittelt, woraus sich für diesen Zement ein berechneter Klinkerfaktor von 64% ergab.

Die Ökobilanzierungen wurden anhand der Regeln der Norm EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021 (Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products), in Zusammenhang mit CEN/TR 16970:2016 (Sustainability of construction works - Guidance for the implementation of EN 15804) sowie der Norm EN 16908:2017+A1:2022 - Cement and building lime - Environmental product declarations - Product category rules complementary to EN 15804 durchgeführt. Aus den ökobilanziellen Berechnungen sind folgende Ergebnisse (vgl. **Tabelle 39**) hervorgegangen:

Tabelle 39 Ergebnisse der ökobilanziellen Berechnungen an ziegelhaltigen Versuchszementen

Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	CEM II/C-M (S-LL) Basis-Zement klinkereffizient	CEM II/C-M (Q-LL) klinkereffizient	CEM II/B-M (Q-LL) BV 1 Mischversuche	CEM II/B-X BV 2 Mahlversuche
	Laborzement	Laborzement	Werkzement	Werkzement
GWP total	400 kg CO₂ -Äq/t Zement	348 kg CO₂ -Äq/t Zement	487 kg CO₂ -Äq/t Zement	481 kg CO₂ -Äq/t Zement
GWP fossil ¹⁾	400 kg CO ₂ -Äq/t Zement	348 kg CO ₂ -Äq/t Zement	486 kg CO ₂ -Äq/t Zement	480 kg CO ₂ -Äq/t Zement
GWP biogen ¹⁾	6,52E-1 kg CO ₂ -Äq/t Zement	0,415 kg CO ₂ -Äq/t Zement	0,603 kg CO ₂ -Äq/t Zement	0,642 kg CO ₂ -Äq/t Zement
GWP luluc	3,90E-2 kg CO ₂ -Äq/t Zement	0,0295 kg CO ₂ -Äq/t Zement	0,0372 kg CO ₂ -Äq/t Zement	0,0385 kg CO ₂ -Äq/t Zement

¹⁾ Gem. dem "polluter pays principle" (EN 15804) Nettowerte, die die Emissionen aus der Verbrennung von Abfällen nicht mit einschließen.

R-Zemente mit minimalem Klinkerfaktor (nahe der unteren Grenze eines **CEM II/C-M**):

Das umweltrelevante Projektziel wurde erreicht. Als Treibhauspotenzial des klinkereffizienten Zements mit einem Klinkerfaktor von ca. 50% wurde ein Wert $\leq 400 \text{ kg CO}_2 \text{ -Äq/t Zement}$ (zzgl. Verbrennung von Sekundärbrennstoffen) ermittelt. Damit wiesen die mit 30 M.-% Ziegelschleifstaub und 20 M.-% Kalkstein hergestellten Laborzemente das deutlichste CO₂-Minderungspotenzial auf. Dennoch konnten Zemente dieser Zusammensetzungen die für Zulassungen relevanten Frost- und Frost-Tausalz-Kriterien entsprechender Betone nur nach Absenkung des Wasserzementwertes erreichen (vgl. DBU-Projekt AZ 34647/01 wie o.g.).

R-Zemente mit maximalem Klinkerfaktor (nahe der oberen Grenze **CEM II/C-M**):

Der tatsächliche Klinkerfaktor der beiden ziegelhaltigen Werkzemente aus BV1 und BV2 ist maßgeblich für die Ökobilanz und lag zwischen ca. 64% und ca. 70%. Dementsprechend wurden für diese beiden R-Zemente GWP-Werte $> 400 \text{ kg CO}_2 \text{ -Äq/t Zement}$ ermittelt. Die Werte liegen damit im Bereich üblicher CEM II/B-Zusammensetzungen mit möglichst hohen Gehalten eines weiteren Hauptbestandteils neben Klinker (vgl. Portlandkalksteinzement CEM II/B-LL bzw. Portlandrecyclingmehlzement CEM II/B-F, beispielsweise mit bis zu 35 M.-% inertem Kalkstein bzw. reinem RC-Betonbruch). Die in diesem Projekt großtechnisch hergestellten sowie gemäß DIBt-Prüfplan untersuchten R-Zemente haben sowohl das Würfelfrostprüfverfahren als auch den Chloridmigrationstest sicher bestanden. Eine Absenkung des Wasserzementwertes war nicht erforderlich, um zulassungsrelevante Kriterien zu erfüllen. Für beide Mahlverfahren und beide Zementzusammensetzungen konnte in

Standarduntersuchungen lt. DIBt-Prüfplan die Eignung der Anwendung in relevanten Expositionsklassen uneingeschränkt nachgewiesen werden.

R-Zemente mit mittlerem Klinkerfaktor (ähnlich **CEM II/C-M** mit ca. 60% Klinker):

Wie aus Abschnitt 16 hervorgeht, kann eine deutliche Verringerung des Klinkerfaktors signifikante Veränderungen dauerhaftigkeitsrelevanter Betoneigenschaften hervorrufen. Mit der Herstellung eines Gemisches, das auf Basis des Werkzements BV1 und nachträglich zudosiertem Ziegelschleifstaub (+ 10 M.-% Q) labortechnisch hergestellt wurde, entstand ein Versuchszement mit einem Klinkerfaktor von ca. 60%. Das Treibhauspotenzial eines solchen R-Zements dürfte im Bereich zwischen ca. 410 und 420 kg CO₂-Äq/t Zement liegen (abgeschätzt) und würde somit vergleichbaren hüttensandhaltigen CEM II/C-M (S-LL)-Zementen nahekommen, deren Klinkerfaktor > 50% beträgt. Trotz der nachträglichen Zugabe von Schleifstaub und der daraus folgenden deutlichen Veränderung der Zementzusammensetzung (ausgehend von BV1) wurden in der Betonprüfung wesentliche Bewertungskriterien für den Frostwiderstand, für den Frost-Tausalz-Widerstand und für den Chlorideindringwiderstand sicher eingehalten.

Eine derartige R-Zement-Rezeptur kann eine Verknüpfung relevanter Nachhaltigkeitsziele darstellen, da CO₂-Minderung, Umwelt- und Ressourcenschutz gleichermaßen berücksichtigt werden und gleichzeitig praxisgerechte und dauerhafte Betone ohne w/z-Wert-Absenkung herstellbar sind.

18 Aspekte der Ressourceneffizienz, der Umweltverträglichkeit, der Dauerhaftigkeit und der Nachhaltigkeit im Praxisüberblick

Im Vergleich zur ursprünglichen Vorhabenbeschreibung wurden alle Projektziele, insbesondere die Ziele der Projektpartner im jeweiligen Teilvorhaben erreicht. Die geleisteten Projektarbeiten haben im hohen Maße dazu beigetragen, dass Verwertbarkeit und Anschlussfähigkeit gegeben sind. Grundlegende Aspekte des ursprünglichen Verwertungsplans können somit erfolgreich umgesetzt werden.

Wesentliches technisches Ergebnis ist, dass sich ressourceneffiziente Zemente mit ziegelhaltigen Recyclingbaustoffen sowie verringertem Klinkeranteil herstellen lassen und eine adäquate Leistungsfähigkeit erreichen. Mit Erhöhung des Recyclingfaktors wurde das Treibhauspotenzial der Zemente gesenkt. Entsprechende Betone haben zulassungsrelevante Dauerhaftigkeitseigenschaften nachgewiesen. Der kritische Meilenstein, ziegelhaltige Zemente großtechnisch herzustellen, wurde im Zementwerk mit großem Erfolg umgesetzt. Entsprechende Werkzemente wurden im Transportbeton und in der Fertigung von Betonrohren großtechnisch angewendet. Das Projekt leistet einen Beitrag zu Kreislaufwirtschaft, Ressourcenschonung und Klimaschutz, es schließt Stoffkreisläufe zwischen den Baustoffbranchen Ziegel, Recycling, Zement und Beton (vgl. R-ZiEMENT Forschungsflyer 2023).

Fazit des Projektpartners aus der Recyclingindustrie (S+K): Die Untersuchungsergebnisse belegen, dass Recycling-Stoffströme aus Abbruch- und Bauschutt ein hohes Potenzial für die Bauwirtschaft bieten. Insbesondere die Verwendung von ziegelhaltigen Recyclingbrechsanden als Zementhauptbestandteil eröffnet vielversprechende Perspektiven. Die Einhaltung aller relevanten Umweltstandards bestätigt die Nachhaltigkeit dieser Lösung. Gleichzeitig zeigt die Studie, dass technologische Herausforderungen, wie z.B. die begrenzte Verfügbarkeit von ziegelreichen Monochargen, weitere Optimierungen erfordern. Eine Integration der Ergebnisse in bestehende Normen würde die Nutzung dieser Materialien erleichtern und einen wichtigen Schritt in Richtung Kreislaufwirtschaft im Bauwesen darstellen. Denkbar wäre z.B. eine Erweiterung der Normenreihe EN 197-6 für ein „ziegelhaltiges Recyclingmehl“ aus Recyclingwerken (ziegelhaltiger Mauerwerkbruch/ ziegelhaltiger bzw. ziegelreicher Recyclingbrechsand/ Recyclingfeinstoff). Gemäß Abschnitt 4.2 der DIN CEN/TR 16912 könnten die im Projekt untersuchten, ziegelhaltigen R-Zemente in die Kategorie 2 fallen, da sie festgelegten Zementarten entsprechen, jedoch einen neuen ziegelhaltigen bzw. ziegelreichen Bestandteil (Herkunft Recyclingwerk) aufweisen. Die Aussichten, dauerhaftigkeitsrelevante Prüfungen im Rahmen

einer bauaufsichtlichen Zulassung (DIBt) zu bestehen, sind für diese ziegelhaltigen R-Zemente sehr gut.

Fazit des Projektpartners aus der Ziegelindustrie (LB): Aus den Untersuchungsergebnissen geht hervor, dass reine Ziegelmaterialien, wie Ziegelbruch aus dem Ziegelrecycling, insbesondere der Ziegelschleifstaub aus der Planziegelproduktion puzzolanisch reaktive Eigenschaften aufweisen. Die Homogenität dieses tonmineralischen Stoffstroms basiert auf konstanten Produktionsbedingungen, die die mechanische und thermische Aufbereitung natürlicher Tone in den Ziegelwerken (einschließlich Tongewinnung) umfasst. Aufgrund der hohen Feinheit von Ziegelschleifstaub, aber auch aufgrund seiner charakteristischen chemisch-mineralogischen Zusammensetzung konnte seine Eignung als Zementhauptbestandteil nachgewiesen werden. Anforderungen, die lt. Zementnorm EN 197-1 an natürliche getemperte Puzzolane bzw. calcinierte Tone gestellt werden, wurden sicher erfüllt. Auch während der Laufzeit eingeführte, neue Nachweise für puzzolanische Eigenschaften, wie die Hydratationswärme nach ASTM C1897-20, wurden sicher erbracht. Die Herstellung und Anwendung eines Zements mit Ziegelschleifstaub als Haupt- oder Nebenbestandteil würde eine einzigartige, zirkuläre Verwertungstechnologie darstellen. Die Aussichten, dauerhaftkeitsrelevante Prüfungen im Rahmen einer bauaufsichtlichen Zulassung (DIBt) zu bestehen, sind sehr gut. Der künftigen Anwendung von Ziegelschleifstaub im Zement könnten dennoch Hemmnisse entgegenstehen, die z.B. die Konformitätsbewertung von Zementen betreffen.

Die folgende Übersicht (**Bild 97**) stellt die Merkmale möglicher Stoffströme aus den Recyclingwerken (links) und aus den Ziegelwerken (rechts) dar.



Bild 97 Stoffströme aus den Recyclingwerken (links) und aus den Ziegelwerken (rechts), Verwertungspotenziale als Hauptbestandteil im Zement

Mit Blick auf die gesamte Wertschöpfung ziegelhaltiger Baustoffe fasst **Tabelle 40** praxis- und zulassungsrelevante Aspekte zusammen, die von der Herkunft der RC-Stoffströme bis zu ihrer Anwendung in dauerhaften Betonen reichen. (Wurden im Projekt spezifische Kriterien aus Richtlinien, Normen oder Zulassungen nachgewiesen, so wurde das Textfeld farblich gekennzeichnet.)

Tabelle 40 Aspekte der Ressourceneffizienz, der Nachhaltigkeit, der Umweltverträglichkeit und der Dauerhaftigkeit – Beispiele aus Projekt R-ZIEMENT im Überblick

	Werkzement BV 1	Laborzement BV 11	Laborzemente (Beispiele)	Werkzement BV 2	Laborzemente (Beispiele)
Herkunft der ziegelhaltigen Recyclingmaterialien (Ressourcen)	Ziegelwerke: Schleifstaub aus der Planziegelherstellung	Ziegelwerke: Schleifstaub aus der Planziegelherstellung	Ziegelwerke: aus dem Ziegelrecycling	Recyclingwerke: ziegelhaltige Recyclingbrechsande (nach Sortierung)	Recyclingwerke: ziegelhaltige Recyclingbrechsande, z.T. aus Monochargen
Herkunft weiterer Ressourcen	Zementwerke: Kalkstein, CEM I	Zementwerke: Werkzement aus BV1	Zementwerke: Kalkstein, CEM I	Zementwerke: Klinker, Sulfatträger	Zementwerke: CEM I
Recyclingfaktor	10%	20%	10% bis 30%	ca. 30-35%	30%
Klinkerfaktor	ca. 70%	ca. 60%	ca. 70-50%	ca. 60-65%	ca. 70%
Zementzusammensetzung	in Anlehnung an CEM II/B-M	in Anlehnung an CEM II/C-M	in Anlehnung an CEM II/B bzw. CEM II/C-M	in Anlehnung an CEM II/B	in Anlehnung an CEM II/B
Zementmahlung, Aufbereitung der Ausgangsstoffe	getrenntes Aufbereiten und anschließendes Mischen	getrenntes Aufbereiten und anschließendes Mischen	getrenntes Mahlen und anschließendes Mischen	gemeinsame Mahlung	getrenntes Mahlen und anschließendes Mischen
Treibhauspotenzial	487 kg CO₂-Äq/t Zement	ca. 410 - 420 kg CO₂-Äq/t Zement	348 kg CO₂-Äq/t Zement (als CEM II/C-M (Q-LL))	ca. 481 kg CO₂-Äq/t Zement	n. b.
Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit	LAGA nicht relevant	LAGA nicht relevant	LAGA nicht relevant	LAGA Bauschutt eingehalten	LAGA Bauschutt eingehalten
(UVU an Materialien aus Recyclingwerken sowie ergänzend an einem Beton, vgl. 16.8)	DafStb n. b.	DafStb n. b.	DafStb-Richtlinie* eingehalten	DafStb-Richtlinie* eingehalten	DafStb-Richtlinie* eingehalten
	DIN 4226-101 nicht relevant	DIN 4226-101 nicht relevant	DIN 4226-101 nicht relevant	DIN 4226-101 eingehalten	DIN 4226-101 eingehalten
	Betonversuch nicht relevant	Betonversuch nicht relevant	Betonversuch nicht relevant	DSL-T-Auslaugprüfung bestanden	n. b.
Puzzolanische Reaktivität gemäß EN 197-1 (vgl. Hauptbestandteil Q)	Ziegel mit ≥ 25 M.-% reaktivem SiO ₂ BV1: 28,3 M.-%	Ziegel mit ≥ 25 M.-% reaktivem SiO ₂	Ziegel mit ≥ 25 M.-% reaktivem SiO ₂	ziegelhaltiges RC-Material mit ca. 10 bis 20 M.-% reaktivem SiO ₂ BV2: 10,6 M.-%	Monochargen mit bis zu 25 M.-% reaktivem SiO ₂ möglich
Puzzolanische Reaktivität gemäß ASTM C1897-20 (vgl. Hauptbestandteil Q)	Ziegel, Hydratationswärme im Prüfalter von 7 Tagen BV1: 188 J/g	Ziegel, Hydratationswärme nach 7d i.d.R. ca. 100 - 250 J/g	Ziegel; Hydratationswärme nach 7d i.d.R. ca. 100 - 250 J/g	ziegelhaltiges RC-Material, Hydratationswärme im Prüfalter von 7 Tagen BV2: 55 J/g	Monochargen mit bis zu ca. 125 J/g Hydratationswärme nach 7d möglich, i.d.R. < 100 J/g
Frostwiderstand des Betons: Würfelfverfahren*** (ggf. Absenkung des w/z-Wertes)	Prüfung bestanden	Prüfung bestanden	Prüfung mit Klinkerfaktor ca. 70% bestanden	Prüfung bestanden	Prüfung bestanden
	nicht relevant	nicht relevant	Prüfung mit Klinkerfaktor ca. 50% nach w/z-Absenkung bestanden**	nicht relevant	nicht relevant
Frost-Tausalz-Widerstand des LP-Betons: CDF-Test*** (ggf. Absenkung des w/z-Wertes)	Prüfung bestanden	Prüfung bestanden	Prüfung mit Klinkerfaktor ca. 70% bestanden**	Prüfung bestanden	Prüfung bestanden**
	nicht relevant	nicht relevant	Prüfung mit Klinkerfaktor ca. 50% nach w/z-Absenkung bestanden**	nicht relevant	nicht relevant
Chlorideindringwiderstand des Betons: Migrationsschnelltest***	Prüfung bestanden	Prüfung bestanden	Prüfung bestanden**	Prüfung bestanden	Prüfung bestanden**

	Werkzement BV 1	Laborzement BV 11	Laborzemente (Beispiele)	Werkzement BV 2	Laborzemente (Beispiele)
Carbonatisierungswiderstand am Feinbeton***	Prüfung bestanden	Prüfung bestanden	Prüfung bestanden**	Prüfung bestanden	Prüfung bestanden**

n. b.: nicht bestimmt, **) vgl. Abschnitte 16.1 und 16.2 mit Forschungsergebnissen von dritter Seite;

*) Die DAfStb-Richtlinie wurde übergangsweise, insbesondere zu Beginn der Projektes angewendet, um UVU an ziegelhaltigen Recyclingmaterialien durchzuführen (vgl. Abschnitt 2.5 des Berichtes).

***) gemäß DIBt-Prüfplan inkl. zulassungsrelevanter Bewertungskriterien

19 Sozioökonomische und sozioökologische Betrachtungen

Das Projekt R-ZIEMENT ist in breiten, gesellschaftlich relevanten Themenfeldern platziert. So haben beispielsweise die Klimakrise und die Energiekrise nicht nur erhebliche Auswirkungen auf die Herstellung und Anwendung von Baustoffen, sondern auch auf die Menschen, ihre Umwelt, ihre Arbeitsplätze, ihre Lebensbedingungen. Gleichzeitig erreichen gekoppelte Themen wie natürlicher Umwelt- und Ressourcenschutz zunehmende Bedeutung in Bezug auf nachhaltige, klimaschonende Materialien und ihre Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit sowie auf die Lebensräume von Menschen, Tieren und Pflanzen. Themen wie z. B. Abfallvermeidung, Verwertung sekundärer Ressourcen, CO₂-Fußabdruck und Kreislaufführung haben in Klimaschutz-, Kreislaufwirtschafts-, Urban-Mining- oder Biodiversitätsstrategien Einzug gehalten.

Die wissenschaftliche, faktenbasierte Kommunikation über die transdisziplinär verknüpften Aspekte der anstehenden Transformation an die Breite der Gesellschaft wird über den Projektzeitraum hinaus eine Aufgabe aller beteiligten Akteure aus Klima- und Umweltschutz, aus Ressourcen- und Energieeffizienz, aus Nachhaltigkeit und Wirtschaft, aus Bildung und Arbeit sowie aus Forschung und Wissenschaft bleiben. Die Politik kann in der Kommunikationskultur eine entscheidende, wegweisende Rolle übernehmen. Wenn es gelingt, die Menschen so einzubeziehen, dass komplexe Zusammenhänge auch fachfremden Personen zugänglich und verständlich gemacht werden können, ergeben sich daraus Denkanstöße, und die Gesellschaft kommt ins Handeln. Dabei rücken die Anpassung an die Folgen des Klimawandels sowie die notwendigen gesellschaftlichen und administrativen Konsequenzen weiter in den Fokus. Die Lösung der großen gesellschaftlichen Aufgaben bedarf großer gesellschaftlicher Beteiligung in möglichst gemeinsame Richtungen, z. B. bei Entscheidungen für nachhaltige Konsumprodukte, bei Ausschreibungen von ressourcenschonenden Baustoffen und Bauweisen, bei Mülltrennung und Verwertung von Wertstoffen aus Haushalten und Industrie, bei selektivem Rückbau oder Deponierung, bei der Entsiegelung oder Renaturierung, bei Entscheidungen für nachhaltige Lieferketten oder regionale Produkte mit kurzen Transportwegen. Eine geeignete Weichenstellung auf politischer Seite wäre ratsam, um den Transformationsprozess in der Industrie zu unterstützen. Ein konstruktiver gesellschaftspolitischer Diskurs wird essenzielle Voraussetzung einer nachhaltigen Transformation bleiben.

In der Projektlaufzeit war - neben der Coronapandemie und zahlreichen Extremwetterereignissen infolge des Klimawandels - der Krieg in der Ukraine ein Ereignis mit anhaltenden Folgen für die deutsche und europäische Gesellschaft. Die sich daraus ergebenden Krisen im deutschen Energie- und Wirtschaftssektor, aber auch in der Europa- und Weltpolitik, haben unter anderem die Lage auf den zunehmend angespannten Wohnungsmarkt, vor allem in deutschen (Groß-)Städten, weiter deutlich verschärft. Außerdem haben die weltweiten Fluchtbewegungen, vor allem die Ursachen der Fluchtbewegungen, die gesellschaftspolitischen Probleme der letzten Jahre in Deutschland und in Europa zunehmend verstärkt. Die Situation des deutschen Arbeitsmarktes hat sich zugespitzt. Neben dem Fachkräftemangel und unbesetzten Stellen einerseits, drohen andererseits Personalabbau und Werkschließungen in Schlüsselbranchen der deutschen Wirtschaft. Das Wirtschaftswachstum nahm ab und in Deutschland entstand Rezession.

Das Bauen und die Baustoffe wurden teurer, Bauzinsen erhöhten sich, Bauaktivitäten nahmen gravierend ab, Baustoffwerke haben die Produktion eingestellt. Energiepreise, Lieferengpässe und Trans-

portkosten schlugen zu Buche. Auf der anderen Seite ist die Nachfrage nach nachhaltigen Baustoffen aus dem Recycling noch nicht signifikant gestiegen. Wichtiges Argument scheint hier noch immer der Preis zu sein, insbesondere im Vergleich mit primären Ausgangsstoffen und Baustoffen. Zielgruppen-Kommunikation kann helfen, werterhaltend, zirkulär zu denken, kurzlebige Produkte und entsprechende Abfälle zu vermeiden sowie die Inanspruchnahme von Deponieflächen mittelfristig zu begrenzen. Ein Zugang zu Informationen und zu aufbereitetem Wissen kann Kaufentscheidungen auf unabhängiger, sachlicher Ebene unterstützen.

Die sog. „Ressourcen-Themen“, wie z. B. ein verantwortungsbewusster oder ressourcenschonender Umgang mit unseren Rohstoffen, Materialien, Bodenschätzen und Baustoffen – auch mit RC-Baustoffen – scheinen aktuell noch zu wenig in der Gesellschaft verankert

Aufgabe von Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit innerhalb des Projektes R-ZiEMENT war es daher, interessierten Menschen aus allen Bereichen der Herstellung und Anwendung von Baustoffen, auch außerhalb der eigenen Branchen, die Motive für das Projekt zu schildern. Es war Aufgabe, die technisch-wissenschaftlichen Aspekte aus der Baustoffforschung nachvollziehbar und faktenbasiert zu erläutern, Bedarfe zu wecken, Netzwerke zu generieren und dabei zu unterstützen, ein Ressourcenbewusstsein in allen Schichten der Gesellschaft zu entwickeln. Insofern kann das ganzheitlich angelegte Projekt R-ZiEMENT einen gewissen Anteil an der Lösung gesamtgesellschaftlicher Fragestellungen darstellen.

20 Transfer in die Praxis, Kommunikation und Veröffentlichungen

Die folgende Tabelle fasst Maßnahmen zur Kommunikation des Verbundes sowie Veröffentlichungen der Projektpartner zusammen. Der Transfer wesentlicher Zwischenergebnisse in die Praxis wurde von allen Projektpartnern begleitet und unterstützt. Ein Austausch mit jeweiligen Praxispartnern war jederzeit gegeben. Beispielsweise fand innerhalb der Gremienarbeit (z. B. im VDZ, im IZF) sowie innerhalb der praktischen Arbeiten in den Laboren und in den Produktionsbetrieben ein regelmäßiger Austausch, z. B. mittels R-ZiEMENT-Forschungsflyer, kurzen Ergebnispräsentationen oder LinkedIn-Videos statt. In internen Arbeitsgruppen (Partner) sowie in regelmäßigen Updates des Verbundes wurden basierend auf gemeinsamen Zwischenergebnissen jeweils nächste Schritte festgelegt und kommuniziert.

Tabelle 41 Maßnahmen zur Kommunikation des Verbundes, erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse der Projektpartner bzw. des Verbundes

Art der Maßnahme	Titel / Inhalt der Maßnahme	Wann?	Wo?	Wer?
Verbundtreffen R-ZiEMENT inkl. Werksbesichtigung bei Spenner	Aktueller Stand der Laborversuche und Forschungsergebnisse (inkl. Forschungsergebnisse von dritter Seite), Vorbereitung des zweiten Zwischenberichtes, Meilensteinbetrachtung (erster und zweiter Meilenstein)	7./8. Februar 2023	Erwitte	alle Partner und Unterauftragnehmer
Verbundtreffen R-ZiEMENT inkl. Werksbesichtigung bei Scherer & Kohl GmbH	Schwerpunktthema: Organisation und Vorbereitung der Betriebsversuche mit den Praxispartnern (auf Basis bisheriger Forschungsergebnisse) Meilensteinbetrachtung (kritischer Meilenstein)	27./28. September 2023	Ludwigs-hafen	alle Partner und Unterauftragnehmer
LinkedIn-Post zur ersten halbtechnischen Schleifstaubsiebung	https://www.linkedin.com/posts/vdz-ver-ein-deutscher-zementwerke-e-v-sieb-versuch-im-vdz-m%C3%BChlentechnikum-activity-7112346198434291712-	September 2023	online	VDZ

Art der Maßnahme	Titel / Inhalt der Maßnahme	Wann?	Wo?	Wer?
	W7NI?utm_source=share&utm_medium=member_desktop			
BAU – Weltleitmesse für Architektur, Materialien, Systeme Messestände des Informationszentrums Beton (IZB) und LB	Präsentation ressourcenschonender Ausgangsstoffe und Baustoffe (Setzkasten) inkl. Premiere R-ZIEMENT-Forschungsflyer https://www.linkedin.com/posts/vdz-ver-ein-deutscher-zementwerke-e-v_klimaschutz-ressourcenschonung-kreislaufwirtschaft-activity-7054473157256056833-v7p9?utm_source=share&utm_medium=member_desktop	17. bis 22. April 2023	München, online	Herr Mohr (VDZ, IZB) Herr Dr. Heigl (LB)
ReMin-Clusterworkshop	Störstoffe, Kontaminationen und Grenzwerte – die Bottlenecks der Einsetzbarkeit von RC-Materialien im Baustoffbereich, Präsentation R-ZIEMENT-Forschungsflyer	25. April 2023	Alzenau	Herr Kreßler (S+K)
ReMin-Statuskonferenz, Flyer, Poster und Vortrag	Vorstellung des Projektes und erster Forschungsergebnisse, anschließender LinkedIn-Post https://www.linkedin.com/posts/vdz-ver-ein-deutscher-zementwerke-e-v_kreislaufwirtschaft-bauen-zement-activity-7080075740955717632-lebc?utm_source=share&utm_medium=member_desktop	20./21. Juni 2023	Clausthal-Zellerfeld	Frau Gross (S+K) Herr Winkel (IZF) Frau Severins (VDZ)
60. Würzburger Ziegellehrgang, Vortrag	Verwendung von ziegelreichen Brechsand in Portlandpuzzolanementen	5.-7. Dezember 2023	Würzburg	Herr Winkel (IZF)
V. International Conference Progress of Recycling in the Built Environment, Vortrag	Characterization of pozzolanic activity of masonry rubble by spectrophotometry	10.-12. Oktober 2023	Weimar	Herr Winkel (IZF)
IZF-Seminar, Vortrag	Verwendung von ziegelreichen Brechsand in Portlandpuzzolanementen	19.-20. September 2023	Essen	Herr Winkel (IZF)
Fachkonferenz „RE.THINK BUILDING 2023“, Vortrag	Stoffkreisläufe in der Ziegelindustrie	30. Juni 2023	Schwetzingen	Herr Dr. Heigl (LB)
Fachzeitschrift „Baufachzeitung“	Keramische Lösungen für nachhaltige Neubauten	Dezember 2023	https://baufachzeitung.com/leipfinger-bader/2023/112221/	Herr Dr. Heigl (LB)
Spenner interne Zeitschrift	„Spenner Inside“ stellt das Projekt R-ZIEMENT und den Forschungsflyer vor	Sommer 2023	Erwitte, Berlin	Herr Dr. Butters, Herr Franzke (SP)

Art der Maßnahme	Titel / Inhalt der Maßnahme	Wann?	Wo?	Wer?
21. IBAUSIL Internationale Bau- stofftagung, Flyer, Poster und Erwäh- nung in zwei Vorträ- gen	Granulometrische Einflüsse klinkereffi- zienter Zemente auf den Frost- und Frost-Tausalzwiderstand von Beton Sutracrete – Effiziente Verwertungs- technologien für puzzolanische Res- sourcen in mikrostrukturbasierten Be- tonbauteilen mit Materialpass	13.-15. September 2023	Weimar	Frau Severins (VDZ) Herr Dr. Müller (VDZ)
2024				
Kolloquium "Nach- haltig effizient – Ressourcen des zu- künftigen Bauens"	Herstellung und Anwendung klinkereffi- zienter R-Zemente (Fachvortrag bei der BAM)	18. Januar 2024	Berlin	Frau Severins (VDZ)
Fachkonferenz Bay- erische Kreislauf- wirtschafts- und Ressourceneffi- zienztage (KReTa) 2024	Fachvortrag „Kreislaufführung von Roh- stoffen in der Baubranche“ – u. a. Ver- weis auf Projekt R-ZIEMENT (Industrie- und Handelskammer (IHK) für München und Oberbayern)	7.-8. Februar 2024	München	Herr Dr. Heigl (LB)
„Großtechnische Herstellung unseres nachhaltigen R-Zements“ Betriebsversuch BV2 bei LinkedIn	https://www.linkedin.com/posts/vdz-ver- ein-deutscher-zementwerke-e-v_vdz- research-zement-recyclingbaustoff-acti- vity-7163487533497073664- olSA/?utm_source=share&utm me- dium=member_desktop	März 2024	Erwitte	Spenner VDZ
41. Sitzung des VDZ-Arbeitskreises „Leistungsfähigkeit von Zementbe- standteilen“	Herstellung und Anwendung klinkereffi- zienter R-Zemente (online, Präsentation)	9. März 2024	Düssel- dorf	Frau Severins (VDZ)
ReMin-Abschluss- konferenz, Flyer, Poster und Vortrag	Vorstellung des Projektes und der fina- len Forschungsergebnisse, anschlie- ßend: LinkedIn-Post und Veröffentli- chungen auf der VDZ-Webseite https://www.linkedin.com/feed/up- date/urn:li:acti- vity:7208403174188036096?commen- tUrn=urn%3Ali%3Acomment%3A%28activity %3A7208403174188036096%2C721353210 8936331264%29&dashCommen- tUrn=urn%3Ali%3Afsd_com- ment%3A%287213532108936331264%2Cu rn%3Ali%3Aacti- vity%3A7208403174188036096%29 und https://vdz.info/rziement	18.-20. Juni 2024	Goslar	Frau Gross (S+K) Herr Walter (LB) Herr Winkel (IZF) Frau Severins (VDZ)
Zeitschrift „TB Info“	Ziegelhaltige Recyclingbaustoffe für ressourceneffiziente Zemente (Baustoff R-ZiEMENT) https://www.linkedin.com/posts/bundes- verband-transportbeton_3ddruck-beton- kanu-vdzresearch-activity- 7241334729004716032- F8t6?utm_source=share&utm me- dium=member_desktop	September 2024	Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie	
„VDZ Mitteilungen“ sowie Zeitschrift „beton“	Zemente mit ziegelhaltigen Recycling- baustoffen im Praxistest https://vdz.info/rziement	November 2024	Fachzeitschrift für Bau und Technik	

Art der Maßnahme	Titel / Inhalt der Maßnahme	Wann?	Wo?	Wer?
VDZ Arbeitsausschuss Betontechnik (132. Sitzung)	Ziegelhaltige Recyclingbaustoffe als Rohstoff für ressourceneffiziente Zemente in dauerhaften Betonen	November 2024	online Präsentation	Frau Severins (VDZ)
geplant: Im Rahmen der Umstrukturierung der Homepage 2025 soll auch das Projekt R-ZiEMENT mit seinen Ergebnisse vorgestellt werden.			Webseite Leipfinger-Bader	
Zeitschrift „beton“	geplant: „Betontechnischer Bericht“	Mai 2025	Fachzeitschrift für Bau und Technik	

21 Verwendung der Zuwendung, Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten sowie voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der Umfang der durchgeführten labortechnischen, großtechnischen, organisatorischen und wissenschaftlichen Arbeiten, das vollständige Erreichen der interdisziplinären Projektziele, auch in den Teilprojekten unterschiedlicher Branchen, sowie die abschließenden Ergebnisse (z. B. aus den Betriebsversuchen) haben im Vergleich zur ursprünglichen Vorhabenbeschreibung ein deutlich höheres Niveau erreicht. Die ursprüngliche Vorhabenbeschreibung wurde über die Projektlaufzeit mehrfach an aktuelle Randbedingungen (z. B. in Richtlinien, Zulassungen oder Normen) angepasst. Wurden besonders wertvolle Erkenntnisse gewonnen, sind entsprechende Zwischenergebnisse sofort in die weitere Planung der Versuche einbezogen worden. Bei notwendigen Abweichungen von der Vorhabenbeschreibung wurde der PTJ involviert.

Die im Verbundprojekt "R-ZiEMENT" geleisteten Arbeiten entsprachen in vollem Umfang der beantragten und bewilligten Arbeit und waren daher notwendig und angemessen.

Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit war wesentlicher Bestandteil der Ergebnisverwertung aller Partner. Über die gesamte Projektlaufzeit sowie nach Abschluss des Projektes wurden unterschiedliche Maßnahmen durchgeführt, die beispielsweise im Abschnitt 20 dargestellt sind.

In der Ziegelforschung (IZF) konnte gezeigt werden, dass durch die farbliche Unterscheidung zwischen Ziegeln und sonstigen Baustoffen ein ziegelreicher Stoffstrom erzeugt werden kann. Die schnelle Beurteilung der puzzolanischen Aktivität dieses Stoffstroms durch Messung von Farbe und chemischer Zusammensetzung schon im Recyclingwerk ermöglicht die Herstellung von Stoffströmen für Zementwerke mit gesicherter Qualität. Für die Recyclingwerke erschließt sich so ein neuer Markt und für die Zementwerke eine neue Rohstoffquelle. Profitieren würden von der Entwicklung auch die Hersteller von Sortieranlagen, die für die industrielle Umsetzung des Verfahrens verantwortlich sind.

In den Ziegelwerken (LB) wurden Konzepte zur Erweiterung des Einsatzbereichs für Ziegelbruch und Schleifstaub entwickelt, die über die aktuelle kommerzielle Nutzung (z.B. Verfüllen, Tennisplätze) hinausgehen. Diese Möglichkeiten schaffen hochwertige Alternativen zu konventionellem Zuschlagstoff und können von der Zementindustrie genutzt werden, um sich unabhängiger von Flugasche aufstellen zu können. Dies kann sehr kurzfristig nach Projektende (1-2 Jahre) zu einem neuen Absatzmarkt der Schleifstäube/Ziegelbruch führen.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass eine gezielte Aufbereitung/Produktion von Ziegelstäuben mit puzzolanischen Eigenschaften möglich ist. Normative Anforderungen können sicher erfüllt werden. Hier können sich langfristig auch neue Absatzmärkte in der Zement- und Betonindustrie auf tun (< 3 Jahre).

Die Erkenntnisse aus dem Teilvorhaben der Recyclingwerke (S+K) werden genutzt, um die internen Recyclingprozesse weiter zu optimieren und den Einsatz von Sekundärrohstoffen in der Baustoffindustrie weiter auszubauen. Dabei ist insbesondere die Kooperation mit Zementherstellern zu suchen, um den Markteintritt für ziegelhaltige RC-Materialien zu realisieren. Langfristig wird eine automatisierte Herstellungsprozedur angestrebt, um eine breite industrielle Anwendung zu ermöglichen. Die Projektergebnisse zeigen, dass sowohl ziegelreiche (Monochargen) als auch ziegelarme (Regelproduktion)

Recyclingbaustoffe für die Anwendung als Zementhauptbestandteil geeignet sein können. Mit den Normeigenschaften der R-Zemente und den Dauerhaftigkeitseigenschaften entsprechender Betone konnten zulassungsrelevante Nachweise erbracht werden, auch hinsichtlich der Umweltverträglichkeit.

In der Zementforschung (VDZ) und im Zementwerk (SP) wurden ziegelhaltige R-Zemente mit unterschiedlichen Zusammensetzungen, teilweise in Kombination mit Kalkstein, hergestellt und untersucht. Neben der labortechnischen Aufbereitung konnten zwei Verfahren der großtechnischen Zementherstellung erfolgreich umgesetzt werden. Die aus den Ziegel- und Recyclingwerken stammenden RC-Materialien eigneten sich sowohl für eine gemeinsame Mahlung eines R-Zements, als auch für eine getrennte Aufbereitung mit anschließendem Mischen der mehlfinen Zementbestandteile. Der Nachweis der Anwendbarkeit der beiden Verfahren in der betrieblichen Praxis zeigt auf, welche Voraussetzungen für künftige Lieferungen aufbereiteter, ziegelhaltiger RC-Materialien einerseits und für die kontinuierliche Herstellung von R-Zementen auf Zementmahanlagen oder Zementmischern andererseits erfüllt sein müssen. Neben den betriebstechnischen Voraussetzungen sind materialtechnische und umweltrelevante Fragen zu klären, die die stoffliche und granulometrische Zementzusammensetzung betreffen. Die zahlreichen Untersuchungsergebnisse an Zementen und Betonen bilden eine solide Grundlage, neue ziegelhaltige R-Zemente mit immer geringeren Klinkeranteilen gezielt zu optimieren. Die Ergebnisse können genutzt werden, um leistungsstarke R-Zemente mit zulassungsfähigen Eigenschaften auch unter Verwendung deutlich unterschiedlicher Ausgangsstoffe und Aufbereitungsverfahren herzustellen. Auf Grundlage der Ergebnisse lassen sich Zulassungsprüfungen effizient vorbereiten. Auch in künftigen Normungsverfahren für ziegelhaltige Hauptbestandteile (Recyclingmehle) oder ziegelhaltige Zemente lassen sich die systematischen Ergebnisse und Erkenntnisse aus dem Projekt R-ZiEMENT einbringen. Für die Transformation der Zementindustrie ist eine konsequente Klima- und Ressourceneffizienz erforderlich – hier kann die Verwertung der Projektergebnisse einen Beitrag leisten.

Der Verwertungsplan aus der ursprünglichen Vorhabenbeschreibung wurde regelmäßig überprüft. Er bildete während der gesamten Projektlaufzeit Leitlinien einer ambitionierten Zielvorgabe sowie eine Basis für neue, branchenübergreifende Forschungsfragen, die den drängenden Themen einer „Ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft“ (ReMin) weiter folgen.

Aus dem Verbund R-ZiEMENT ist in der Schlussphase der Projektarbeiten ein neuer Verbund entstanden. Die Ziegelwerke (LB), die Recyclingwerke (S+K) und die Forschungsinstitute IZF und VDZ werden erneut Verbundpartner. Die Idee, aus mineralischen Bauabfällen hochwertige Recyclingprodukte zu generieren, soll im Verbund „SekulaRES“ weiterentwickelt werden. Im Herbst 2024 wurde beim PTJ eine entsprechende Urban-Mining-Antragsskizze eingereicht und positiv bewertet. Beide Projekte stehen für Forschung für Nachhaltigkeit (FONA, Förderung durch das BMBF). Damit werden die Ergebnisse aus R-ZiEMENT auf hohem wissenschaftlichen, technischen und wirtschaftlichen Niveau konsequent verwertet.

22 Zusammenfassung

Im Projekt „R-ZIEMENT“ wurden „Ziegelhaltige Recyclingbaustoffe als Rohstoff für ressourceneffiziente Zemente in dauerhaften Betonen“ erforscht. Das Projekt (FKZ 033R263 A-E) wurde im Rahmen der „Forschung für Nachhaltigkeit“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

„R-ZIEMENT“ steht als Akronym für ein branchenübergreifendes Verbundprojekt. Die Verbundpartner aus der Zement-, Ziegel- und Betonforschung (VDZ Technology gGmbH, Institut für Ziegelforschung Essen e. V.) arbeiteten interdisziplinär mit den Partnern aus der Ziegelindustrie (Leipfinger-Bader GmbH), aus der Recyclingindustrie (Scherer & Kohl GmbH) und aus der Zementindustrie (Spenner GmbH & Co. KG) zusammen. Der vorliegende Bericht beschreibt die Arbeiten und die Ergebnisse des Verbundes insgesamt sowie in den fünf Teilprojekten.

Gesamtziel des Projektes war es, Verwertungsmöglichkeiten ziegelhaltiger Materialien aus dem Recycling (RC) mineralischer Bauabfälle, Bauschutt und Baustellenrückläufer sowie von Produktionsausschuss und Schleifstäuben aus der Ziegelproduktion zu untersuchen. Die technischen Möglichkeiten der Herstellung ressourcen- und klinkereffizienter Zemente zur weiteren Reduzierung prozessbedingter CO₂-Emissionen in der Zementherstellung sollten festgestellt werden. Die Versuchszemente mit gemahlenden, ziegelhaltigen RC-Baustoffen oder mit mehlfinen Ziegelmaterialien wurden im Projekt als „R-Zemente“ bezeichnet. Die Leistungsfähigkeit der R-Zemente sowie die Dauerhaftigkeit der unter Verwendung dieser Zemente hergestellten Betone sollten den derzeit relevanten Beurteilungskriterien in Zulassungsprüfungen entsprechen.

Die Projektidee für „R-ZIEMENT“ basierte auf Ergebnissen aus dem BMBF-Projekt „R-Beton“ (FKZ 13N13125). Es wurden R-Zemente mit 10 M.-% bzw. 30 M.-% gemahlenem RC-Material unterschiedlicher Herkunft hergestellt und bis in den Beton untersucht. Unter Verwendung eines ziegelhaltigen Recyclingmaterials (vormals Mauerwerksbruch 0/4 mm) wurde seinerzeit erstmalig ein R-Zement hergestellt, der wesentliche, zulassungsrelevante Prüfungen bestanden hatte.

Im Folgeprojekt „R-ZIEMENT“ wurden zunächst die nutzbaren RC-Stoffströme der Ziegelwerke und der Recyclingwerke charakterisiert:

In den Ziegelwerken entstehen neben dem Primärprodukt „Ziegelstein“ der Stoffstrom Ziegelschleifstaub (aus der Planziegelproduktion) und der Stoffstrom Produktionsausschuss. Ein weiterer relevanter Ziegelstoffstrom stammt aus dem sortierten Baustellenrücklauf bzw. aus der werkseigenen Ziegelaufbereitungsanlage. Entsprechend ihres Werkstandorts oder ihres Tonvorkommens sind in diesen Stoffströmen vergleichbare Ziegelarten zu finden.

In den Recyclingwerken bilden mineralische Abbruch- und Bauschuttmaterialien relevante ziegelhaltige Stoffströme. Bei Zerkleinerung des Bauschutts fallen ziegelhaltige RC-Baustoffe (Recyclingsande, Recyclingfeinstoffe) der Körnung 0/4 mm an. Die Ziegelanteile und die Ziegelarten im Bauschutt können – je nach Herkunft - in weiten Grenzen variieren. Deshalb wurden neben der Bauschuttanlieferung im „Regelbetrieb“ auch gezielt aus ziegelhaltigen und ziegelreichen Bauschuttanlieferungen sog. Monochargen separiert und aufbereitet.

Die Ziegel- und Recyclingstoffströme wurden in mehrmonatigen Kampagnen umfassend beprobt. An allen Proben aus den Recyclingwerken wurden regelmäßige Umweltverträglichkeitsuntersuchungen durchgeführt. Die RC-Materialien wurden grundsätzlich auf relevante Parameter der LAGA 2004/ LAGA Bauschutt untersucht. Außerdem wurden Untersuchungen gemäß DAfStb-Richtlinie „Verwendung von siliciumreicher Flugasche und Kesselsand in Betonbauteilen in Kontakt mit Boden, Grundwasser oder Niederschlag“ (Juni 2020) durchgeführt.

Im Jahr 2023 wurde eine neue europäische Produktnorm (EN 197-6) veröffentlicht, sie sieht die Anwendung von sog. Betonrecyclingmehlen (recycled concrete fines „F“) in Zementen mit CEM II-F-, CEM II/M- und mit CEM VI-Zusammensetzungen vor. Zudem wurde im Deutschen Institut für Bau-technik (DIBt) ein erster Prüfplan für eine Zulassungsprüfung eines Zements mit RC-Material als

Hauptbestandteil erstellt. Dieser Prüfplan enthält den Nachweis der Umweltverträglichkeit. Orientierend an diesem DIBt-Prüfplan wurden an den ziegelhaltigen Recyclingbaustoffen im Projekt R-ZiEMENT nunmehr standardmäßig die Eluat- und Feststoffwerte gemäß DIN 4226-101, Abschnitt 4.5 bestimmt. Die Einhaltung der Höchstwerte wurde zur wesentlichen Voraussetzung für eine labor-technische sowie für eine großtechnische Anwendung ziegelhaltiger Recyclingbaustoffe als Zementhauptbestandteil.

Die Proben aus den Ziegelstoffströmen (Ziegelbruch Zib) und aus den Recyclingstoffströmen (Mauerwerksbruch Mab) wurden anschließend in den Forschungsinstituten chemisch und mineralogisch untersucht sowie zur Herstellung ziegelhaltiger Laborzemente verwendet.

Beispielsweise wurden zur Einordnung ihrer Reaktivität die reaktionsfähige Kieselsäure und die Hydratationswärme bestimmt. Die Ziegelproben aus den Ziegelwerken (Zib) zeigten erwartungsgemäß eine Reaktivität vergleichbar mit gewissen thermisch aktivierten Tonen (7d-Hydratationswärme nach ASTM C1897-20 bis 250 J/g). An den ziegelhaltigen Proben aus den Recyclingwerken (Mab) wurden geringere Reaktivitäten festgestellt (7d-Hydratationswärme nach ASTM C1897-20 bis 125 J/g).

An ziegelhaltigen RC-Materialien wurden Farbmessungen durchgeführt, um die Ziegelanteile im Mauerwerksbruch zu ermitteln. Aus den Farbmessungen wurde ein Modell entwickelt, das eine Vorhersage der Reaktivität von ziegelhaltigem Mauerwerksbruch aufgrund seiner Farbe ermöglicht. Zwischen dem aus der Farbe berechneten Ziegelanteil und der 7d-Hydratationswärme konnte ein linearer Zusammenhang nachgewiesen werden. Darüber hinaus konnte an den Proben gezeigt werden, dass auch aus der chemischen Zusammensetzung (Gehalte an Fe_2O_3 und Al_2O_3) die Bestimmung des Ziegelanteils möglich ist. Beide Methoden, insbesondere in Kombination, werden künftig dazu beitragen können, zuverlässige technische Informationen über den Ziegelgehalt von Recyclingstoffströmen und über die puzzolanischen Eigenschaften im Zement bereitzustellen.

Unter Verwendung ziegelhaltiger Recyclingbaustoffe sowie Portlandzement CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente wurden ressourceneffiziente Laborzemente hergestellt und untersucht. Teilweise wurde Kalkstein als weiterer Hauptbestandteil „LL“ eingesetzt. In Anlehnung an DIN EN 197-1 wurde im Projekt für die Ziegelmaterialien aus den Ziegelwerken die Kurzform „Q“ entsprechend natürlicher getemperter Puzzolane (mit mindestens 25 M.-% reaktiver Kieselsäure) verwendet. Da ziegelhaltiger Mauerwerksbruch aus den Recyclingwerken lt. Definition keinem Betonrecyclingmehl „F“ (gemäß EN 197-6) entspricht, wurde im Projekt die Kurzform „X“ verwendet. Die R-Zemente hatten i.d.R. einen Klinkerfaktor von rd. 70% (bzw. rd. 60% in Kombination mit Kalkstein). Die Recyclingmaterialien wurden auf eine Mahlfineinheit von etwa 5000 cm^2/g (Blaine) gemahlen. Schleifstäube wurden gesiebt; i.d.R. wurde der Durchgang $< 125 \mu\text{m}$ verwendet.

In Abhängigkeit der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung der ziegelhaltigen Zementbestandteile, ihrer spezifischen Oberfläche (Mahlfineinheit nach Blaine) bzw. ihrer Korngrößenverteilung wurden in der Untersuchung des Wasseranspruchs am Zement Werte auf vergleichsweise hohem Niveau ermittelt. Bei Zementen mit einem Recyclingfaktor von 30% (d. h. 30 M.-% RC-Material im Zement) lagen die Werte zwischen 40 Vol.-% und 46 Vol.-% (nach Punkte). Die Untersuchungen der Anfangsfestigkeit (2d) und der Normfestigkeit (28d) der Zemente folgten EN 196-1 und EN 197-1. Während im Prüfalter von zwei Tagen Druckfestigkeiten von rd. 30 MPa erreicht wurden, lagen die Werte im Prüfalter von 28 Tagen im Durchschnitt bei etwa 51 MPa. Je nach Aufbereitung und Reaktivität des verwendeten RC-Materials wurden Festigkeiten zwischen 46 MPa und 58 MPa ermittelt.

Neben vergleichsweise hohen Normfestigkeiten an R-Zementmörteln unter Verwendung von Ziegelschleifstaub wurden im Alter von 28 Tagen entsprechend geringere Gesamtporositäten sowie feinporigere Gefügestrukturen festgestellt.

Die zusätzliche Verwendung von Kalkstein in Kombination mit Ziegelmaterial führte in der Entwicklung der Festigkeit und der Porosität zu „Verdünnungseffekten“, es entstanden – je nach Kalksteinanteil – geringere Festigkeiten und ein gröberes Porengefüge. Die Auswertungen sämtlicher stofflicher und

granulometrischer Einflüsse der Zementbestandteile auf die Zement- und Mörtel Eigenschaften war eine wesentliche Voraussetzung zur Vorbereitung großtechnischer Betriebsversuche, z.B. zur Festlegung einer Zementrezeptur sowie einer geeigneten Verfahrenstechnik. Sie bildeten außerdem die Grundlage für gezielte Zementoptimierungsmaßnahmen, z. B. um Zulassungsprüfungen am Beton zu bestehen.

Kritischer Projektmeilenstein war die Durchführung großtechnischer Betriebsversuche im Zementwerk. Unter Verwendung Ziegelschleifstaub aus den Ziegelwerken (Zib 23) und ziegelhaltigen Recyclingsanden (Recyclingfeinstoffen) aus den Recyclingwerken (Mab 24) wurden zwei ziegelhaltige Werkzeuge produziert.

Im Betriebsversuch 1 (BV1) fand eine getrennte Aufbereitung der Ausgangsstoffe mit anschließendem Mischen im Mehrkammermischsilo statt. Der Schleifstaub wurde zuvor auf einer Vibrationssiebmaschine klassiert (Durchgang < 125 µm). Es wurde ein R-Zement (vgl. CEM II/B-M (Q-LL)) mit 10 M.-% gesiebttem Ziegelschleifstaub, 20 M.-% Kalksteinmehl und 70 M.-% CEM I 52,5 R hergestellt.

Im Betriebsversuch 2 (BV2) fand eine gemeinsame Mahlung der Ausgangsstoffe auf einer Umlaufmahlanlage mit Kugelmühle und Siebter statt. Es wurde ein ziegelhaltiger R-Zement (vgl. CEM II/B-X) mit ca. 34 M.-% ziegelhaltigem Recyclingsand und 66 M.-% Klinker (inkl. Sulfatträger) hergestellt. Der Ziegelgehalt des RC-Materials wurde im Recyclingwerk auf ca. 40-60 % eingestellt.

Mit Anfangsfestigkeiten von rd. 33 MPa bzw. 29 MPa und Normfestigkeiten von jeweils etwa 54 MPa erreichten die Werkzeuge aus BV1 und BV2 mit den Laborzementen vergleichbare Ergebnisse. Aufgrund der hohen Zementfeinheiten wurde ein Wasseranspruch von ca. 30 M.-% bzw. 33 M.-% (gemäß EN 196-3) ermittelt. Der Erstarrungsbeginn lag bei 125 min bzw. 205 min, das Erstarrungsende bei 185 min bzw. 235 min.

Neben der großtechnischen Zementherstellung wurden auch Betone großtechnisch hergestellt und geprüft.

Im Transportbetonwerk wurde unter Verwendung des R-Zements aus BV2 (CEM II/B-X) ein Transportbeton im Vergleich zu einem Referenz-Transportbeton (CEM II/A-LL) untersucht. Der R-Zement-Frischbeton wies mit 430 mm ein geringeres Ausbreitmaß auf als der Referenzbeton mit 540 mm. Da sich die Zusammensetzungen beider Betone ausschließlich in der Zementart unterschieden, war die Veränderung der Konsistenzklasse auf den ziegelhaltigen Zementbestandteil zurückzuführen. Außerdem hatte der R-Zement einen geringeren Klinkerfaktor als der Referenzzement. Dennoch wurde am R-Zement-Beton mit 40 MPa eine höhere Betondruckfestigkeit (Prüfalter 56 Tage) festgestellt als am Referenzbeton (35 MPa).

Der Zement aus BV2 kam außerdem in der Fertigung von Betonrohren erfolgreich zum Einsatz.

Unter Verwendung der ziegelhaltigen Werkzeuge aus BV1 und BV2 wurden zulassungsrelevante Betonuntersuchungen gemäß DIBt-Prüfplan durchgeführt. Es wurden am Beton der Frostwiderstand nach dem Würfelverfahren, der Frost-Tausalz-Widerstand im CDF-Test, der Chlorideindringwiderstand im Migrationsschnelltest und der Carbonatisierungswiderstand an Feinbetonprismen geprüft. Die Eignung für die entsprechenden Anwendungsgebiete nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 konnte nachgewiesen werden.

Die Prüfung des Frostwiderstandes nach dem Würfelverfahren entspricht den Maßstäben, die bisher bei der Zulassung von Zementen durch das DIBt angelegt wurden. Hierfür wurden Betone mit $z = 300 \text{ kg/m}^3$ und $w/z = 0,60$ hergestellt. Die Betone auf Basis der Werkzeuge BV1 und BV2 sowie auf Basis anderer R-Zemente mit 30 M.-% ziegelhaltigem RC-Material (Vorversuche) haben nach 100 Frost-Tau-Wechseln Abwitterungen < 10 M.-% erreicht und damit das Bewertungskriterium des DIBt eingehalten. Ein R-Zement (BV11) gemischt aus 90% Werkzeugement BV1 und 10% Ziegelschleifstaub wies mit einem Klinkerfaktor von rd. 60% die Zusammensetzung eines CEM II/C-M (Q-LL) auf

(vgl. EN 197-5). Auch bei Anwendung dieses Zements wurden relevante Bewertungskriterien eingehalten.

Mit dem CDF-Test wurde der Widerstand der Betone gegenüber einer Frost-Tauwechsel-Beanspruchung bei gleichzeitiger Taumittelbelastung geprüft. Es wurden Luftporenbetone gemäß DIBt-Prüfplan mit $z = 320 \text{ kg/m}^3$ und $w/z = 0,50$ hergestellt und über 28 Frost-Tau-Wechsel untersucht. Die ziegelhaltigen Werkzemente und der klinkereffiziente R-Zement BV11 haben die Anwendungsprüfung im CDF-Test durchweg bestanden. Das im BAW-Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ angegebene Kriterium von maximal $1,50 \text{ kg/m}^2$ Abwitterungen nach 28 Frost-Tau-Wechseln wurde eingehalten.

Das in den Zulassungsverfahren des DIBt herangezogene Beurteilungskriterium für den Chloridmigrationskoeffizienten von $25 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ im Prüfalter von 35 Tagen wurde in den Versuchen unter Verwendung der Werkzemente aus BV1 und BV2 sowie des nachträglich mit Ziegel angereicherten R-Zements BV11 eingehalten. Für den Migrationsschnelltest wurden Betone mit $z = 320 \text{ kg/m}^3$ und $w/z = 0,50$ hergestellt.

Das Carbonatisierungsverhalten wurde ebenfalls in Anlehnung an die Zulassungsversuche des DIBt ermittelt. Hierzu wurden Feinbetonprismen mit w/z -Wert = $0,50$ hergestellt. Die Carbonatisierungstiefen der Prismen lagen nach einer Hauptlagerung von 140 Tagen im Bereich des DIBt-Bewertungshintergrundes. Auch mit Bezug auf die Vorlagerung der Prismen (7 Tage bzw. 28 Tage) sowie auf die Druckfestigkeit im Alter von 7 oder 28 Tagen wurden die Bewertungskriterien für den Carbonatisierungswiderstand eingehalten.

Zur Absicherung der Projektergebnisse wurde unter Verwendung des großtechnisch hergestellten Zements aus BV2 (Recyclingfaktor 34%) eine ergänzende Umweltverträglichkeitsprüfung (hier DSLT-Auslaugprüfung) an Betonwürfeln durchgeführt. Die Prüfung wurde erfolgreich bestanden.

Abschließend wurde in ökobilanziellen Berechnungen untersucht, welche Treibhauspotenziale ziegelhaltige Zementzusammensetzungen erreichen könnten, wenn gleichzeitig ein möglichst geringer Klinkerfaktor im R-Zement vorliegt.

Für R-Zemente mit minimalem Klinkerfaktor, 30 M.-% Ziegelschleifstaub und 20 M.-% Kalkstein (nahe der unteren Grenze eines CEM II/C-M) lag das Treibhauspotenzial bei $348 \text{ kg CO}_2\text{-Äq/t}$ Zement (zzgl. Verbrennung von Sekundärbrennstoffen) und damit unterhalb eines Vergleichszements CEM II/C-M (S-LL).

Für R-Zemente mit höherem Klinkerfaktor lagen die Treibhauspotenziale entsprechend höher. So wurde für den Werkzement BV1 ein GWP von $487 \text{ kg CO}_2\text{-Äq/t}$ Zement ermittelt, für den Werkzement BV2 ein GWP von $481 \text{ kg CO}_2\text{-Äq/t}$ Zement (jeweils zzgl. Verbrennung von Sekundärbrennstoffen).

Die ökologische und ökonomische Bedeutung des Projektes basiert auf der Erarbeitung eines ganzheitlichen Konzeptes zur Bereitstellung technisch und ökologisch optimierter Bauprodukte durch Schließen von Stoffkreisläufen. Die Ergebnisse können auf normativer, wissenschaftlicher und wirtschaftlicher Ebene verwertet und konsequent weiterentwickelt werden. Die wissenschaftliche, faktenbasierte Kommunikation an die Breite der Gesellschaft wird über den Projektzeitraum hinaus eine Aufgabe aller beteiligten Akteure aus Klima- und Umweltschutz, aus Ressourcen- und Energieeffizienz, aus Nachhaltigkeit und Wirtschaft, aus Bildung und Arbeit sowie aus Forschung und Wissenschaft bleiben.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

23 Literaturverzeichnis

- [1] Knappe, Florian; Reinhardt, Joachim; Theis, Stefanie; Kresser, Stephan; Scheidt, Julia; Breit, Wolfgang; Sachsenhauser, Bernhard K.; Lorenz, Klaus; Müller, Christoph; Severins, Katrin; Haufe, Johannes; Vollpracht, Anya. *Schlußberichte zum BMBF-Verbundforschungsvorhaben "R-Beton - Ressourcenschonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation" - Schwerpunkt 1: Konzeption der neuen Werkstoffe*. Berlin, 2022
- [2] Borchers, Ingmar; Müller, Christoph; Pancic, Aleksandar; Schnell, Jürgen; Seidel, Maik; Vollpracht, Anya; Weiler, Lia. *Schlußberichte zum BMBF-Verbundforschungsvorhaben "R-Beton - Ressourcenschonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation" - Schwerpunkt 2: Praxisanforderungen an die neuen Werkstoffe*. Berlin, 2022
- [3] Borchers, Ingmar; Müller, Christoph; Pancic, Aleksandar; Schnell, Jürgen; Seidel, Maik; Vollpracht, Anya; Weiler, Lia. *Schlußberichte zum BMBF-Verbundforschungsvorhaben "R-Beton - Ressourcenschonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation" - Schwerpunkt 3: Ökobilanz, Praxistest und Transfer*. Berlin, 2022
- [4] DIN EN 197-5 2021-07. *Zement - Teil 5: Portlandkompositzement CEM II/C-M und Kompositzement CEM VI; Deutsche und Englische Fassung EN 197-5:2021*
- [5] DIN EN Entwurf 197-6 2022-06. *Zement - Teil 6: Zement mit rezyklierten Baustoffen; Deutsche und Englische Fassung prEN 197-6:2022*
- [6] Institut für Ziegelforschung, IZF; VDZ gGmbH. *Verbesserung der Energieeffizienz und Reaktivität durch separate Mahlung von Ziegelbrechsand für den Einsatz in Portlandpuzzolanzementen: Schlussbericht IGF-Vorhaben 20920 N; Bewilligungszeitraum: 01.01.2020 - 30.06.2022*. Essen, 2022
- [7] Severins, Katrin; Müller, Christoph. *Brechsand als Hauptbestandteil im Zement*. Beton 2017, S. 323-326
- [8] Konsortium R-Beton. *Ressourcenschonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation*, R-Beton ©. Verfügbar unter: <https://www.r-beton.de/>
- [9] Severins, Katrin; Müller, Christoph. *R-Beton - Ressourcen schonender Beton (Teil 2): Verwendung von Brechsanden in der Zementherstellung, 37-01*. Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg. 20. Internationale Baustofftagung ; Tagungsband (Weimar 12. - 14. September 2018). Weimar, 2018 2018
- [10] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall, LAGA. *Eckpunkte (EP) der LAGA für eine Verordnung über die Verwertung von mineralischen Abfällen in technischen Bauwerken“ : Stand 31.08.2004*. 2004
- [11] Pierkes, Roland; Schulze, Simone E.; Rickert, Jörg. *Durability of Concretes Made with Calcined Clay Composite Cements*. Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg. *Calcined clays for sustainable concrete : Proceedings of the 2nd international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.-07.12.2017)*. Heidelberg, 2018 (RILEM Bookseries 16) 2018, S. 366-371

- [12] Schulze, Simone. *Nutzung von natürlichen getemperten Tonen als Zementhauptbestandteil: Schlussbericht zu dem geförderten Vorhaben: 16566 N*. Düsseldorf: VDZ gGmbH 2012
- [13] Thienel, Karl-Christian; Beuntner, Nancy; Chucholowski, Carola; Scherb, Sebastian. *Performance of calcined clays in mineral construction materials: HV 10*. Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg. 20. Internationale Baustofftagung; Tagungsband (Weimar 12.-14.09.2018). Weimar, 2018 2018, S. 175-192
- [14] Kalb, Christian. *Calcined Clays – Performance as Composite Material*. Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg. Calcined clays for sustainable concrete : Proceedings of the 2nd international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.-07.12.2017). Heidelberg: Springer, 2018 (RILEM Bookseries 16) 2018, S. 226-231
- [15] Müller, Christoph; Severins, Katrin. *Hydratation und Porengefüge bei Verwendung RC-haltiger Zemente: Eigenschaften feindisperser Stoffe aus dem Recycling mineralischer Bauabfälle und ihre Anwendung im Zement - Auswirkungen auf Wasseraufnahme, Hydratation und Porengefüge*. (BBSR-Online-Publikation 67/2024). Bonn, 2024
- [16] Laschet, Pierre. *Randbedingungen für die Anwendung von Recyclingmehlen in ressourceneffizienten, zementgebundenen Baustoffen*. Aachen, FH, Masterarbeit, 2023. Aachen, 2023
- [17] Dobala, Elena. *Randbedingungen zur Herstellung von Mörteln mit plastischer Konsistenz unter Verwendung ressourceneffizienter Zemente*. Bochum, Univ., Masterarbeit, 2022. Bochum, 2022
- [18] Müller, Christoph; Severins, Katrin. *Granulometrie der Zementhauptbestandteile - Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit von Betonen mit kalksteinhaltigen Zementen*. Schlussbericht zu IGF-Nr. 17853 BG, Zeitraum 01.12.2013 - 30.11.2016; FIZ Düsseldorf, 2017
- [19] Severins, Katrin; Wedekind, Luise. *Granulometrische Optimierung klinkereffizienter Zemente - Effekte auf die Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit von Beton: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben AZ 34647/01*. Düsseldorf, 2024
- [20] VDZ gGmbH. *Granulometrische Optimierung klinkereffizienter Zemente - Effekte auf die Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit von Beton (DBU-Forschungsprojekt AZ 34647/01)*. Düsseldorf: 2023
- [21] Wedekind, Luise; Ludwig, Horst-Michael; Severins, Katrin; Müller, Christoph. *Einfluss der Granulometrie von klinkereffizienten Zementen auf die Hydratation: Vortrag ibausil 2023*. ce/papers 2023 6(6), S. 40-47
- [22] Müller, Christoph; Palm, Sebastian; Hermerschmidt, Wibke. *Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit CEM II/C-M (S-LL)- und CEM II/B-LL-Zementen: Auswertung vorhandener Studien*. Beton 2019, 69(10), S. 362-371
- [23] Schneider, Martin. *The cement industry on the way to a low-carbon future*. Cement and Concrete Research 2019, 124, 105792
- [24] DAfStb, Hrsg. *Bestimmung der Freisetzung anorganischer Stoffe durch Auslaugung aus zementgebundenen Baustoffen (DAfStb-Richtlinie)*. Berlin, 2005

- [25] DIBt, Hrsg. *Veröffentlichung der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen: Ausgabe 2024/1; vom 28.08.2024.* Berlin, 2024
- [26] DIN 1045-2 2023-08. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 2: Beton*
- [27] DIN EN 12390-7 2021-01. *Prüfung von Festbeton, Teil 7: Rohdichte von Festbeton ; Deutsche Fassung EN 12390-7:2019 + AC:2020*
- [28] DIN EN 12390-9 2019-10. *Prüfung von Festbeton, Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern ; Deutsche Fassung EN 12390-3:2019*
- [29] DIN EN 12390-2 2019-10. *Prüfung von Festbeton, Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen ; Deutsche Fassung EN 12390-2:2019*
- [30] DIN EN 12620 2008-07. *Gesteinskörnungen für Beton, Deutsche und Englische Fassung prEN 12620:2015*
- [31] Ehrenberg, Andreas. *Zur Optimierung der Korngrößenverteilung von hüttensandhaltigen Zementen.* Duisburg: 2001
- [32] Beuntner, Nancy. *Zur Eignung und Wirkungsweise calcinierter Tone als reaktive Bindemittelkomponente im Zement.* München: 2017
- [33] Severins, Katrin; Palm, Sebastian. *Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen - Bekannte Stoffe - Neue Konzepte, .* 2011
- [34] VDZ. *Zahlen und Daten 2023: Zementindustrie in Deutschland ; Stand Oktober 2023.* Berlin, 2023
- [35] Müller, Christoph; Severins, Katrin. *Verwendung von feinen RC-Gesteinskörnungen bei der Zementherstellung.* Knappe, Florian; Reinhardt, Joachim; Theis, Stefanie; Kresser, Stephan; Scheidt, Julia; Breit, Wolfgang; Sachsenhauser, Bernhard K.; Lorenz, Klaus; Müller, Christop; Severins, Katri; Haufe, Johannes; Vollpracht, Anya. *Schlußberichte zum BMBF-Verbundforschungsvorhaben "R-Beton - Ressourcenschonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation" - Schwerpunkt 1: Konzeption der neuen Werkstoffe .* Berlin, 2022 (DAfStb: Schriftenreihe 639) 2022, S. 127-182
- [36] Norm DIN CEN-TR 16563 2014-04. *Verfahrensgrundsätze zum Nachweis gleichwertiger Dauerhaftigkeit, Englische Fassung CEN/TR 16563:2013*
- [37] Gladitz, Friederike. *Untersuchungen zur Zementhydratation von CEM II/C-M (S-LL) sowie CEM II/C-M (Q-LL) Zementen in Abhängigkeit der granulometrischen Eigenschaften.* Weimar, Bauhausuniv., Bachelor-Arb., 2023
- [38] Platthaus, Rieke. *Untersuchungen zur Zementhydratation von CEM II /C-M (S-LL) Zementen sowie CEM II /C-M (Q-LL) Zementen in Abhängigkeit der granulometrischen Eigenschaften.* Weimar, Bauhausuniv., Studienarb., 2023
- [39] Lemma, Roxana; Castellano, Christina; Bonavetti, Viviana L.; Trezza, Monica A.; Rahhal, Viviana F.; Irassar, Edgardo F.. *Thermal Transformation of Illitic-Chlorite Clay and Its Pozzolan Activity.* Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg. *Calcined clays for sustainable concrete : Proceedings of the 2nd international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.-*

- 07.12.2017). Heidelberg: Springer, 2018 (RILEM Bookseries 16) 2018, S. 266-272
- [40] Lemke, Jost; Berger, C.. *Thermal Processing of Calcined Clay*. Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg. *Calcined clays for sustainable concrete : Proceedings of the 2nd international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.-07.12.2017)*. Heidelberg: Springer, 2018 (RILEM Bookseries 16) 2018, S. 262-265
- [41] Favier, Aurélie; Zunino, Franco; Katrantzis, Ioannis; Scrivener, Karen. *The Effect of Limestone on the Performance of Ternary Blended Cement LC3: Limestone, Calcined Clays and Cement*. Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg. *Calcined clays for sustainable concrete : Proceedings of the 2nd international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.-07.12.2017)*. Heidelberg: Springer, 2018 (RILEM Bookseries 16) 2018, S. 170-175
- [42] Tretau, Anne; Linß, Elske; Walz, Jurij; Severins, Katrin; Gula, Nikita. *Sutracrete - ressourcenschonender, nachverfolgbarer Beton: Vortrag ibausil 2023*. ce/papers 2023, 6(6), S. 1576-1580
- [43] Palm, Sebastian; Wolter, Albrecht. *Strength development of multi-composite cements with optimized void filling*. *Cement International* 2011, S. 56-64
- [44] Baetzner, Silvan; Bolte, Gerd; Ehrenberg, Andreas; Neufert, Winfried; Palm, Sebastian; Schuster, Thomas. *Stoffliche Potenziale für klinkereffiziente Zemente*. VDZ, Hrsg. *Fachtagung Zementchemie 2019*. Düsseldorf, 2019
- [45] Norm ASTM F 2170 2019. *Standard test method for determining relative humidity in concrete floor slabs using in situ probes*
- [46] Weil, Marcel. *Ressourcenschonung und Umweltentlastung bei der Betonherstellung durch Nutzung von Bau- und Abbruchabfällen (Schriftenreihe WAR 160)*. Zugl.: Darmstadt, TU, Diss., 2004
- [47] Müller, Anette. *Recycling von Mauerwerkbruch: Stand und neue Verwertungswege*. *Ziegelindustrie* 2003, S. 17-25, 42-46, 51-59
- [48] DIN CEN/TS Vornorm 12390-9 2006-08. *Prüfung von Festbeton, Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand - Abwitterung ; Deutsche Fassung CEN/TS 12390-9:2006*
- [49] Ludwig, Horst-Michael. *Production and properties of composite cements*. Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg): *Process Technology of Cement Manufacturing : 6th International VDZ Congress 2009 (Düsseldorf 30.09.-02.10.2009)*. - Düsseldorf : Verl. Bau und Technik, 2009 2009, S. 89-95
- [50] Wolter, Albrecht; Unseld, Johannes; Bohne, Thomas. *Portland based multi-constituent cements - By-products in cement manufacturing, Materials and technologies for the future ; The Future of Cement: 200 years after Louis Vicat, 6-8 JUNE 2017, UNESCO, Paris*. 2017
- [51] Maraghechi, Hamed; Avet, François; Wong, Hong; Kamyab, Hadi; Scrivener, Karen. *Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) with various kaolinite contents with respect to chloride transport*. *Materials and Structures* 2018, S. 17

- [52] Rickert, Jörg; Pierkes, Roland. *Optimierung von Zementen mit getemperten Tonen als Hauptbestandteil u. Dauerhaftigkeit damit hergestellter Betone: Schlussbericht ; IGF-Vorhaben 17930 N*. Düsseldorf: VDZ gGmbH 2016
- [53] Palm, Sebastian. *Optimierung der Raumauffüllung und der Komponentenverteilung von Multikompositzementen*. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger 2009
- [54] Müller, Christoph; Severins, Katrin. *ÖkotopZement: ökologisch und technisch optimierte Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen*. Klimaschutz und Anpassung an die Klimafolgen : Strategieebn, Maßnahmen und Anwendungsbeispiele / Hrsg.: Mahammadzadeh, Mahammad; Biebeler, Hendrik; Bardt, Hubertus. - Köln: Institut der deutschen Wirtschaft Köln Medien GmbH, 2009. - ISBN 978-3-602-14847-9 2009, S. 68-74
- [55] Müller, Christoph; Severins, Katrin; Hauer, Bruno. *Neue Erkenntnisse zur Leistungsfähigkeit von Zementen mit den Hauptbestandteilen Kalkstein, Hüttensand und Flugasche: Teil 1, Teil 2*. Beton 2009, 59(10;11), S. 469-478, 531-537
- [56] Beuntner, Nancy. *Leistungsfähigkeit großtechnisch calcinierter Tone und deren Wirksamkeit in zementaren Systemen*. Breitenbücher, Rolf; Mark, Peter (Hrsg.): Beiträge zur 1. Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium : 7./8. November 2013 Ruhr-Universität Bochum (Bochum 07.-08.11.2013). Bochum: Ruhr-Universität Bochum, 2013 (DAfStb-Forschungskolloquium ; DAfStb-Jahrestagung 54 ; 1) 2013, S. 239-244
- [57] Scrivener, Karen. *LC3 - Limestone and calcined clay concrete*. VDZ, Ed. 8th International VDZ Congress 2018; Proceedings (Duesseldorf 26–28 September 2018). Duesseldorf, 2018 2018, S. 469-502
- [58] Scrivener, Karen; Zunino, Franco; Avet, François; Hangpongpun, Wilasinee; Dekeukelaere, Anne; Grimmeissen, Laurent. *LC3 - a promising alternative*. International Cement Review 2018, S. 69-71
- [59] VDZ. *Kennwerte zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Beton (Information Betontechnik 2014-04)*. Düsseldorf, 2014
- [60] Avet, François; Scrivener, Karen. *Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3)*. Cement and Concrete Research 2018, S. 124-135
- [61] Cavalcante, Daiana Goes; Marques, Maria Gorett dos Santos; Melo Filho, João de Almeida; Vasconcelos, Raimundo Pereira de. *Influence of the levels of replacement of portland cement by metakaolin and silica extracted from rice husk ash in the physical and mechanical characteristics of cement pastes*. Cement and Concrete Composites 2018, S. 296-306
- [62] Müller, Christoph; Palm, Sebastian; Wolter, Albrecht; Bohne, Thomas. *Hydratationsgrad basierte Kennwerte zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Beton: Betontechnische Berichte*. Beton 2014, 33(07-08), S. 305-309
- [63] Bohne, Thomas. *Granulometrische Simulation und Optimierung von Portlandkalksteinzementen*. Clausthal: Papierflieger 2016

- [64] Reformat, M.; Severins, Katrin; Müller, Christoph. *Granulometrische Einflüsse von Zementen auf die Dauerhaftigkeit von Beton: Auswirkungen des w/z-Wertes, P 2.09*. Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg. 20. Internationale Baustofftagung, ibausil (Weimar 12.-14.09.2018). Weimar, 2018 2018
- [65] Knappe, Florian; Reiners, Jochen; Vollpracht, Anja. *Ganzheitliche Bewertung von R-Beton: Ökobilanzen, Lebenszyklusbetrachtung, Umwelt*. Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg. 20. Internationale Baustofftagung; Tagungsband (Weimar 12.-14.09.2018). Weimar, 2018 2018, S. 1651-1658
- [66] Bundesanstalt für Wasserbau, BAW. *Frostprüfung von Beton (MFB) - BAW-Merkblatt*. Karlsruhe, 2012
- [67] Siebel, Eberhard. *Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton: Beurteilung mittels Würfelverfahren*. Beton 1992, 42(9), S. 496-501
- [68] Fédédration Internationale du Béton, Ed. *Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling: State of the art report prepared by Working Party 4.3-1*. Lausanne, 2007 (fib Bulletin 38)
- [69] VDZ. *European Construction in Service of Society (ECOServe) Cluster 2 - Production and Application of Blended Cements - 5. Periodic Report: ECOServe - Cluster 2 - R(esearch), from 01.10.2003 to 30.09.2005*. Düsseldorf, 2005
- [70] Neufert, Winfried; Reuken, Ines; Weber, Georg; Müller, Christoph; Palm, Sebastian; Severins, Katrin; Graubner, Carl-Alexander. *Erforschung des Dreistoffgemisches Klinker, Hüttensand und Kalksteinmehl mit dem Ziel der Absenkung des Klinkeranteils im Zement zur Verminderung der CO₂-Emissionen in der Zementproduktion: Abschlussbericht zum DBU-Forschungsvorhaben 28790/02*. 2016
- [71] Krüsemann, Magdalena. *Einfluss von Granulometrie und w/z-Wert auf die Eigenschaften von Zementmörteln“*. Bochum: 2017
- [72] Geisenhanslüke, Carsten. *Einfluß der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen: Influence of the granulometry of fine particles on the rheology of pastes*. Kassel: Kassel university press 2009
- [73] Reschke, Thorsten; Siebel, Eberhard; Thielen, Gerd. *Einfluß der Granulometrie und Reaktivität von Zement und Zusatzstoffen auf die Festigkeits- und Gefügeentwicklung von Mörtel und Beton*. Beton 1999, S. 719-724, 47-50
- [74] Teichmann, Thomas. *Einfluss der Granulometrie und des Wassergehalts auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein: Influence of the granulometrie and the water content on the strength and density of cement stone*. Kassel: Kassel university press 2008
- [75] Thielen, Gerd; Reschke, Thorsten. *Einfluß der Granulometrie der Feinstoffe auf die Festigkeits- und Gefügeentwicklung von Mörtel und Beton*. 14. Internationale Baustofftagung : 20.-23. September 2000 Weimar ; Tagungsbericht Band 1 (ibausil:14 Weimar 20.-23.09.2000) / Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.). - Weimar : Bauhaus-Univ. Weimar, 2000 2000, S. 289-299
- [76] VDZ. *Einfluss der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung von Kalkstein als Zementhauptbestandteil auf die Eigenschaften von*

- Zementen und die Dauerhaftigkeit damit hergestellter Betone: Bewilligungszeitraum: 01.07.2011-30.06.2014 ; Schlussbericht.* Düsseldorf, 2014
- [77] Ge, Zhi; Wu, Xinsheng; Sun, Renjuan; Guan, Ynhua. *Effect of clay-brick-powder on properties of concrete.* China Building Materials Academy (Hrsg.): 14th International congress on the chemistry of cement, ICCC (Beijing 13.-16.10.2015). Beijing, 2015 2015
- [78] Pierkes, Roland; Schulze, Simone E.; Rickert, Jörg. *Durability of composite cements with calcined clay.* International Cement Review 2018, S. 34-36
- [79] Bundesverband Baustoffe, Steine und Erden, BBS. *Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2040 in Deutschland.* Berlin, 2022
- [80] Dhandapani, Yuvaraj; Vignesh, K.; Raja, Thangadurai; Santhanam, Manu. *Development of the Microstructure in LC3 Systems and Its Effect on Concrete Properties.* Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg. *Calcined clays for sustainable concrete : Proceedings of the 2nd international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.-07.12.2017).* Heidelberg: Springer, 2018 (RILEM Bookseries 16) 2018, S. 131-140
- [81] Arvaniti, Eleni C.; Juenger, Maria C.; Bernal, Susan A.; Duchesne, Josée; Courard, Luc; Leroy, Sophie; Provis, John L.; Klemm, Agnieszka; De Belie, Nele. *Determination of particle size, surface area, and shape of supplementary cementitious materials by different techniques.* Materials and Structures/Materiaux et Constructions 2015, S. 3687-3701
- [82] Reschke, Thorsten. *Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton.* Düsseldorf: 2001
- [83] Müller, Christoph; Ehrenberg, Andreas. *Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit hüttensand- und flugaschereichen Zementen: Schlussbericht IGF-Vorhabens 18228 N.* Düsseldorf: 2017
- [84] Bundesanstalt für Wasserbau, BAW. *Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC) - BAW-Merkblatt.* Karlsruhe, 2019
- [85] Müller, Christoph; Lang, Eberhard. *Dauerhaftigkeit von Beton mit Portlandkalkstein- und Portlandkompositzementen CEM II-M (S-LL).* Beton 2005, 55(3/4/5), S. 131-138, 197-202, 266-269
- [86] Proske, Tilo; Rezvani, Moien; Palm, Sebastian; Müller, Christoph; Graubner, Carl-Alexander. *Concretes made of efficient multi-composite cements with slag and limestone.* Cement and Concrete Composites 2018, 89, S. 107-119
- [87] Norm BS 8203 2017-03. *Code of practice for installation of resilient floor coverings*
- [88] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ. *CEM II- und CEM III/A-Zemente im Betonbau: Nachhaltige Lösungen für das Bauen mit Beton.* Düsseldorf: Verl. Bau und Technik 2008
- [89] European Organisation for Technical Approvals, EOTA. *Calcium sulphoaluminate based cement (EAD 150001-00-0301).* Brüssel, 2017

- [90] Wolter, Albrecht. *Aspekte der Konstitution, Analytik und Performance von Portland-Kompositzementen: HV 26*. Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg. 20. Internationale Baustofftagung; Tagungsband (Weimar 12.-14.09.2018). Weimar, 2018 2018, S. 352-360
- [91] Bohne, T.; Wolter, A. *Untersuchungen zur „inneren“ Kornverteilung von Multikompositzementen*. Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 19. Internationale Baustofftagung Tagungsbericht (Weimar 16.-18.09.2015). Weimar, 2015 2015
- [92] Bolte, G.; Zajac, M.; Ben Haha, M. *Production optimization of composite cements with low environmental footprint: 12-03*. Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg. 20. Internationale Baustofftagung; Tagungsband (Weimar 12.-14.09.2018). Weimar, 2018 2018, S. 675-684
- [93] Bornefeld, M.; Kluge, W. *New way of evaluation of composite cements*. Cement International 2017, S. 62-65
- [94] Dhandapani, Yuvaraj; Sakthivel, T.; Santhanam, Manu; Gettu, Ravindra; Pillai, Radhakrishna G. *Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3)*. Cement and Concrete Research 2018, S. 136-151
- [95] Ferreira, S.; Herfort, D.; Damtoft, J.S. *Influence of Clay Type on Performance of Calcined Clay – Limestone Portland Cements*. Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg. Calcined clays for sustainable concrete : Proceedings of the 2nd international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.-07.12.2017). Heidelberg: Springer, 2018 (RILEM Bookseries 16) 2018, S. 176-182
- [96] Geisenhanslüke, C.; Schmidt, M. *Zusammenhang zwischen der Granulometrie von Feinstoffen und Rheologie von Feinstoffleimen für moderne Betone*. Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 17. Internationale Baustofftagung : Tagungsbericht (Weimar 23.-26.09.2009). Weimar, 2009 2009, S. 1-1159-1-1164
- [97] Ghiasvand, E.; Ramezaniapour, A.A.; Ramezaniapouor, A.M. *Influence of grinding method and particle size distribution on the properties of Portland-limestone cements*. Materials and Structures/Materiaux et Constructions 2015, S. 1273-1283
- [98] Grabois, T.M.; Cordeiro, G.C.; Filho, R.D. *The Influence of Recycled Concrete and Clay Brick Particles on the Strength and Porosity of Cement-Based Pastes*. Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg. Calcined clays for sustainable concrete : Proceedings of the 2nd international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.-07.12.2017). Heidelberg: Springer, 2018 (RILEM Bookseries 16) 2018, S. 189-194
- [99] Khan, M.S.H.; Nguyen, Q.D.; Castel, A. *Carbonation of Limestone Calcined Clay Cement Concrete*. Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg. Calcined clays for sustainable concrete : Proceedings of the 2nd international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.-07.12.2017). Heidelberg: Springer, 2018 (RILEM Bookseries 16) 2018, S. 238-243
- [100] Ludwig, H.-M. *Herstellung und Anwendung von CO2-armen Zementen*. Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 17. Internationale Baustofftagung :

- Tagungsbericht (Weimar 23.-26.09.2009). Weimar, 2009 2009, S. 1-0057-1-0068
- [101] Müller, C.; Severins, K. *Dauerhaftigkeit von Betonen mit flugaschehaltigen Zementen*. Beton 2007/3, S. 119
- [102] Perez, A.; Favier, A.; Scrivener, K.; Martirena, F. *Influence Grinding Procedure, Limestone Content and PSD of Components on Properties of Clinker-Calcined Clay-Limestone Cements Produced by Intergrinding*. Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg. *Calcined clays for sustainable concrete : Proceedings of the 2nd international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.-07.12.2017)*. Heidelberg: Springer, 2018 (RILEM Bookseries 16) 2018, S. 358-365
- [103] Ruiz-Santaquiteria, C.; Skibsted, J. *Identification of Reactive Sites in Calcined Kaolinite and Montmorillonite from a Combination of Chemical Methods and Solid-State NMR Spectroscopy*. Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg. *Calcined clays for sustainable concrete : Proceedings of the 2nd international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.-07.12.2017)*. Heidelberg: Springer, 2018 (RILEM Bookseries 16) 2018, S. 404-408
- [104] Severins, K.; Müller, Ch.; Reformat, M.; Ludwig, H.-M. *Granulometrische Einflüsse von Zementen auf die Dauerhaftigkeit von Beton: 20-15*. Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg. 20. Internationale Baustofftagung, ibausil (Weimar 12.-14.09.2018). Weimar, 2018 2018, S. 1132-1137
- [105] Teichmann, T.; Schmidt, M. *Einfluss der Granulometrie und des Wassergehalts auf die Festigkeit und die Gefügedichtigkeit von Zementstein*. Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 17. Internationale Baustofftagung : Tagungsbericht (Weimar 23.-26.09.2009). Weimar, 2009 2009, S. 1-1211-1-1216
- [106] Teichmann, T.; Schmidt, M. *Einfluss der Granulometrie und des Wassergehalts auf die Festigkeit und die Gefügedichtigkeit von Zementstein*. Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 17. Internationale Baustofftagung : Tagungsbericht (Weimar 23.-26.09.2009). Weimar, 2009 2009, S. 1-1211-1-1216
- [107] Trümer, A.; Ludwig, H.-M. *Assessment of Calcined Clays According to the Main Criteria of Concrete Durability*. Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg. *Calcined clays for sustainable concrete : Proceedings of the 2nd international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.-07.12.2017)*. Heidelberg: Springer, 2018 (RILEM Bookseries 16) 2018, S. 475-481
- [108] Trümer, A.; Ludwig, H.-M. *Herstellung frostsicherer Betone unter Verwendung calcinierter Tone als Zementhauptbestandteil: HV 50*. Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg. 20. Internationale Baustofftagung; Tagungsband (Weimar 12.-14.09.2018). Weimar, 2018 2018, S. 516-522
- [109] Unseld, J.; Wolter, A. *New analytical method for investigating the "internal" particle size distributions of multi-composite cements*. Cement International 2016, S. 60-66
- [110] Woywadt, C.; Henrich, B. *Indian cements produced in MVR- and MPS-mills - impact of composite material properties*. Cement International 2018, S. 42-47

- [111] Ludwig, H.-M. *Influence of the process technology on the manufacture of market-oriented cements*. Cement International 2003, S. 76-85, 74-88
- [112] EtexGroup. *Fibre cement recycling - From the grave back to the cradle*. Global Cement Magazine 2010, S. 12-16
- [113] FIZ. *Ökologisch und technisch optimierte Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen: Laboruntersuchungen und Betriebsversuche: Schlussbericht zum Forschungsvorhaben "ÖkotopZement" ; Förderkennzeichen 01LK0502 ; Schlussbericht zu Nr. 3.2 - Teil I und Teil II*. Düsseldorf, 2010
- [114] FIZ. *Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen; Untersuchungen zur Optimierung von Herstellung und Eigenschaften: Schlussbericht für den Zeitraum: 01.01.2002-31.12.2003 ; AiF-Nr. 13198 N*. Düsseldorf, 2004

24 Anhang

A Tabellen

Tabelle A-1 Chemische Analyse – Probe aus dem Siebdurchgang (< 125 µm) des speziell aufbereiteten Stoffstroms Ziegelschleifstaub **Zib 23** aus den Ziegelwerken für den Betriebsversuch BV1, vgl. auch Analysen in **Tabelle 10**

Prüfung	Prüfverfahren	Messwert	Einheit	Prüfdatum
Kohlendioxid	A-01-082:2015 (950°C/IR)	0,18	%	29.02.2024
Wasser	A-01-082:2015 (950°C/IR)	0,19	%	29.02.2024
Glühverlust	Summe CO ₂ , H ₂ O	0,38	%	11.03.2024
TOC	DIN EN 13639:2017	<0,010	%	07.03.2024
Methylenblau Wert	DIN EN 933-9:2022	0,02	g/100g Füller	01.03.2024
Reaktionsfähige Kieselsäure	DIN EN 197-1:2011	28,3	%	11.03.2024
Silizium(IV)oxid glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	63,3	%	11.03.2024
Aluminiumoxid glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	16,5	%	11.03.2024
Titandioxid glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	0,72	%	11.03.2024
Phosphor(V)oxid glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	0,22	%	11.03.2024
Eisen(III)-oxid glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	4,71	%	11.03.2024
Mangan(III)-oxid glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	0,09	%	11.03.2024
Magnesiumoxid glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	2,39	%	11.03.2024
Calciumoxid glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	7,23	%	11.03.2024
Calciumcarbonat aus CaO	berechneter Wert	12,9	%	11.03.2024
Sulfat als SO ₃ glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	1,39	%	11.03.2024
Kaliumoxid glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	3,34	%	11.03.2024
Natriumoxid glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	0,20	%	11.03.2024
Na ₂ O-Äquivalent glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	2,40	%	11.03.2024

Tabelle A-2 Chemische Analyse – Probe aus dem ziegelhaltigen, speziell aufbereiteten Stoffstrom Mauerwerksbruch **Mab 24** (Recyclingsand 0/4) aus den Recyclingwerken für den Betriebsversuch BV2, vgl. auch Analysen in **Tabelle 11**

Prüfung	Prüfverfahren	Messwert	Einheit	Prüfdatum
Kohlendioxid	A-01-082:2015 (950°C/IR)	5,53	%	04.03.2024
Wasser	A-01-082:2015 (950°C/IR)	2,14	%	04.03.2024
Glühverlust	Summe CO ₂ , H ₂ O	8,42	%	05.03.2024
TOC	DIN EN 13639:2017	0,750	%	01.03.2024
Methylenblau Wert	DIN EN 933-9:2022	0,23	g/100g Füller	01.03.2024
Reaktionsfähige Kieselsäure	DIN EN 197-1:2011	10,6	%	05.03.2024
Silizium(IV)oxid glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	69,0	%	05.03.2024
Aluminiumoxid glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	6,35	%	05.03.2024
Titandioxid glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	0,23	%	05.03.2024
Phosphor(V)oxid glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	0,08	%	05.03.2024
Eisen(III)-oxid glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	1,86	%	05.03.2024
Mangan(III)-oxid glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	0,06	%	05.03.2024
Magnesiumoxid glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	1,06	%	05.03.2024
Calciumoxid glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	9,78	%	05.03.2024
Calciumcarbonat aus CaO	berechneter Wert	17,5	%	05.03.2024
Sulfat als SO ₃ glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	0,87	%	05.03.2024
Kaliumoxid glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	1,76	%	05.03.2024
Natriumoxid glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	0,92	%	05.03.2024
Na ₂ O-Äquivalent glühverlusthaltig	DIN EN 196-2:2013 (RFA)	2,08	%	05.03.2024

Tabelle A-3 Herkunft und Zusammensetzung der Referenz-, Labor- und Werkzeuge

Zement Nr.	CEM I Klinker-komponente in M.-%	CEM I Festigkeitsklasse R / N	Zib / Mab RC-Anteil in M.-%	Zib /Mab Nr./ Zuordnung	Zib / Mab Zusatz-information	Zib / Mab Zusatz-information	Kalkstein in M.-%	Kalkstein Zusatzinformation	Kalkstein Zusatzinformation
1	90	N	0				10	LL2	3000
2	70	R	0				30	LL2	3000
1	90	N	10	Zib 1	7200				
2	70	N	30	Zib 1	7200				
3	90	R	10	Zib 1	7200				
4	70	R	30	Zib 1	7200				
5	70	R	10	Zib 1	7200		20	LL2	3000
6	70	R	20	Zib 1	7200		10	LL2	3000
7	65	R	25	Zib 1	7200		10	LL2	3000
8	50	R	30	Zib 1	7200		20	LL2	3000
9	70	N	10	Zib 1	7200		20	LL2	3000
10	70	N	20	Zib 1	7200		10	LL2	3000
11	65	N	25	Zib 1	7200		10	LL2	3000
12	50	N	30	Zib 1	7200		20	LL2	3000
13	70	R	30	Mab 1	5000	KWH			
14	70	R	30	Mab 2	5000	KWH			
15	70	R	30	Mab 3	5000	KWH			
16	70	R	30	Mab 4	5000	KWH			
16	70	R	30	Mab 4	5000 (WDH)	KWH			
16	70	R	30	Mab 4	5000 (WDH)	KWH			
17	70	R	30	Mab 5	5000	LAMA			
18	70	R	30	Mab 6	5000	LAMA			
19	70	R	30	Mab 7	5000	LAMA			
20	70	R	30	Mab 8	5000	LAMA			
21	70	R	30	Zib 1	5000				
22	70	R	30	Zib 1	6100				
23	70	R	30	Zib 8	SSt	SL			
24	70	R	30	Zib 8	K-SSt	SL			
25	70	R	30	Zib 9	SSt	SL			
26	70	R	30	Zib 9	K-SSt	SL			
27	70	R	30	Zib 10	SSt	PU			
28	70	R	30	Zib 10	K-SSt	PU			
29	70	R	30	Zib 11	SSt	VA			
30	70	R	30	Zib 11	K-SSt	VA			
31	70	R	10	Zib 8	SSt	SL	20	LL2	3000
32	70	R	10	Zib 8	K-SSt	SL	20	LL2	3000
33	70	R	10	Zib 9	SSt	SL	20	LL2	3000
34	70	R	10	Zib 9	K-SSt	SL	20	LL2	3000
35	70	R	30	Zib 1	FIB 50				
36	70	R	30	Zib 7	FIB 50				
37	70	R	30	Mab 1	FIB 50				
38	70	R	30	Mab 2	FIB 50				
39	70	R	30	Mab 3	FIB 50				
40	70	R	30	Mab 4	FIB 50	KWH			
41	70	R	30	Mab 7	FIB 50	LAMA			
42	70	R	30	Mab 8	FIB 50	LAMA			

Zement Nr.	CEM I Klinker-komponente in M.-%	CEM I Festigkeitsklasse R / N	Zib / Mab RC-Anteil in M.-%	Zib /Mab Nr./ Zuordnung	Zib / Mab Zusatz-information	Zib / Mab Zusatz-information	Kalkstein in M.-%	Kalkstein Zusatzinformation	Kalkstein Zusatzinformation
43	70	R	30	Zib 1	61 (WDH)				
44	70	R	30	Zib 1	72 (WDH)				
45	70	R	10	Zib 11	D-SSt	VA	20	LL2	3000
46	60	R	10	Zib 11	D-SSt	VA	30	LL2	3000
47	55	R	15	Zib 11	D-SSt	VA	30	LL2	3000
48	70	R	10	Zib 8	D-SSt	SL	20	LL2	3000
49	60	R	10	Zib 8	D-SSt	SL	30	LL2	3000
50	55	R	15	Zib 8	D-SSt	SL	30	LL2	3000
51	50	R	30	Zib 8	D-SSt	SL	20	LL2	3000
52			5	Zib 14	D-SSt 125	SL	95	CEM II/A-LL	42,5 N
53			10	Zib 14	D-SSt 125	SL	90	CEM II/A-LL	42,5 N
54			5	Zib 14	D-SSt 125	SL	95	CEM II/A-LL	52,5 N
55			10	Zib 14	D-SSt 125	SL	90	CEM II/A-LL	52,5 N
56			5	Zib 14	D-SSt 125	SL	95	CEM II/A-LL	52,5 R
57			10	Zib 14	D-SSt 125	SL	90	CEM II/A-LL	52,5 R
58			1,1	Zib 14	D-SSt 125	SL	98,9	CEM II/A-LL	52,5 R
59	90	R	10	Zib 14	D-SSt 125	SL			
60	90	N	10	Zib 14	D-SSt 125	SL			
61			5	Zib 15	D-SSt 250	SL	95	CEM II/A-LL	52,5 R
62			10	Zib 15	D-SSt 250	SL	90	CEM II/A-LL	52,5 R
63			1,1	Zib 15	D-SSt 250	SL	98,9	CEM II/A-LL	52,5 R
64	90	R	10	Zib 15	D-SSt 250	SL			
65	90	N	10	Zib 15	D-SSt 250	SL			
66			30	Zib1	FIB 50		70	CEM II/A-LL	42,5 N
67			30	Zib 7	FIB 50		70	CEM II/A-LL	42,5 N
68			30	Mab 1	FIB 50		70	CEM II/A-LL	42,5 N
69			30	Mab 2	FIB 50		70	CEM II/A-LL	42,5 N
70			30	Mab 3	FIB 50		70	CEM II/A-LL	42,5 N
71			30	Mab 7	FIB 50		70	CEM II/A-LL	42,5 N
72			30	Mab 8	FIB 50		70	CEM II/A-LL	42,5 N
73			30	Mab 4	FIB 50		70	CEM II/A-LL	42,5 N
74	50	R	30	Zib 1	FIB 50		20	LL2 - 7	7400 cm ² /g
75	50	R	30	Zib 7	FIB 50		20	LL2 - 7	7400 cm ² /g

Zement Nr.	CEM I Klinker-komponente in M.-%	CEM I Festigkeitsklasse R / N	Zib / Mab RC-Anteil in M.-%	Zib /Mab Nr./ Zuordnung	Zib / Mab Zusatz-information	Zib / Mab Zusatz-information	Kalkstein in M.-%	Kalkstein Zusatzinformation	Kalkstein Zusatzinformation
76	50	R	30	Mab 1	FIB 50		20	LL2 - 7	7400 cm ² /g
77	50	R	30	Mab 8	FIB 50		20	LL2 - 7	7400 cm ² /g
78			10	Zib 13	D-SSSt 125	PU	90	CEM II/A-LL	52,5 N
79			10	Zib 13	D-SSSt 125	PU	90	CEM II/A-LL	42,5 N
80			20	Zib 13	D-SSSt 125	PU	80	CEM II/A-LL	52,5 N
81			20	Zib 13	D-SSSt 125	PU	80	CEM II/A-LL	42,5 N
82	70	R	30	Mab 9	ca. 5000	7/22/ KWH			
83	70	R	30	Mab 10	ca. 5000	8/22/ KWH			
84	70	R	30	Mab 11	ca. 5000	9/22/ KWH			
85	70	R	30	Mab 12	ca. 5000	10/22/ KWH			
86	70	R	30	Mab 13	ca. 5000	11/22/ KWH			
87	70	R	30	Mab 14	ca. 5000	12/22/ KWH			
88	70	R	30	Mab 15	ca. 5000	7/22/ LAMA			
89	70	R	30	Mab 16	ca. 5000	8/22/ LAMA			
90	70	R	30	Mab 17	ca. 5000	9/22/ LAMA			
91	70	R	30	Mab 18	ca. 5000	10/22/ LAMA			
92	70	R	30	Mab 19	ca. 5000	11/22/ LAMA			
93	70	R	30	Mab 20	ca. 5000	12/22/ LAMA			
1	70	R	10	Zib 23	D < 125 µm	SL	20	LL (BV)	SP
2	70	N	10	Zib 23	D < 125 µm	SL	20	LL (BV)	SP
3	65	R	10	Zib 23	D < 125 µm	SL	25	LL (BV)	SP
4	65	N	10	Zib 23	D < 125 µm	SL	25	LL (BV)	SP
CEM II/B-M (Q-LL)	70	R (BV)	10	Zib 23	D < 125 µm	SL	20	LL (BV)	SP
CEM II/B-X (1)	<70	BV	>30	Mab 24	50/50	KWH			
CEM II/B-X (2)	<70	BV	>30	Mab 24	50/50	KWH			
CEM II/B-X (3)	<70	BV	>30	Mab 24	50/50	KWH			
CEM II/B-X (4)	<70	BV	>30	Mab 24	50/50	KWH			
5	70	R	10	Zib 23	GG-M	Grobgut gemahlen	20	LL 2	3000
6	70	R	10	Zib 23	D < 125 µm	Feingut FG gesiebt	20	ZS 10	7100

Zement Nr.	CEM I Klinker-komponente in M.-%	CEM I Festigkeitsklasse R / N	Zib / Mab RC-Anteil in M.-%	Zib /Mab Nr./ Zuordnung	Zib / Mab Zusatz-information	Zib / Mab Zusatz-information	Kalkstein in M.-%	Kalkstein Zusatzinformation	Kalkstein Zusatzinformation
7	70	R	10	Zib 23	GG-M	Grobgut gemahlen	20	ZS 10	7100
8	70	R	10	Zib 23	D < 125 µm	Feingut FG gesiebt	20	LL 2 - 7	7400
9	70	R	10	Zib 23	GG-M	Grobgut gemahlen	20	LL 2 - 7	7400
10	90	BV1					10	LL 2	3000
11	90	BV1	10	Zib 23	D < 125 µm	Feingut FG gesiebt			
12	90	BV1	10	Zib 23	GG-M	Grobgut gemahlen			
13	90	BV2					10	LL 2	3000
14	90	BV2					10	LL 2 - 7	7400
15	90	BV2					10	ZS 10	7100
16	90	BV2	10	Mab 24	gemahlen	KWH (50/50)			
17	70	R	30	Mab 24	gemahlen	KWH (50/50)			
18	60	R	40	Mab 24	gemahlen	KWH (50/50)			
19	70	R	30	Zib 23	D < 125 µm	Feingut FG gesiebt			
20	70	R	30	Zib 23	GG-M	Grobgut gemahlen			

Tabellen A-4 Untersuchungsberichte aus den Umweltverträglichkeitsuntersuchungen am ziegelhaltigen Brech- sand Mab 24



Probenbegleitprotokoll

Nummer der Feldprobe:.....
Tag und Uhrzeit der Probenahme:.....
Probenahmeprotokoll-Nr.:.....

Probenvorbehandlung (von der Feldprobe zur Laborprobe):

Untersuchung	physikalische	<input type="radio"/>	Verjüngung:	Fraktionierendes Teilen	<input type="radio"/>
auf folgende	anorganisch chemische	<input type="radio"/>		Kegeln und Vierteln	<input type="radio"/>
Parameter:	organisch chemische	<input type="radio"/>		Cross-Riffling	<input type="radio"/>
	leichtflüchtige (überschichtet)	<input type="radio"/>		Sonstige:
	biologische	<input type="radio"/>			
Grobsortierung	<input type="radio"/>	Klassierung	<input type="radio"/>	Zerkleinerung	<input type="radio"/>

Kommentierung.....
 separierte Fraktion (z.B. Art, Anteil, separate Teilprobe):
 Probengefäß:..... Transportbedingungen (z.B. Kühlung):
 Größe der Laborprobe: Volumen [L]..... oder Masse [kg].....

Probenvorbereitung (von der Laborprobe zur Prüfprobe):

Nummer der Laborprobe: **2401892A-001**
Tag und Uhrzeit der Anlieferung: **17.01.2024**
Probenahmeprotokoll:

Ordnungsgemäße Probenanlieferung: ja,

Sortierung:	nein	separierte Stoffgruppen:
Zerkleinerung:	nein	Teilvolumen [L] / Teilmassen [kg]:
Trocknung:	nein	Art:
Siebung:	nein	Siebschnitt: [mm]
		Siebdurchgang: [g]
		Siebrückstand: [g]
Teilung/Homogenisierung:		Analyse Siebdurchgang <input type="radio"/>
fraktionierendes Teilen	ja	Analyse Siebrückstand <input type="radio"/>
Rotationsteiler	nein	Analyse gesamt <input checked="" type="radio"/>
Kegeln und Vierteln	nein	
Riffelteiler	nein	
Cross-Riffling	nein	
Anzahl der Prüfproben: 1	Rückstellprobe ja	Probenmenge [g]: ca.1000

Probenvorbereitung (von der Prüfprobe zur Messprobe):

untersuchungsspezifische	chemische Trocknung:	ja	Lufttrocknung:	nein
Trocknung der Prüfproben	Trocknung 105 °C:	ja	Gefriertrocknung:	nein
untersuchungsspezifische				
Feinzerkleinerung der Prüfproben:	Mahlen	<input checked="" type="radio"/>	Schneiden	<input type="radio"/>
	Endfeinheit:	250 [µm]	[µm]
	Kontrollsiebung:	ja <input type="radio"/>	nein	<input checked="" type="radio"/>

 Datum, Unterschrift Probenehmer

19.01.2024

 Datum, Unterschrift Labor

P
r
o
b
e
n
e
h
m
e
r

L
a
b
o
r

Erklärung der Untersuchungsstelle

1.

Untersuchungsinstitut: **Dr. Graner & Partner GmbH**
 Anschrift: **Lochhausener Str. 205**
81249 München
 Ansprechpartner: **Sven Blau**
 Telefon/Telefax: **07254-98542-41 / 07254-98542-45**
 E-Mail: **s.blau@labor-graner.de**

2.

Prüfbericht – Nr.: **2401892A**
 Prüfberichtsdatum: **19.01.2024**
 Probenahmeprotokoll nach PN 98 liegt vor: ja nein
 Auftraggeber: **Scherer & Kohl GmbH & Co. KG**
 Anschrift: **Rheinhorststr. 63**
67071 Ludwigshafen

3. Sämtliche gemessenen und im Untersuchungsbericht aufgeführten Parameter wurden nach den in Anhang 4 der geltenden DepV vorgegebenen

Untersuchungsmethoden durchgeführt: ja teilweise
 Gleichwertige Verfahren angewandt: nein ja
 Parameter/Normen: siehe Prüfbericht

Das Prüfinstitut ist für die im Bericht aufgeführten Untersuchungsmethoden nach DIN EN ISO/IEC 17025, Ausgabe März 2018, akkreditiert:

nach dem Fachmodul Abfall von Deutsches Akkreditierungssystem Prüfwesen GmbH notifiziert:

Es wurden Untersuchungen von einem Fremdlabor durchgeführt: ja nein

Parameter:

Fremdlabor:

Anschrift:

Akkreditierung DIN EN ISO/IEC 17025 Notifizierung Fachmodul Abfall

München, 19.01.2024



 Unterschrift der Untersuchungsstelle

Akkreditiertes Prüflabor nach DIN EN ISO 17025: 2018-03 · D-PL-18601-01-00

Arzneimittel, Lebensmittel, Kosmetika, Bedarfsgegenstände, Wasser, Boden, Luft, Medizinprodukte
 Analytik, Entwicklung, Qualitätskontrolle, Beratung, Sachverständigengutachten, amtliche Gegenproben, Mikrobiologie, Arzneimittelzulassung,
 Abgrenzungsfragen AMG/LFBG

Probenbezeichnung:	MP Brechsand			
Probenahmedatum:	15.01.2024			
Labornummer:	2401892-001			
Material:	Feststoff, Gesamtfraktion			
	Gehalt	Einheit	BG	Verfahren
pH-Wert (Suspension in CaCl ₂ -Lösung)	11,6			DIN EN 15933: 2012-11
Trockenrückstand	93	%		DIN EN 14346: 2007-03
Cyanid gesamt	u.d.B.	mg/kg TS	0,2	DIN ISO 17380: 2013-10
Arsen	8,4	mg/kg TS	1	DIN EN ISO 11885: 2009-09
Blei	12	mg/kg TS	0,2	DIN EN ISO 11885: 2009-09
Cadmium	0,17	mg/kg TS	0,1	DIN EN ISO 11885: 2009-09
Chrom	14	mg/kg TS	0,2	DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kupfer	6,7	mg/kg TS	0,2	DIN EN ISO 11885: 2009-09
Nickel	8,9	mg/kg TS	0,5	DIN EN ISO 11885: 2009-09
Quecksilber	u.d.B.	mg/kg TS	0,1	DIN EN ISO 12846: 2012-08
Thallium	u.d.B.	mg/kg TS	0,2	DIN EN ISO 11885: 2009-09
Vanadium	16	mg/kg TS	2	DIN EN ISO 11885: 2009-09
Zink	54	mg/kg TS	0,2	DIN EN ISO 11885: 2009-09
TOC	0,25	% TS	0,1	DIN EN 15936: 2012-11
EOX	u.d.B.	mg/kg TS	0,5	DIN 38414-17: 2017-01
Kohlenwasserstoffe	u.d.B.	mg/kg TS	50	DIN EN 14039: 2005-01
Kohlenwasserstoffe C10 - C22	u.d.B.	mg/kg TS	50	DIN EN 14039: 2005-01
Benzol	u.d.B.	mg/kg TS	0,1	DIN EN ISO 22155: 2016-07
Toluol	u.d.B.	mg/kg TS	0,1	DIN EN ISO 22155: 2016-07
Ethylbenzol	u.d.B.	mg/kg TS	0,1	DIN EN ISO 22155: 2016-07
m-Xylol + p-Xylol	u.d.B.	mg/kg TS	0,1	DIN EN ISO 22155: 2016-07
Styrol	u.d.B.	mg/kg TS	0,1	DIN EN ISO 22155: 2016-07
o-Xylol	u.d.B.	mg/kg TS	0,1	DIN EN ISO 22155: 2016-07
Cumol	u.d.B.	mg/kg TS	0,1	DIN EN ISO 22155: 2016-07
Summe BTEX	n.b.	mg/kg TS		berechnet

BG: Bestimmungsgrenze

KbE: Koloniebildende Einheiten

n.a.: nicht analysierbar

n.b.: nicht berechenbar

n.n.: nicht nachweisbar

u.d.B.: unter der Bestimmungsgrenze

HS: Headspace

fl./fl.-Extr.: flüssig-flüssig-Extraktion

*: Fremdvergabe

Probenbezeichnung:	MP Brechsand			
Probenahmedatum:	15.01.2024			
Labornummer:	2401892-001			
Material:	Feststoff, Gesamtfraktion			
	Gehalt	Einheit	BG	Verfahren
1,1-Dichlorethen	u.d.B.	mg/kg TS	0,2	DIN EN ISO 22155: 2016-07
Dichlormethan	u.d.B.	mg/kg TS	0,5	DIN EN ISO 22155: 2016-07
trans-1,2-Dichlorethen	u.d.B.	mg/kg TS	0,2	DIN EN ISO 22155: 2016-07
1,1-Dichlorethan	u.d.B.	mg/kg TS	0,2	DIN EN ISO 22155: 2016-07
cis-1,2-Dichlorethen	u.d.B.	mg/kg TS	0,2	DIN EN ISO 22155: 2016-07
1,2-Dichlorethan	u.d.B.	mg/kg TS	0,5	DIN EN ISO 22155: 2016-07
Trichlormethan	u.d.B.	mg/kg TS	0,1	DIN EN ISO 22155: 2016-07
1,1,1-Trichlorethan	u.d.B.	mg/kg TS	0,1	DIN EN ISO 22155: 2016-07
Tetrachlormethan	u.d.B.	mg/kg TS	0,1	DIN EN ISO 22155: 2016-07
Trichlorethen	u.d.B.	mg/kg TS	0,1	DIN EN ISO 22155: 2016-07
Tetrachlorethen	u.d.B.	mg/kg TS	0,1	DIN EN ISO 22155: 2016-07
Summe LHKW	n.b.	mg/kg TS		berechnet
Naphthalin	0,035	mg/kg TS	0,01	DIN ISO 18287: 2006-05
Acenaphthylen	0,011	mg/kg TS	0,01	DIN ISO 18287: 2006-05
Acenaphthen	0,079	mg/kg TS	0,01	DIN ISO 18287: 2006-05
Fluoren	0,11	mg/kg TS	0,01	DIN ISO 18287: 2006-05
Phenanthren	0,63	mg/kg TS	0,01	DIN ISO 18287: 2006-05
Anthracen	0,13	mg/kg TS	0,01	DIN ISO 18287: 2006-05
Fluoranthren	0,89	mg/kg TS	0,01	DIN ISO 18287: 2006-05
Pyren	0,61	mg/kg TS	0,01	DIN ISO 18287: 2006-05
Benz(a)anthracen	0,34	mg/kg TS	0,01	DIN ISO 18287: 2006-05
Chrysen	0,29	mg/kg TS	0,01	DIN ISO 18287: 2006-05
Benzo(b)fluoranthren	0,35	mg/kg TS	0,01	DIN ISO 18287: 2006-05
Benzo(k)fluoranthren	0,12	mg/kg TS	0,01	DIN ISO 18287: 2006-05
Benzo(a)pyren	0,25	mg/kg TS	0,01	DIN ISO 18287: 2006-05
Indeno(123-cd)pyren	0,18	mg/kg TS	0,01	DIN ISO 18287: 2006-05
Dibenz(ah)anthracen	0,053	mg/kg TS	0,01	DIN ISO 18287: 2006-05
Benzo(ghi)perylen	0,17	mg/kg TS	0,01	DIN ISO 18287: 2006-05
Summe PAK (nach EPA)	4,248	mg/kg TS		berechnet
Summe PAK (ohne Naphthalin)	4,213	mg/kg TS		berechnet

Probenbezeichnung:	MP Brechsand			
Probenahmedatum:	15.01.2024			
Labornummer:	2401892-001			
Material:	Feststoff, Gesamtfraction			
	Gehalt	Einheit	BG	Verfahren
PCB Nr. 28	u.d.B.	mg/kg TS	0,005	DIN EN 15308: 2016-12
PCB Nr. 52	u.d.B.	mg/kg TS	0,005	DIN EN 15308: 2016-12
PCB Nr. 101	u.d.B.	mg/kg TS	0,005	DIN EN 15308: 2016-12
PCB Nr. 153	u.d.B.	mg/kg TS	0,005	DIN EN 15308: 2016-12
PCB Nr. 138	u.d.B.	mg/kg TS	0,005	DIN EN 15308: 2016-12
PCB Nr. 180	u.d.B.	mg/kg TS	0,005	DIN EN 15308: 2016-12
Summe PCB	n.b.	mg/kg TS		berechnet

Probenbezeichnung:	MP Brechsand			
Probenahmedatum:	15.01.2024			
Labornummer:	2401892-001			
Material:	Feststoff, Gesamtfraction			
	Gehalt	Einheit	BG	Verfahren
Bestimmungen im Eluat - (DIN EN 12457-4: 2003-01)				
pH-Wert	11,5			DIN EN ISO 10523: 2012-04
Elektrische Leitfähigkeit	1200	µS/cm		DIN EN 27888: 1993-11
Chlorid	33	mg/l	1	DIN EN ISO 10304-1: 2009-07
Sulfat	240	mg/l	2	DIN EN ISO 10304-1: 2009-07
Cyanid gesamt	0,0054	mg/l	0,005	DIN EN ISO 14403: 2012-10
Arsen	u.d.B.	µg/l	2,5	DIN EN ISO 17294-2: 2017-01
Blei	u.d.B.	µg/l	2,5	DIN EN ISO 17294-2: 2017-01
Cadmium	u.d.B.	µg/l	0,5	DIN EN ISO 17294-2: 2017-01
Chrom	22	µg/l	5	DIN EN ISO 17294-2: 2017-01
Kupfer	u.d.B.	µg/l	10	DIN EN ISO 17294-2: 2017-01
Nickel	u.d.B.	µg/l	10	DIN EN ISO 17294-2: 2017-01
Quecksilber	u.d.B.	µg/l	0,05	DIN EN ISO 12846: 2012-08
Thallium	u.d.B.	µg/l	0,5	DIN EN ISO 17294-2: 2017-01
Zink	u.d.B.	µg/l	10	DIN EN ISO 17294-2: 2017-01
Phenolindex	u.d.B.	mg/l	0,008	DIN EN ISO 14402: 1999-12

Tabelle A-5 Frischbetoneigenschaften und Betondruckfestigkeiten

Beton	Zement	Frischbetonroh-dichte [kg/m ³]	Luftporen-gehalt [Vol.-%]	Ausbreit-maß [mm]	Verdich-tungsmaß [-]	28d-Druck-festigkeit [MPa]
Betone B1: z = 300 kg/m ³ , w/z = 0,60						
B1	RZ 4	2,31	2,9	365	-	39,8
B1	RZ 13	2,33	2,6	375	-	42,1
B1	RZ 15	2,31	3,0	390	-	36,6
B1	RZ 19	2,33	2,8	355	-	38,4
B1	RZ 20	2,31	3,3	390	-	39,7
B1	RZ 40	2,34	2,3	365	-	41,7
B1	RZ 68	2,30	2,7	385	-	24,6
B1	RZ 66	2,27	2,8	385	-	(8,8)
B1	RZ 67	2,27	2,8	395	-	(8,1)
B1	RZ 72	2,28	4,0	390	-	22,5
B1	RZ 74	2,20	2,4	370	-	24,7
B1	RZ 75	2,33	2,8	420	-	24,9
B1	RZ 76	2,34	2,1	385	-	24,7
B1	RZ 77	2,31	2,5	395	-	24,3
B1	BV 1 (CEM II/B-M (Q-LL))	2,32	2,1	380	-	41,8
B1	BV 2 (CEM II/B-X)	2,32	2,4	360	-	44,9
B1	BV 11 (CEM II/C-M (Q-LL))	2,33	1,9	370	-	38,1
Betone B2: z = 320 kg/m ³ , w/z = 0,50						
B2	BV 1 (CEM II/B-M (Q-LL))	2,38	1,6	405	1,2	60,1
B2	BV 2 (CEM II/B-X)	2,37	1,7	370	1,3	60,8
B2	BV 11 (CEM II/C-M (Q-LL))	2,37	2,0	375	-	55,2
Luftporenbetone B3: z = 320 kg/m ³ , w/z = 0,50						
B3	BV 1 (CEM II/B-M (Q-LL))	2,14	4,5 - 5,2	345	-	44,8
B3	BV 2 (CEM II/B-X)	2,24	5,8	385	--	37,8
B3	BV 11 (CEM II/C-M (Q-LL))	2,28	5,3	405	-	38,9

-: nicht bestimmt

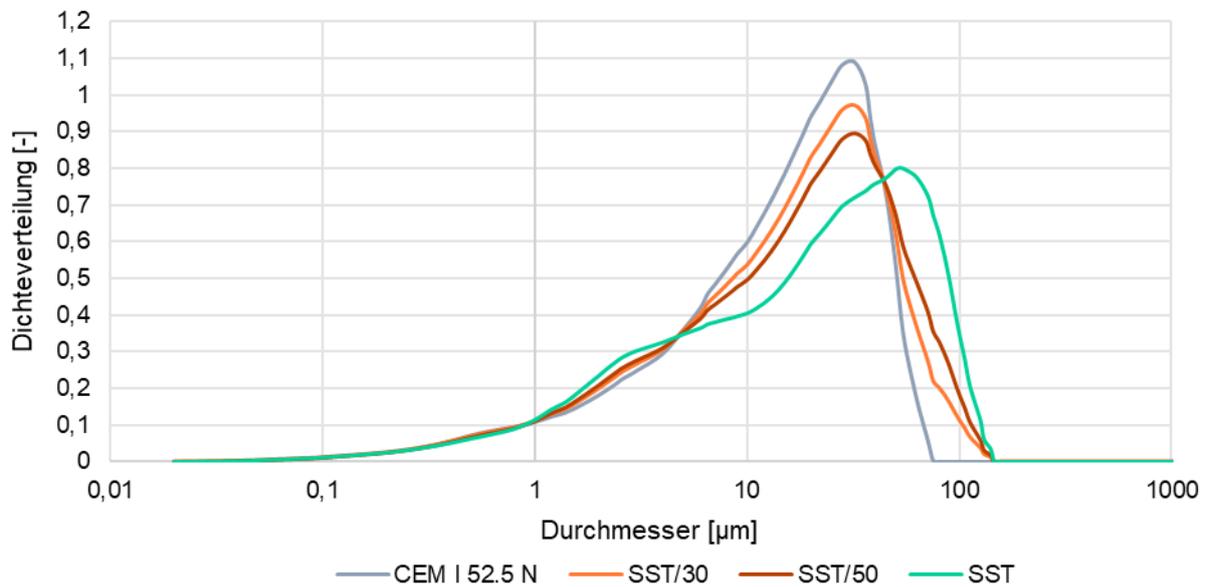
B Bilder

Bild B-1 Korngrößenverteilungen aus [16]: Dichteverteilungen von Ausgangsstoffen (CEM I als Klinkerkomponente, Ziegelschleifstaub (SST) als puzzolanischer Hauptbestandteil) sowie R-Zementen mit 30 bzw. 50 M.-% Ziegelschleifstaub in Kombination mit CEM I 52,5 N

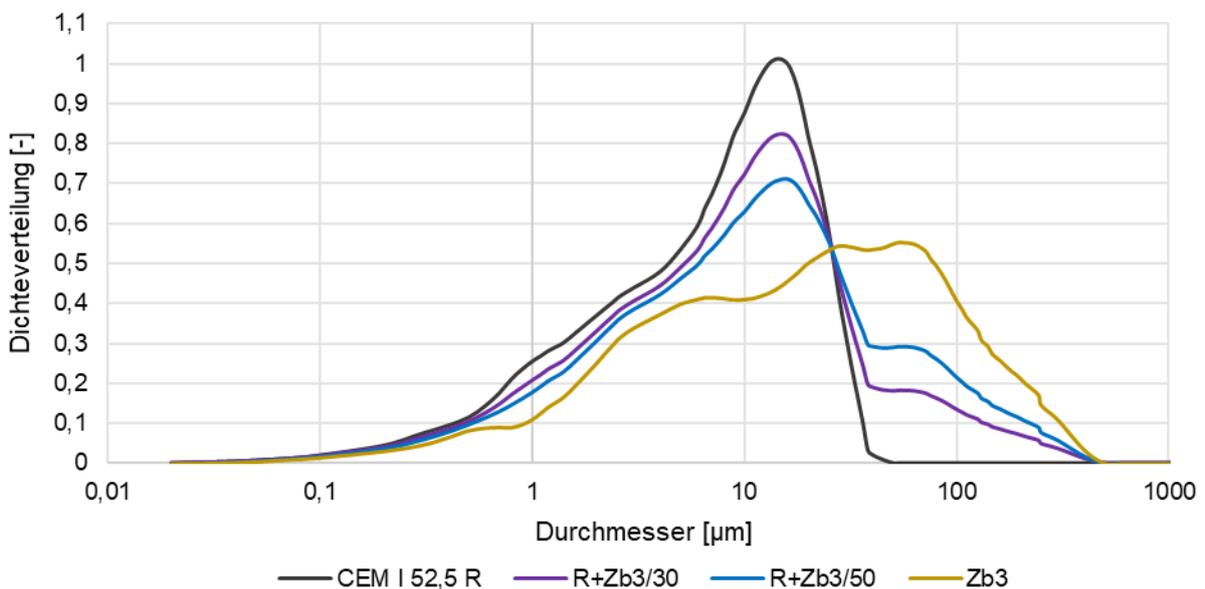


Bild B-2 Korngrößenverteilungen aus [16]: Dichteverteilungen von Ausgangsstoffen (CEM I als Klinkerkomponente, gemahlener Ziegelbruch (Zb3) als puzzolanischer Hauptbestandteil) sowie R-Zementen mit 30 bzw. 50 M.-% Ziegel in Kombination mit CEM I 52,5 R

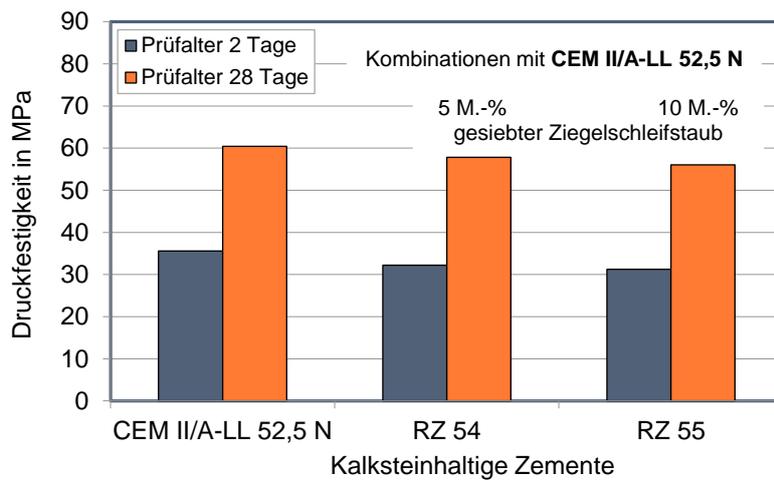


Bild B-3 Druckfestigkeit kalksteinhaltiger R-Zemente mit einem RC-Anteil von 5 M.-% bzw. 10 M.-% Ziegelschleifstaub (< 125 µm) sowie 95 M.-% bzw. 90 M.-% PKZ als Klinker- und Kalksteinkomponente, Prüfalter: 2d und 28d, CEM II/A-LL als Referenz ohne RC

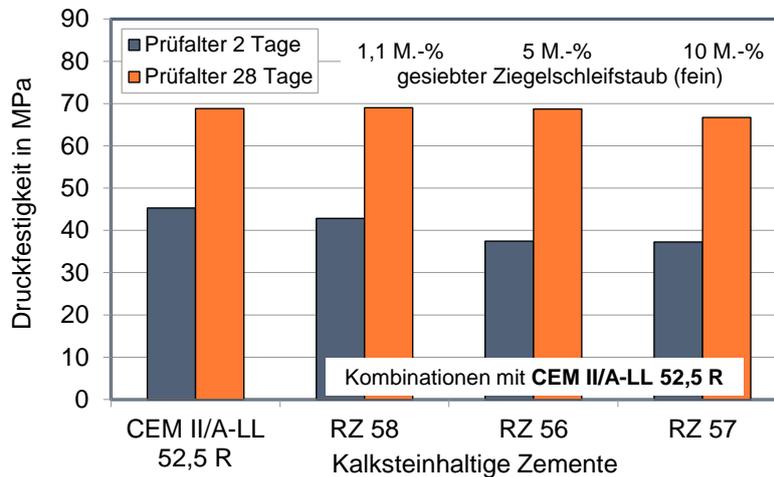


Bild B-4 Druckfestigkeit kalksteinhaltiger R-Zemente mit einem RC-Anteil von 1,1 M.-%, 5 M.-% bzw. 10 M.-% Ziegelschleifstaub (< 125 µm) sowie PKZ als Klinker- und Kalksteinkomponente, Prüfalter: 2d und 28d, CEM II/A-LL als Referenz ohne RC

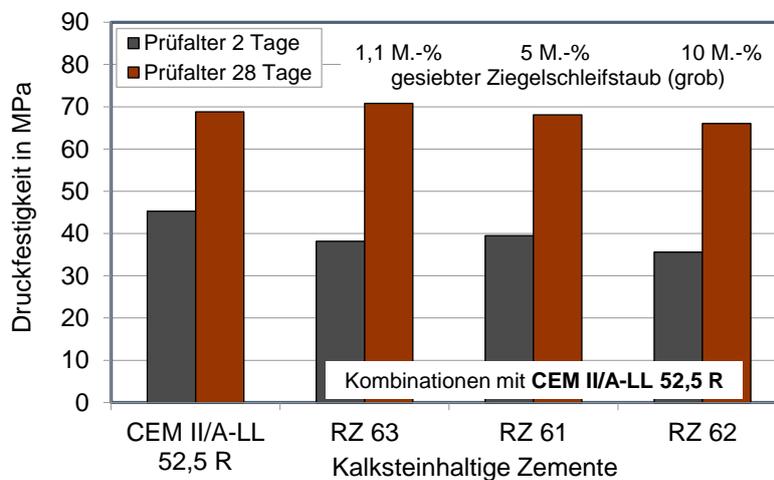


Bild B-5 Druckfestigkeit kalksteinhaltiger R-Zemente mit einem RC-Anteil von 1,1 M.-%, 5 M.-% bzw. 10 M.-% Ziegelschleifstaub (< 250 µm) sowie PKZ als Klinker- und Kalksteinkomponente, Prüfalter: 2d und 28d, CEM II/A-LL als Referenz ohne RC

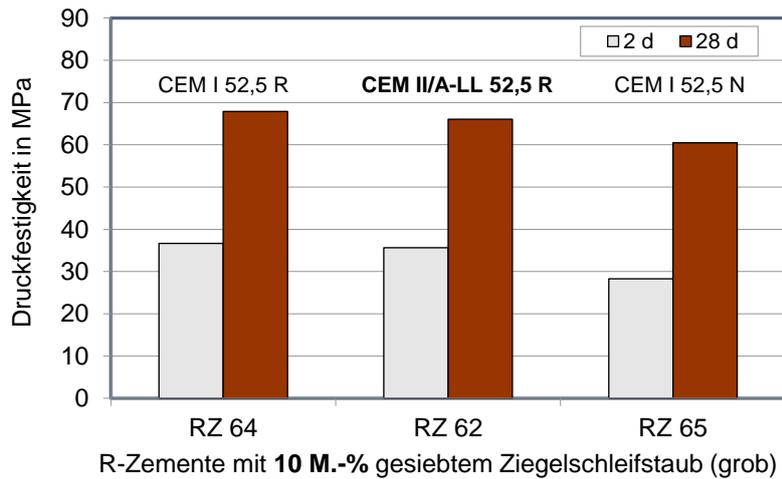


Bild B-6 Druckfestigkeit der R-Zemente mit einem RC-Anteil von 10 M.-% Ziegelschleifstaub (< 250 µm) in Kombination mit 90 M.-% CEM I bzw. CEM II/A-LL jeweils unterschiedlicher Festigkeitsklassen, Prüfalalter: 2d und 28d

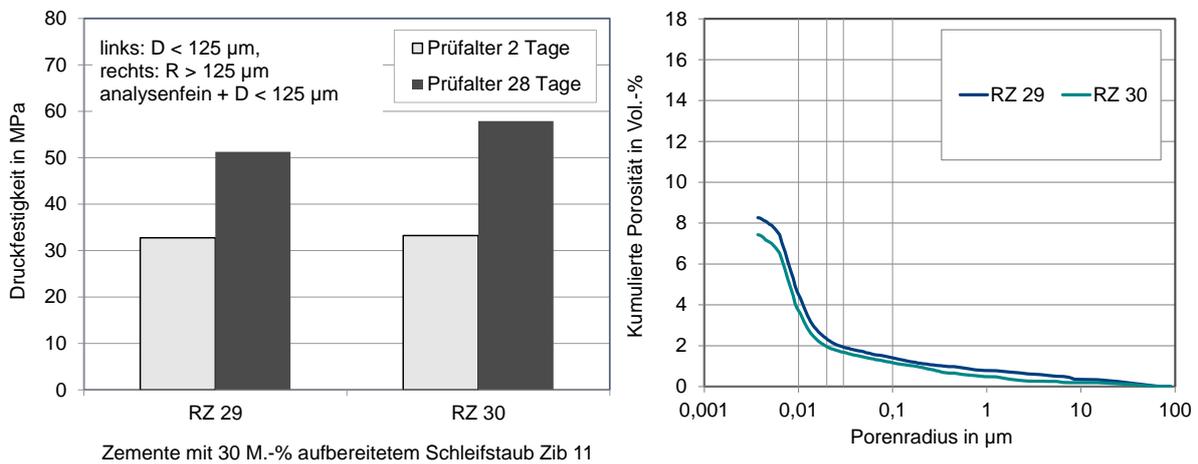


Bild B-7 Druckfestigkeit und Porengrößenverteilung am Normmörtel im Prüfalalter von 28 Tagen, Vergleich ziegelhaltiger Zemente mit 30 M.-% ungesiebttem Schleifstaub (RZ 29, inkl. Abpaltzer) bzw. gesiebttem und selektiv gemahlenem Schleifstaub (RZ 30, Rückstand auf Analysenfeinheit gemahlen)

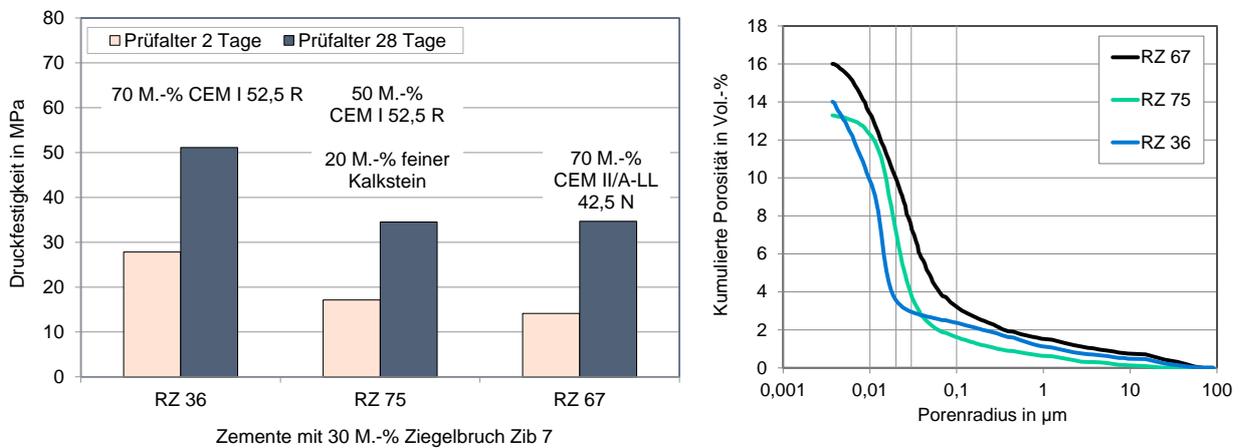


Bild B-8 Klinkereffiziente R-Zemente mit einem RC-Anteil von jeweils 30 M.-% Ziegelbruch Zib 7 im Vergleich der Druckfestigkeiten, Prüfalalter: 2d und 28d, Kombinationen des RC-Materials mit 70 M.-% CEM I, mit 70 M.-% CEM I und Kalkstein sowie mit 70 M.-% CEM II/A-LL

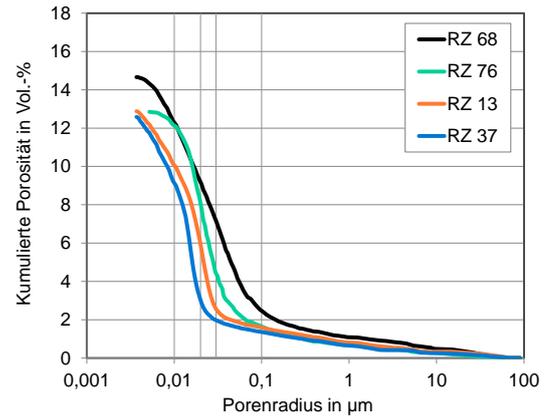
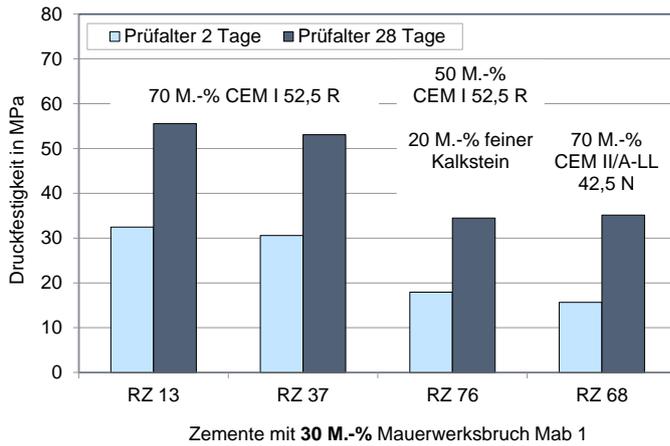


Bild B-9 Klinkereffiziente R-Zemente mit einem RC-Anteil von jeweils 30 M.-% Mauerwerksbruch Mab 1 im Vergleich der Druckfestigkeiten, Prüfalter: 2d und 28d, Kombinationen des RC-Materials mit 70 M.-% CEM I, mit 70 M.-% CEM I und Kalkstein sowie mit 70 M.-% CEM II/A-LL

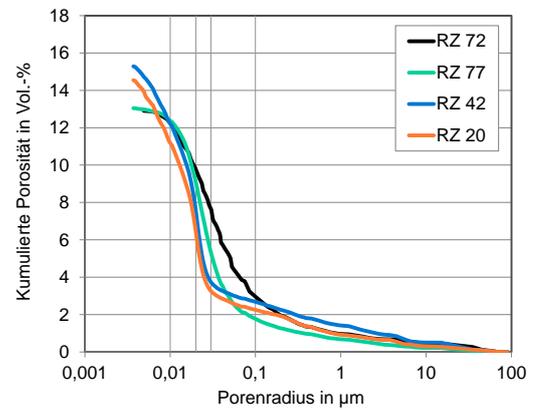
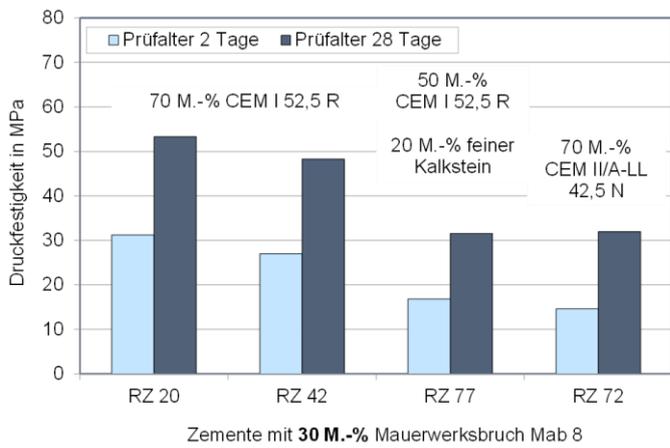


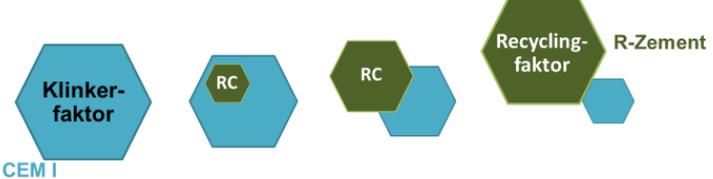
Bild B-10 Klinkereffiziente R-Zemente mit einem RC-Anteil von jeweils 30 M.-% Mauerwerksbruch Mab 8 im Vergleich der Druckfestigkeiten, Prüfalter: 2d und 28d, Kombinationen des RC-Materials mit 70 M.-% CEM I, mit 70 M.-% CEM I und Kalkstein sowie mit 70 M.-% CEM II/A-LL

Was trägt zur zirkulären Wertschöpfung bei? vdz

Zentrale Fragen im Verbund

Zementwerke:

- Wie hoch ist der **Anteil ziegelhaltiger RC -Baustoffe im R-Zement?** (Recyclingfaktor vs. Klinkerfaktor)
- Wie sind diese RC-Baustoffe zusammengesetzt?
- Welche Eigenschaften haben diese **RC-Baustoffe** im Zement?



5 REZEMENT

Was trägt zur zirkulären Wertschöpfung bei? vdz

Zentrale Fragen im Verbund

Recyclingwerke:

- Wie hoch ist der **Ziegelanteil in den RC-Stoffströmen?** (RC-Gesteinskörnungen, rezyklierte Feinstoffe, Recyclingmehle)
- Wie sind diese RC-Ziegel zusammengesetzt?
- Welche Eigenschaften haben diese **RC-Ziegel** im Zement?



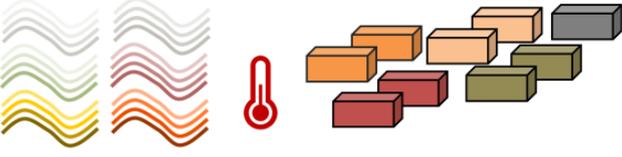
6 REZEMENT

Was trägt zur zirkulären Wertschöpfung bei? vdz

Zentrale Fragen im Verbund

Ziegelwerke:

- Wie hoch ist der **calcinierte Tonanteil im RC-Ziegel?** (Ziegelmauerwerk, Ziegelbruch, Ziegelschleifstaub)
- Wie sind diese Ziegeltonne zusammengesetzt?
- Welche Eigenschaften haben diese **calcinierten Tone** im Zement?



7 REZEMENT

Bild B-11 Zentrale Fragen im Verbund: Quelle: ReMIN-Abschlusskonferenz

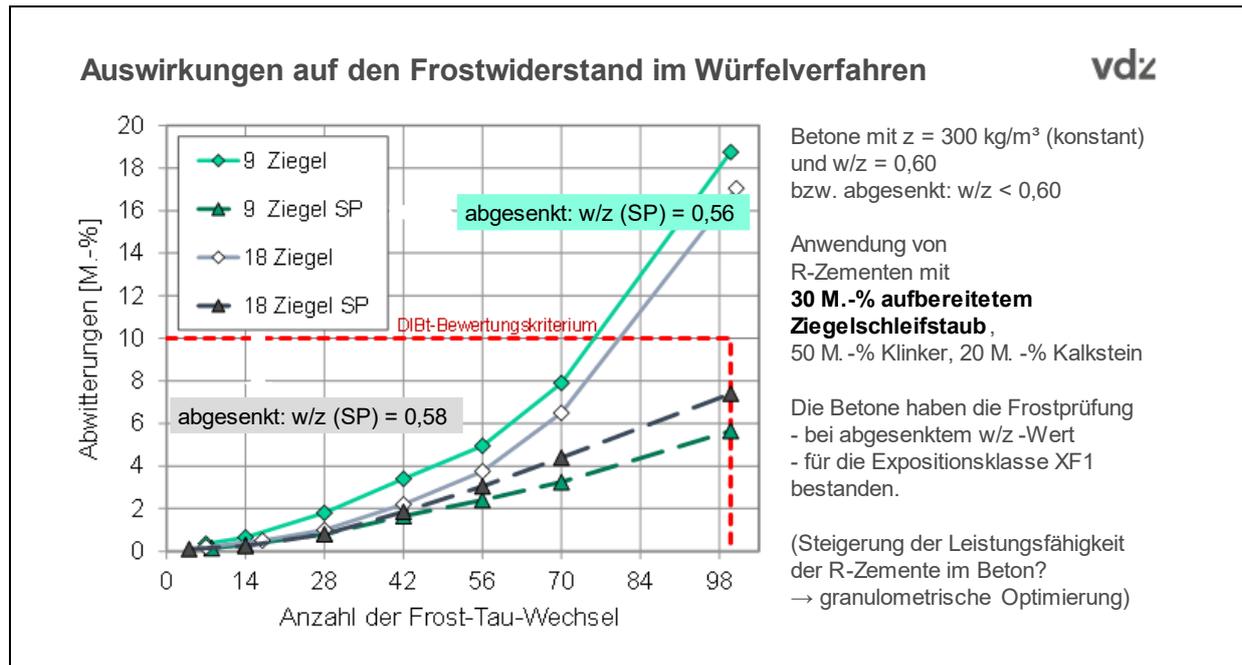


Bild B-12 Aus dem DBU-Projekt „Granulometrische Optimierung klinkereffizienter Zemente – Effekte auf die Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit von Beton“ (AZ 34647/01, VDZ Düsseldorf, FIB Weimar, 2023) [19]

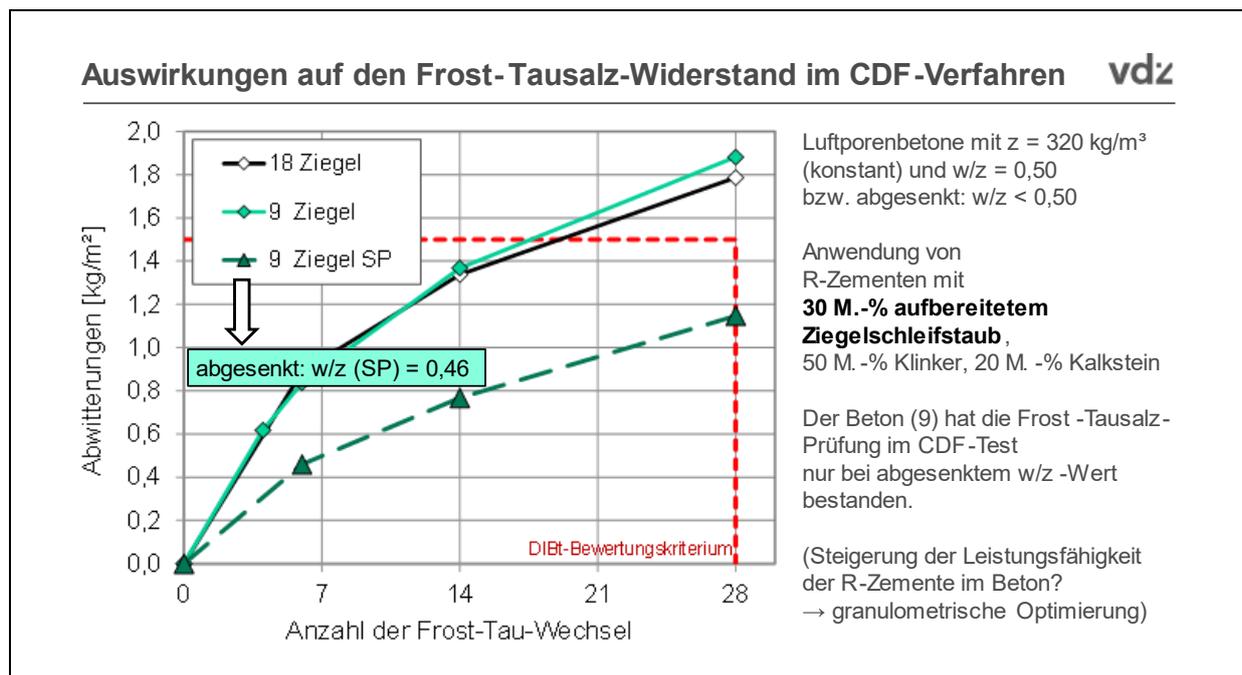


Bild B-13 Aus dem DBU-Projekt „Granulometrische Optimierung klinkereffizienter Zemente – Effekte auf die Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit von Beton“ (AZ 34647/01, VDZ Düsseldorf, FIB Weimar, 2023) [19]