

BBSR-  
Online-Publikation  
67/2024

# Hydratation und Porengefüge bei Verwendung RC-haltiger Zemente

von

Dr. Christoph Müller  
Katrin Severins



# 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

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wohnen, Stadtentwicklung  
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**ZUKUNFT BAU**  
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-20.04

Projektlaufzeit: 07.2021 bis 06.2023

## IMPRESSUM

### Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31–37  
53179 Bonn

### Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“  
Daniel Wöffen  
daniel.woeffen@bbr.bund.de

### Autorinnen und Autoren

VDZ Technology gGmbH, Düsseldorf  
Dr. Christoph Müller (Projektleitung)  
christoph.mueller@vdz-online.de

Katrin Severins  
katrin.severins@vdz-online.de

### Redaktion

VDZ Technology gGmbH, Düsseldorf  
Dr. Christoph Müller

### Stand

Januar 2024

### Gestaltung

VDZ Technology gGmbH, Düsseldorf  
Katrin Severins

### Bildnachweis

Titelbild: Titelbild: VDZ Technology gGmbH, Düsseldorf

### Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

### Zitierweise

Müller, Christoph; Severins, Katrin, 2024: 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.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Normungs- und Zulassungsverfahren für RC-haltige Zemente und ihre Bestandteile</b>	<b>8</b>
2.1	Bauaufsichtliche Zulassungen von klinkereffizienten Zementen und Zementen mit rezyklierten Feinststoffen als Hauptbestandteil	8
2.2	Stand der Normung zum Einsatz von Feinanteilen aus dem Betonrecycling als Zementbestandteil	8
2.3	Natürliche getemperte Puzzolane als Zementhauptbestandteil „Q“ nach DIN EN 197-1	9
<b>3</b>	<b>Aufbereitung und Untersuchung der feindispersen Ausgangsstoffe aus dem Recycling mineralischer Bauabfälle</b>	<b>10</b>
3.1	Reaktivität der RC-Ausgangsstoffe	10
3.2	Klassierung und Zerkleinerung der RC-Ausgangsstoffe auf Zementfeinheit	12
3.3	Sorptionsverhalten	14
<b>4</b>	<b>Herstellung der Versuchszemente und Untersuchung der Packungsdichte</b>	<b>16</b>
4.1	Herstellung der Versuchszemente	16
4.2	Untersuchungen zur Packungsdichte der R-Zemente	17
<b>5</b>	<b>Prüfungen am Zementmörtel</b>	<b>18</b>
5.1	Untersuchung der Druckfestigkeit der R-Zemente am Normmörtel gemäß DIN EN 196-1	18
5.2	Untersuchung der Druckfestigkeit von Zementmörteln mit vergleichbarer Konsistenz (SP) in Anlehnung an DIN EN 196-1	18
5.3	Porengrößenverteilungen am Festmörtel im Prüfalter von 28 Tagen	18
5.4	Hydratationswärmeentwicklung	19
<b>6</b>	<b>Darstellung der Ergebnisse und Diskussion - Teil 1: Eigenschaften von R-Zementen mit konstantem RC-Anteil unterschiedlicher Zusammensetzung</b>	<b>20</b>
6.1	Packungsdichte der R-Zemente in Abhängigkeit der granulometrischen Zusammensetzung	20
6.2	Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Wasseranspruch	22
6.3	Einflüsse auf die Druckfestigkeit der R-Zemente	25
6.3.1	Granulometrische Einflüsse	25
6.3.2	Stoffliche Einflüsse	27
6.4	Einflüsse auf die Porosität der Normmörtel im Alter von 28 Tagen	29
6.4.1	Granulometrische und stoffliche Einflüsse auf die Gesamtporosität	29
6.4.2	Stoffliche Einflüsse auf die Porenanteile $< 0,03 \mu\text{m}$ und $< 0,01 \mu\text{m}$	29
6.4.3	Zusammenhang zwischen Gesamtporosität und Druckfestigkeit	30
<b>7</b>	<b>Darstellung der Ergebnisse und Diskussion - Teil 2: Eigenschaften von R-Zement-Mörteln in Abhängigkeit des RC-Anteils</b>	<b>32</b>
7.1	Randbedingungen zur Herstellung von Mörteln mit plastischer Konsistenz unter Verwendung klinkerreduzierter R-Zemente	32
7.2	Wasseranspruch in Abhängigkeit der Zementzusammensetzung und der Zementpackungsdichte	33
7.3	Verarbeitbarkeit der Frischmörtel mit konstantem w/z-Wert in Abhängigkeit der Zementzusammensetzung und der Zementpackungsdichte	34
7.4	Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Zementzusammensetzung	35

7.5	Druckfestigkeit in Abhängigkeit des RC-Gehaltes und der Packungsdichte	37
7.6	Veränderung der w/z-Werte zur Einstellung der steifplastischen Mörtelkonsistenz (SP)	40
7.7	Einflüsse der Zusammensetzung der R-Zemente auf das Porengefüge der Normmörtel	42
7.8	Einflüsse der Zement- und Mörtelzusammensetzung auf das Porengefüge	44
7.9	Einflüsse des Porengefüges auf die Druckfestigkeit im Prüfalalter von 28 Tagen	46
7.10	Normmörtel und SP-Mörtel im Vergleich der Druckfestigkeit und der Gesamtporosität	47
7.11	Hydratationswärme an R-Zement-Normmörteln in Abhängigkeit der RC-Materialien	49
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>54</b>
<b>9</b>	<b>Anhang</b>	<b>56</b>
<b>10</b>	<b>Tabellen- und Abbildungsverzeichnis (Abschnitte 1 bis 8)</b>	<b>67</b>
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>71</b>
<b>12</b>	<b>Bezug des Forschungsthemas zur aktuellen gesellschaftspolitischen Situation</b>	<b>75</b>
<b>13</b>	<b>Ergebnisverwertung und Plan zum Ergebnistransfer</b>	<b>75</b>
13.1	Verwendbarkeit der Ergebnisse für die Entwicklung zukünftiger Produkte	75
13.2	Verwertung der Ergebnisse bei Instituten	75
13.3	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	76
13.4	Verwertungsmöglichkeiten außerhalb des Vorhabens (Institute, Unternehmen)	76

## **Kurzfassung**

Es wurden mehlfine Recyclingbaustoffe aus Ziegel, Mauerwerk und Beton und ihre Anwendung als Bestandteil im Zement untersucht. Die Recyclingmehle wurden mit Anteilen bis 50 M.-% mit CEM I gemischt. Es wurde untersucht, welche Porenverteilungen und Festigkeiten im Gefüge entstehen, wenn solche R-Zemente hydratisieren. Dabei wurden Einflüsse der Reaktivität und des Anteils der Recyclingmehle betrachtet. Außerdem wurden granulometrische Einflüsse auf die Packungsdichte und den Wasseranspruch erforscht.

Die Ergebnisse können von Betreibern eines Recyclingwerkes und von Zementherstellern genutzt werden.

Die zunehmende Substitution von Klinker durch Recyclingmehl führte in jedem Prüfalter zu einer Verringerung der Druckfestigkeit sowie zu einer Erhöhung der Gesamtporosität. So wurden z. B. die Normfestigkeiten der R-Zemente von ca. 50 MPa auf ca. 25 MPa verringert, wenn der RC-Anteil von 20 M.-% auf 50 M.-% angehoben wurde. Gleichzeitig nahm die Gesamtporosität von etwa 13 Vol.-% auf 18 Vol.-% zu. Granulometrische und stoffliche Effekte aus Recyclingmehl und Klinker überlagerten sich. Wurden beispielsweise 30 M.-% Ziegelbruch (hohe Feinheit, hohe Reaktivität) durch 30 M.-% groben Zementstein aus Altbeton ersetzt, so stieg bei Verwendung von jeweils 70 M.-% CEM I 52,5 R die Packungsdichte von etwa 0,44 auf 0,48 an und die Normfestigkeit verringerte sich von etwa 65 MPa auf etwa 50 MPa.

## **Abstract**

Flour-fine recycled building materials from clay brick, masonry and concrete and their use as a constituent in cement were investigated. The recycled fines were mixed with CEM I in proportions of up to 50 mass%. It was investigated which pore size distributions and strengths arise in the microstructure when such R-cements hydrate. The influences of the reactivity and the proportion of recycled fines were considered. In addition, granulometric influences on the packing density and the water demand were investigated. The results can be used by recycling plant operators and cement manufacturers.

The increasing substitution of clinker with recycled fines led to a reduction in compressive strength and an increase in the total porosity at every test age. For example, the standard strengths of the R cements were reduced from approx. 50 MPa to approx. 25 MPa when the RC content was increased from 20 mass% to 50 mass%. At the same time, the total porosity increased from approx. 13 vol.% to 18 vol.%. Granulometric and material effects from recycled fines and clinker overlapped. If, for example, 30 mass% clay brick (high fineness, high reactivity) was replaced by 30 mass% coarse hydrated cement paste from old concrete, the packing density increased from approx. 0.44 to 0.48 and the standard strength decreased from around 65 MPa to around 50 MPa when using 70 mass% CEM I 52.5 R in each case.

## 1 Einleitung

Zemente sind fein gemahlene Bindemittel für Mörtel und Beton, ihre Bestandteile sind anorganisch und nichtmetallisch. In Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung reagieren sie nach Zugabe von Wasser hydraulisch, latent hydraulisch oder puzzolanisch und bilden durch Hydratationsreaktionen ein stabiles Zementsteingefüge.

Brechsande und andere feindisperse Stoffe aus dem Recycling (kurz: RC) mineralischer Bauabfälle werden in Deutschland entweder zum Verfüllen verwendet (Beispiel Straßenbau) oder deponiert [1] [2] [3] [4] [5] [6]. Ihre Verwendung als Gesteinskörnungen in Konstruktionsbetonen ist in geringem Umfang erlaubt: Gemäß DIN 1045-2:2023-08 dürfen in einem Innenbauteilbeton feine rezyklierte Gesteinskörnungen des Typs 1 (Betonbruch) mit bis zu 20 Vol.-% der austauschbaren rezyklierten Gesteinskörnung eingesetzt werden. Die Verwendung derartiger Stoffe im Zement (d. h. als Bestandteil sog. R-Zemente) könnte einen alternativen Verwertungsweg darstellen, bedarf jedoch einer Zulassung für die Anwendung im Beton.

*Anmerkung: Zemente, die mit feindispersen Stoffen aus dem Recycling mineralischer Bauabfälle hergestellt werden bzw. sog. RC-haltige Zemente, werden in diesem Bericht als „R-Zemente“ bezeichnet.*

An feindispersen, mineralischen RC-Baustoffen, die je nach Recyclingregion, Rückbau- und Aufbereitungspraxis deutlich unterschiedliche Zusammensetzungen aufweisen können, wurden wesentliche Anwendungseigenschaften untersucht. Je nach Stoffstrommanagement eines Recyclingbetriebes können mineralische Bauabfälle nach mehrfacher Sortierung und Aufbereitung sowohl in ihren stofflichen Eigenschaften (z. B. hinsichtlich Reaktivität) als auch in ihren granulometrischen Eigenschaften (z. B. hinsichtlich Korngrößenverteilung) große Unterschiede aufweisen. Werden feindisperse Stoffe aus dem Recycling mineralischer Bauabfälle auf Zementfeinheit gemahlen und in einem Zement als Kompositmaterial angewendet, hat dies unmittelbare Auswirkungen auf die Reaktion des Zementes mit Wasser (Hydratation).

In diesem Projekt wurde insbesondere untersucht, welche Gefügedichte bzw. welche Porenverteilung sowie welche Festigkeit entstehen, wenn R-Zemente mit Wasser reagieren, sofern sie neben dem wesentlichen Hauptbestandteil Portlandzementklinker nennenswerte Gehalte alternativer Bestandteile, wie zum Beispiel gemahlene Brechsande aus Ziegelmauerwerk oder Beton, enthalten. Neben den üblichen zementtechnischen Eigenschaften wurde auch die Dispersität mechanisch aufbereiteter bzw. aktivierter RC-Baustoffe und R-Zemente betrachtet.

Aufgrund der Vielfalt verfügbarer RC-Materialien und Materialgemische wurde eine Bandbreite in der Praxis vorkommender, feindisperser Stoffe abgedeckt. Neben sortenreinen RC-Materialien (z. B. Zementstein aus Altbeton) wurden auch Materialgemische (z. B. Bauschutt aus Mauerwerksbruch) untersucht, wie sie in Recyclingwerken typischerweise produziert werden. Zudem wurden RC-Gemische im Labor hergestellt, um

- a) die Eigenschaften systematisch veränderter Gemisch-Zusammensetzungen zu untersuchen,
- b) die Einsatzpotenziale in der Zementindustrie anhand zementtechnischer Qualitätsparameter einzuordnen und
- c) die Potenziale höherer Recycling- und Verwertungsquoten aufzuzeigen.

Die erzielten Ergebnisse können gleichermaßen von Betreibern eines Recyclingwerkes und von Zementherstellern als Grundlage für konkrete Produktentwicklungen genutzt werden. Die Untersuchungen wurden in den Laboren der VDZ Technology gGmbH durchgeführt.

## 2 Normungs- und Zulassungsverfahren für RC-haltige Zemente und ihre Bestandteile

### 2.1 Bauaufsichtliche Zulassungen von klinkereffizienten Zementen und Zementen mit rezyklierten Feinststoffen als Hauptbestandteil

CEM II/C-M- und CEM VI-Zemente nach DIN EN 197-5 „Zement – Teil 5: Portlandkompositzement CEM II/C-M und Kompositzement CEM VI“ [7] weisen einen entsprechenden Anteil anderer Hauptbestandteile (z. B. Hüttensand, Flugasche, Kalkstein) auf, um Portlandzementklinker teilweise zu substituieren und somit CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Zementherstellung zu senken.

Unter Bezug auf diese Entwicklungen sowie in Anlehnung an die DIBt-Prüfpläne für Zulassungsprüfungen an Betonen mit CEM II/C-M-Zementen (Klinkergehalt 50 – 64 M.-%) richtet sich der Fokus dieses ZukunftBau-Forschungsprojektes entsprechend aus. In den Untersuchungen unter Verwendung von feindispersen Stoffen aus dem Recycling mineralischer Bauabfälle wurden R-Zemente mit 80 M.-% bis zu 50 M.-% Klinker einbezogen.

Sollen Zemente mit rezyklierten Feinststoffen als Hauptbestandteil für die Herstellung von Beton gemäß DIN EN 206 in Verbindung mit DIN 1045-2 in den in Deutschland üblichen Expositionsklassen XC1 bis XC4, XD1 bis XD3, XS1 bis XS3 und XF1 bis XF4 angewendet werden, so sind dauerhaftigkeitsrelevante Eigenschaften wie der Carbonatisierungs-, der Chlorideindring- und der Frostwiderstand sowie der Frost-Taumittel-Widerstand zu prüfen. Gefügedichte und Gefügeporosität hydratisierter Zemente wirken sich maßgeblich auf dauerhaftigkeitsrelevante Betoneigenschaften aus [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14]. Neben den Zementeigenschaften müssen auch die Betoneigenschaften in zulassungsfähigen Bereichen liegen. Die stoffliche und granulometrische Optimierung der Zementzusammensetzung kann dazu beitragen, die Entstehung eines dichten, undurchlässigen Porengefüges zu steuern und somit die Anforderungen der Bauaufsicht an die Dauerhaftigkeit eines Betons zu erfüllen [15] [16] [17] [18] [19] [20]. Zusätzlich wird die Umweltverträglichkeit und die Gleichmäßigkeit der rezyklierten Feinststoffe nachzuweisen sein [6].

*Anmerkung: Die Herstellung und Untersuchung von R-Betonen war nicht Gegenstand dieses Projektes. Die Forschungsergebnisse können jedoch in die Optimierung dauerhafter R-Betone einfließen.*

### 2.2 Stand der Normung zum Einsatz von Feianteilen aus dem Betonrecycling als Zementbestandteil

Während der Projektlaufzeit wurde ein Normungsverfahren zum Einsatz von Feianteilen aus dem Betonrecycling als Zementbestandteil eingeleitet. Ein Entwurf der Europäischen Norm EN 197-6 „Zement mit rezyklierten Baustoffen“ liegt vor [21]. In diesem werden Feianteile aus dem Betonrecycling, d. h. „Recyclingmehl“, als weiterer Hauptbestandteil „F“ definiert. Der Norm-Entwurf ermöglicht ggf. später die Aufnahme weiterer Stoffe. Der Hauptbestandteil „F“ wird bis maximal 20 M.-% im Zement einsetzbar sein (CEM II/A-F sowie CEM II/A-M, CEM II/B-M und CEM II/C-M).

Die Feianteile stellen ein Gemisch aus aufbereiteten/rezyklierten Altbetonen/Betonbruchmaterialien dar und bestehen in Teilen aus ursprünglichen Gesteinskörnungen (z. B. Kies und Sand) sowie aus hydratisierten und nicht hydratisierten Zementbestandteilen.

*Anmerkung: Im vorliegenden Bericht wurden die feindispersen Stoffe aus der selektiven Zerkleinerung von Altbeton (mittels Wälzmühle) als „Zementstein“ bezeichnet. Zementstein besteht im Wesentlichen aus leicht mahlbaren Hydratphasen des ursprünglichen Bindemittels, während die gröberen Aufbereitungsprodukte die Gesteinskörnungen und Sande des ursprünglichen Altbetons enthalten. Der in derartigen Aufbereitungsprozessen erzeugte Zementstein weist i. d. R. eine hohe, mit Zementen vergleichbare Feinheit auf, vgl. Abschnitt 3.2.*

### **2.3 Natürliche getemperte Puzzolane als Zementhauptbestandteil „Q“ nach DIN EN 197-1**

Mineralische RC-Ausgangsstoffe, die einen Massenanteil von mindestens 25 M.-% an reaktionsfähigem Siliciumdioxid aufweisen, erfüllen 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. Zu den natürlichen getemperten Puzzolanen dürfen auch gebrannte oder getemperte Tonprodukte (z. B. Ziegel) gezählt werden. Die im Projekt verwendeten ziegelhaltigen oder ziegelreichen RC-Ausgangsstoffe sind in DIN EN 197-1 nicht als Zementhauptbestandteil aufgelistet. Mit dem Kriterium „reaktionsfähiges SiO<sub>2</sub>“ können diese RC-Ausgangsstoffe aber die technischen Voraussetzungen für die Herstellung eines „R-Zements“ als Portlandpuzzolanzement (CEM II/A-Q, CEM II/B-Q) nach DIN EN 197-1 einhalten [5] [22].

Aktuell werden in Deutschland keine ziegelhaltigen Portlandpuzzolanzemente hergestellt.

### 3 Aufbereitung und Untersuchung der feindispersen Ausgangsstoffe aus dem Recycling mineralischer Bauabfälle

#### 3.1 Reaktivität der RC-Ausgangsstoffe

Die hydraulische und puzzolanische Reaktivität der RC-Ausgangsstoffe wurde anhand der Hydratationswärme bei 40 °C für drei und sieben Tage (TAM-Air, DIN EN 196-11) bzw. des chemisch gebundenen Wassers durch Glühen bei 350 °C (DIN EN 196-2) ermittelt. Die zu untersuchende Probe enthält den RC-Ausgangsstoff, Calciumhydroxid und einen Alkaliaktivator. Das Verfahren und seine Auswertung folgen der ASTM C1897-20.

*Anmerkung: Das ASTM-Verfahren wurde 2020 genormt und während der Laufzeit ins Projekt aufgenommen. Bei Antragstellung war die Methode zur Bewertung von RC-Ausgangsstoffen noch nicht etabliert. Der Test ermöglicht eine Einordnung der chemischen Reaktivität von RC-Ausgangsstoffen sowie deren Beitrag zur Druckfestigkeit in R-Zementen.*

**Tabelle 1** Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Reaktivität

RC-Ausgangsstoff	Reindichte	Reaktivität nach ASTM Chemisch gebundenes Wasser	Reaktivität nach ASTM Hydratationswärme Prüfalter 3d	Reaktivität nach ASTM Hydratationswärme Prüfalter 7d	Reaktionsfähige Kieselsäure
	g/cm <sup>3</sup>	g	J/g	J/g	M.-%
Mauerwerksbruch (ziegelhaltig)					
MA 1	2,70	3,67	100	128	22,0
MA 2	2,67	2,61	52	84	23,3
MA 3	2,65	2,62	53	71	11,7
Ziegelbruch und Ziegelschleifstaub (ziegelhaltig)					
ZI 1	2,71	5,16	156	223	29,2
ZI 2	2,89	3,85	131	170	27,5
ZI 3	2,70	5,16	197	226	25,2
ZI 4	2,74	4,06	135	175	26,5
ZI 5	2,64	4,77	137	171	21,4
ZI 6	2,69	5,16	200	230	25,5
ZI 13	2,79	4,60	83	117	23,6
Zementstein (zementgebunden)					
ZS 1	2,47	2,76	36	41	8,7
ZS 2	2,47	2,90	34	39	8,6
ZS 3	2,39	3,75	54	65	13,4
ZS 4	2,41	3,45	59	75	14,5
ZS 5	2,45	3,43	50	61	11,9
ZS 6	2,48	2,81	34	40	11,2
ZS 7	2,49	2,38	34	42	7,9
ZS 8	2,48	nicht bestimmt	nicht bestimmt	52	nicht bestimmt
ZS 9	2,51	nicht bestimmt	nicht bestimmt	52	nicht bestimmt
Betonbruch (zementgebunden)					
BB 1	2,58	2,08	26	30	nicht bestimmt
BB 2	2,60	1,95	40	48	nicht bestimmt
BB 3	2,62	2,17	40	50	nicht bestimmt
BB 4	2,61	2,51	51	60	nicht bestimmt

Die **Tabelle 1** listet die im Projekt untersuchten RC-Materialien auf und fasst die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Reaktivität nach ASTM C1897-20 zusammen. Darüber hinaus wurden Messwerte für die Reindichte sowie Analysenwerte zum Gehalt an reaktionsfähiger Kieselsäure gemäß DIN

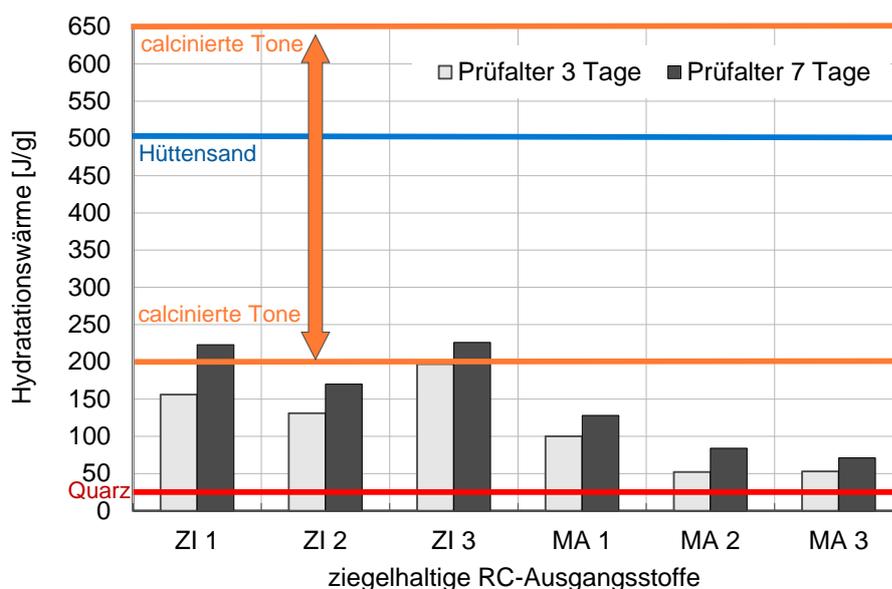
EN 197-1 (vgl. Abschnitt 2.3) eingetragen. Insgesamt wurden 10 Proben ziegelhaltiger RC-Ausgangsstoffe und 13 Proben zementgebundener RC-Ausgangsstoffe betrachtet. Einige Ausgangsstoffe wurden zur Herstellung sog. RC-Gemische verwendet. Dabei wurden Mischungen mit einem Teil ziegelhaltigem Material und mit zwei Teilen zementgebundenem Material hergestellt.

Aus den Analysenergebnissen zur reaktionsfähigen Kieselsäure geht hervor, dass an fünf ziegelhaltigen RC-Baustoffen das Norm-Kriterium für natürliche getemperte Puzzolane erfüllt wurde. Weitere Ergebnisse dieses Projektes werden zeigen, dass die reaktionsfähige Kieselsäure mit einem Anteil > 25 M.-% keine eindeutige Voraussetzung zum Erzielen einer hohen Mörtelfestigkeit oder einer geringen Gefügeporosität darstellt. Umgekehrt kann gezeigt werden, dass auch RC-Materialien mit geringerem Anteil reaktionsfähiger Kieselsäure einen Beitrag zu einem festen und dichten Mörtelgefüge bei Anwendung RC-haltiger Zemente leisten können (vgl. z. B. Abschnitt 6.3.2).

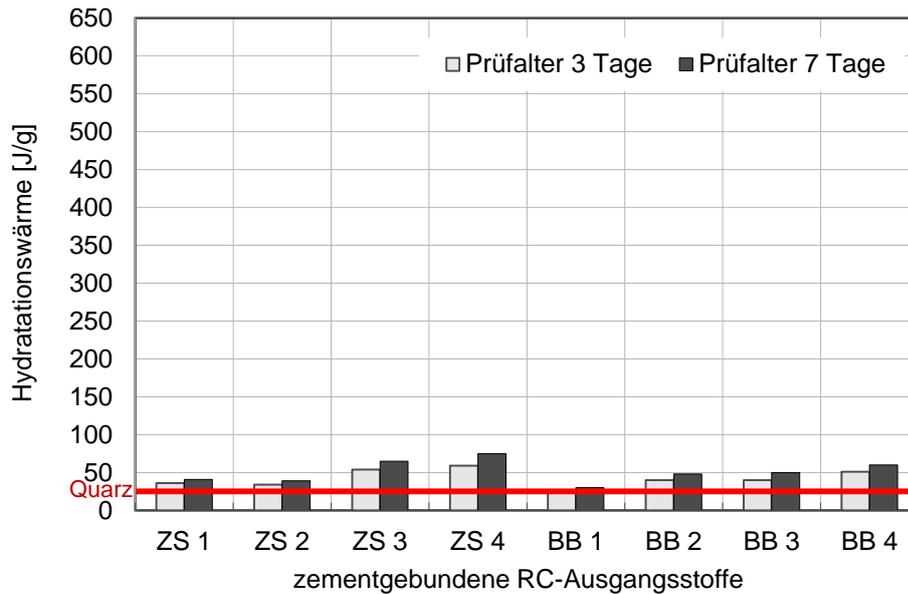
Aus diesem Grunde wurde bei der Beurteilung der Reaktivität der RC-Materialien der Fokus auf ihre Hydratationswärme im Prüfalalter von sieben Tagen gelegt. Damit orientiert sich die Auswertung der stofflichen RC-Eigenschaften an dem für calcinierte Tone als Hauptbestandteil im Zement eingeführten Prüfverfahren.

**Bild 1** und **Bild 2** zeigen Ergebnisse der Hydratationswärme. Zur Einordnung der Ergebnisse wurden einige ziegelhaltige RC-Ausgangsstoffe (ZI, MA) hinsichtlich ihrer Hydratationswärme mit Proben aus calciniertem Ton verglichen. Der Bereich der im VDZ ermittelten Werte für calcinierte Tone liegt zwischen 200 und 650 J/g und damit z. T. deutlich höher als die Werte ziegelhaltiger RC-Ausgangsstoffe (vgl. **Bild 1**). Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass unter Verwendung ziegelreicher Ausgangsstoffe mit einer Hydratationswärme > 200 J/g ggf. eine puzzolanische Reaktivität im Mörtel erwartet werden kann und in der Hydratation ein dichtes Porengefüge sowie ein entsprechender Festigkeitsbeitrag entstehen.

Die geringsten Werte wiesen die Proben aus Zementstein (ZS) und Betonbruch (BB) auf. Die Untersuchungen im Alter von drei bzw. sieben Tagen haben gezeigt, dass beide Stoffgruppen als nicht reaktiv eingestuft und der Reaktivität von Quarz zugeordnet werden können (vgl. **Bild 2**).

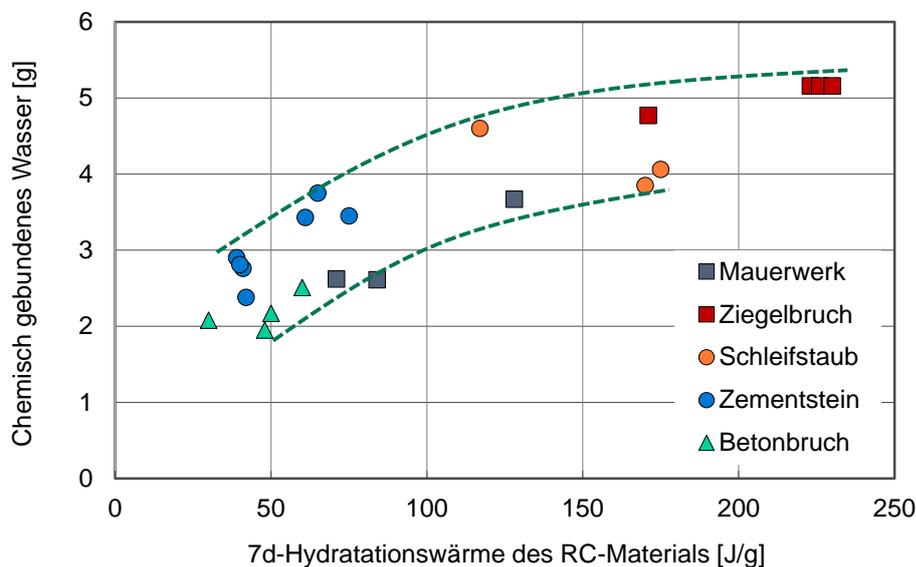


**Bild 1** Untersuchungen zur Bestimmung der Hydratationswärme (Doppelbestimmung) nach ASTM C1897-20, Beispiele im Vergleich von Ziegelbruch ZI und Mauerwerksbruch MA mit calcinierten Tonen sowie anderen mineralischen Ausgangsstoffen (Quarz und Hüttensand sind als Einzelwerte abgebildet)



**Bild 2** Untersuchungen zur Bestimmung der Hydratationswärme (Doppelbestimmung) nach ASTM C1897-20, Beispiele im Vergleich von Zementstein ZS und Betonbruch BB mit Quarz (als Einzelwert abgebildet)

Die ziegelhaltigen Proben (Ziegelbruch) mit der höchsten Hydratationswärme zeigten auch die höchsten Anteile chemisch gebundenen Wassers (vgl. **Bild 3**). An den zementgebundenen Proben (Betonbruch) wurden jeweils die geringsten Messwerte ermittelt.



**Bild 3** Untersuchungen an RC-Materialien zur Bestimmung der Hydratationswärme und des chemisch gebundenen Wassers nach ASTM C1897-20

### 3.2 Klassierung und Zerkleinerung der RC-Ausgangsstoffe auf Zementfeinheit

Ein Großteil der gröberen RC-Ausgangsstoffe wurde in Körnungen 0/2 mm, 0/3 mm oder 0/4 mm (z. B. Recyclingbrechsande) oder in „Scherbenform“ (z. B. Ziegelbruch) zur Verfügung gestellt. Die Ausgangsstoffe wurden in einer Laborkugelmühle auf eine Feinheit von 3500 – 4000  $\text{cm}^2/\text{g}$  gemahlen. Einige ausgewählte Ausgangsstoffe wurden auf eine Feinheit > 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$  gemahlen.

*Anmerkung: Aufgrund unterschiedlicher Zusammensetzungen und Mahlbarkeiten der zu untersuchenden Proben (vgl. Bild 43 im Anhang) war eine Zielmahlung auf eine definierte und somit einheitliche Mahlfineinheit im Labor nicht möglich. Leicht mahlbare Stoffe, wie z. B. ein keramisch gebundener und porosierter Hintermauerziegel, erreichten schneller bzw. mit geringerem Energieaufwand sehr hohe Mahlfineinheiten, die mittels in der Zementindustrie gebräuchlichem Blainwertverfahren (DIN 196-6) nicht hinreichend genau messbar waren (vgl. [22]). Die Mahlung von schwerer mahlbaren Stoffen hingegen, wie z. B. Betonbruch, war aufgrund der im Beton gebundenen, festen Gesteinskörnungen energieintensiver. Hohe Zielfineinheiten machten für Betonbruch eine vergleichsweise lange Mahldauer erforderlich.*

Ziegelschleifstäube aus der Planziegelproduktion wurden bei 125 µm abgesiebt. Der Siebdurchgang wurde für die Herstellung von Versuchszementen verwendet.

Die mehlfinen Zementsteinproben sind bei der Aufbereitung von Betonbruch in einer Vertikalwählmühle entstanden.

Die Proben aus Ziegelschleifstaub und Zementstein hatten je nach Aufbereitungs- und Klassierverfahren deutlich unterschiedliche Feinheiten.

Die Korngrößenverteilung der mehlfinen RC-Materialien wurden mittels Laserbeugung untersucht. Das verwendete Laserbeugungsspektrometer vom Typ CILAS 1190 arbeitete auf Basis der Nassdispersion.

*Anmerkung: Die nach entsprechender Aufbereitung mehlfine vorliegenden RC-Materialien, welche bis zu einem Anteil von 50 M.-% in Versuchszementen verwendet wurden, werden in diesem Bericht - unabhängig von Zusammensetzung und Aufbereitungsverfahren - als „Recyclingmehl“ bezeichnet.*

Die folgende Tabelle fasst die granulometrischen Parameter der aufbereiteten RC-Ausgangsstoffe (Recyclingmehle) zusammen.

**Tabelle 2** Granulometrische Eigenschaften der Recyclingmehle aus ziegelhaltigen (MA, ZI) bzw. zementgebundenen RC-Ausgangsstoffen (ZS, BB)

RC-Ausgangsstoffe	Recyclingmehl	Mahlfineinheit in cm <sup>2</sup> /g	Lageparameter x' der RRSB Korngrößenverteilung in µm	Steigung n der RRSB Korngrößenverteilung
RC-Mauerwerk	MA 1 grob	3750	54,03	0,77
	MA 1 fein	5070	29,98	0,82
	MA 2 grob	3450	32,61	0,95
	MA 2 fein	4530	23,77	0,93
	MA 3 grob	4026	56,18	0,78
	MA 3 fein	4915	37,09	0,83
RC-Ziegelbruch	ZI 1 grob	ca. 5550	79,45	0,64
	ZI 1 fein	ca. 7350	29,51	0,78
	ZI 2	ca. 7660	27,68	0,71
	ZI 3 grob	ca. 7600	48,07	0,66
	ZI 3 fein	ca. 8470	33,50	0,72
	ZI 4 fein	ca. 7696	16,39	0,84
RC-Ziegelschleifstaub	ZI 5 fein	ca. 7773	25,34	0,82
	ZI 6	ca. 8470	33,50	0,72
	ZI 2 < 125 µm	nicht bestimmt		
	ZI 4 < 125 µm	nicht bestimmt		
RC-Betonbruch	ZI 13 < 125 µm	nicht bestimmt	28,51	0,82
	BB 1	4962	32,96	0,78

RC-Ausgangsstoffe	Recyclingmehl	Mahlfeinheit in cm <sup>2</sup> /g	Lageparameter x' der RRSB Korngrößenverteilung in µm	Steigung n der RRSB Korngrößenverteilung
	BB 2	5068	27,04	0,90
	BB 3	5134	26,38	0,92
	BB 4	5230	31,80	0,80
RC-Zementstein	ZS 1	6270	25,86	0,93
	ZS 2	6307	27,97	0,89
	ZS 3	7190	27,88	0,94
	ZS 4	5123	32,38	0,93
	ZS 5	6062	28,52	0,99
	ZS 6	4944	42,85	0,88
	ZS 7	4192	44,70	0,77
	ZS 8	4533	39,60	0,83
	ZS 9	nicht bestimmt	27,77	0,88

### 3.3 Sorptionsverhalten

Einige RC-Materialien aus unterschiedlichen Aufbereitungszuständen wurden mittels gravimetrischer Wasserdampfsorptionsanalyse (Gerätetyp graviSorb) untersucht. In den Versuchen wurde eine relative Luftfeuchtigkeit von 98%, 75%, 50%, 25% oder 0% angesteuert. Der Vergleich der Adsorptions- und Desorptionsisothermen von Wasserdampf sowie der Masseveränderung der Proben haben im Vergleich der RC-Materialien nur wenige aussagekräftige Ergebnisse bzw. Erkenntnisse geliefert.

Folgende Materialien wurden betrachtet:

- Ziegelbruch und Ziegelschleifstaub (jeweils ungemahlen)
- Ziegelbruch (ungemahlen) und gemahlener Ziegelbruch
- Ziegelschleifstaub (ungemahlen) und Ziegelschleifstaub (noch feiner gemahlen)
- Ziegelbruch und ziegelreiches Mauerwerk (jeweils ungemahlen)
- Ziegelreiches und ziegelarmes Mauerwerk (jeweils ungemahlen)
- Ziegelreiches Mauerwerk (ungemahlen) und gemahlenes ziegelreiches Mauerwerk
- Ziegelarmes Mauerwerk (ungemahlen) und gemahlenes ziegelarmes Mauerwerk.

Im Vergleich der

- Proben aus „reinem“ Ziegelbruch/Ziegelschleifstaub mit Proben aus ziegelhaltigem Mauerwerk

bzw. im Vergleich der

- ziegelreichen Proben mit den ziegelarmen Proben (jeweils aus Mauerwerk) stellte sich Folgendes heraus:

Ziegelreiche Materialien haben im Vergleich zu ziegelärmeren Materialien nach Umlagerung in eine höhere bzw. in die maximale relative Feuchte von 98% über eine längere Zeit sowie in einem höheren Maße Feuchte aufgenommen, bis die entsprechende Massekonstanz erreicht wurde. Nach Absenkung der relativen Feuchte auf 75% war die Massenabnahme der ziegelreicheren Materialien deutlich geringer als bei den ziegelärmeren Materialien. Die weitere Absenkung der rel. Feuchte auf 25% führte hingegen zu einem deutlich ausgeprägteren Massenverlust bei ziegelreicheren Materialien als bei ziegelärmeren Materialien.

Das Verhalten dieser Materialien kann damit begründet werden, dass Ziegel, insbesondere porosierte Ziegelsteine oder weich gebrannte Ziegeltone naturgemäß eine vergleichsweise hohe Porosität und eine vergleichsweise geringe Rohdichte aufweisen. Auch fein zerkleinerte Ziegelmaterialien (z. B. Ziegelmehle, Ziegelschleifstäube) können nicht nur zwischen den Partikeln, sondern innerhalb der Partikel sehr feine Poren enthalten (vgl. auch [22]). Je größer die Porosität und damit die innere Oberfläche dieser Materialien war, umso deutlicher war das Sorptionsverhalten – wie oben beschrieben – ausgeprägt. Darüber hinaus wurde an den ziegelreicheren, feinerporigen Proben beobachtet, dass das Sorptionsverhalten unmittelbar nach einem Wechsel von Zunahme auf Abnahme der relativen Feuchte (oder umgekehrt) zeitlich verzögert einsetzte und anfangs eine gewisse „Robustheit“ zeigte.

Fazit:

- Je geringer die mutmaßliche Brenntemperatur des ursprünglichen Ziegelbaustoffes,
- je poröser die Gefügestruktur der gebrannten Tone oder Ziegel,
- je höher der Gehalt gebrannter Tone oder Ziegel im RC-Material,
- je höher die Feinheiten der zerkleinerten Ziegel und je größer die spezifische Oberfläche,

desto mehr Feuchte wurde über die Oberflächen und Poren ans Äußere bzw. ins Innere der Proben transportiert.

Ein Einfluss des Feuchtegradienten auf die Geschwindigkeit von Sorption und Desorption konnte nicht festgestellt werden. Ob die Geschwindigkeit der Sorptionsprozesse über die Ziegeleigenschaften bzw. die Ziegelgehalte der Proben gesteuert werden kann, wurde nicht untersucht.

*Anmerkung: Die Untersuchungen zum Sorptionsverhalten der in R-Zementen eingesetzten RC-Ausgangsstoffe wurde aus messtechnischen Gründen abgebrochen. Die Auswertungen lieferten nur wenige qualitative Aussagen, jedoch keine quantitativen Ergebnisse, die ggf. eine Einordnung in Bezug auf andere Projektergebnisse (z. B. Porengrößenverteilung) ermöglicht hätten.*

Für das vormals geplante Verfahren zur Untersuchung der physikalischen Wirkung von Wasser (Sorptionsversuche) kamen alternative Methoden zur Anwendung, die die Wasseraufnahme der RC-haltigen Zemente hinreichend charakterisieren:

1. Die hydraulische bzw. puzzolanische Reaktivität aller im R-Zement eingesetzten RC-Ausgangsstoffe wurde anhand

- der Hydratationswärme bei 40 °C für drei und sieben Tage (TAM-Air, DIN EN 196-11) bzw.
- des chemisch gebundenen Wassers durch Glühen bei 350 °C (DIN EN 196-2) ermittelt.

Das Verfahren und seine Auswertung folgen der ASTM C1897-20. Es wurde 2020 genormt [vgl. Abschnitt 3.1].

2. Die Raumausfüllung (Packungsdichte) von R-Zementen sowie ihr Wasseranspruch (Verfahren nach Punkte), der den Hohlraum zwischen den Zementpartikeln charakterisiert, liefern Erkenntnisse, die in unmittelbarem Zusammenhang zur Verarbeitbarkeit der Frischmörtel (z. B. Ausbreitmaß der Frischmörtel) stehen. Außerdem können diese Erkenntnisse die Entstehung eines spezifischen Zementsteingefüges während und nach der Hydratation untermauern (vgl. Abschnitt 6.2).

## 4 Herstellung der Versuchszemente und Untersuchung der Packungsdichte

### 4.1 Herstellung der Versuchszemente

Die R-Zemente wurden durch getrenntes Aufbereiten und anschließendes Mischen der mehlfinen Ausgangsstoffe Portlandzement und Recyclingmehl hergestellt. Dabei wurde vorrangig ein handelsüblicher Portlandzement CEM I 52,5 N als Klinkerkomponente verwendet. Einige R-Zemente wurden zum Vergleich auch mit CEM I 52,5 R desselben Zementherstellers gemischt, um den Einfluss der Festigkeitsklasse einzubeziehen. Die Recyclingmehle wurden mit Anteilen von 20 bis 50 M.-% in den Versuchszementen verwendet.

Einige Eigenschaften der als Klinkerkomponente verwendeten Portlandzemente sind in **Tabelle 3** aufgeführt.

**Tabelle 3** Eigenschaften der als Klinkerkomponente eingesetzten Portlandzemente

Eigenschaft	Einheit	CEM I 52,5 N (vorrangig verwendet)	CEM I 52,5 R
Wasseranspruch	M.-%	28,5	32,0
Erstarren-Beginn	min	190	125
Erstarren-Ende	min	240	160
2d-Druckfestigkeit	MPa	28,0	46,0
28d-Druckfestigkeit	MPa	64,0	74,0
C3S	M.-%	60,5	58,8
C2S	M.-%	14,2	15,7
C3A orthorhombisch	M.-%	2,9	2,4
C3A kubisch	M.-%	3,3	3,0
C4AF	M.-%	7,7	8,2
RRSB Steigungsmaß $n$	-	1,12	1,10
RRSB Lageparameter $x'$	$\mu\text{m}$	21,8	12,1

Der vordere Teil dieses Berichtes (ab **Abschnitt 6**) betrachtet vorrangig R-Zemente mit einem RC-Anteil von 30 M.-% im Zement. Der Anteil des CEM I wurde bei 70 M.-% konstant gehalten. Die RC-Materialien unterschiedlicher Zusammensetzungen wurden - je nach Herkunft und Entstehung - Stoffgruppen zugeordnet. Einige R-Zemente wurden darüber hinaus mit 50 M.-% RC-Material hergestellt.

*Anmerkung: Je nach Zusammensetzung und Anwendungsgebiet der ursprünglichen Baustoffe sowie je nach Aufbereitungsgrad im Recyclingverfahren oder im Laborversuch wurden unter sonst konstanten Herstell- und Prüfbedingungen deutliche Unterschiede, vor allem in den Anwendungseigenschaften der RC-Materialien festgestellt. Auch innerhalb der Stoffgruppen traten Unterschiede auf. Aus diesem Grunde wurden keine statistische Versuchsplanung eingeführt und kein RC-haltiger Referenzzement definiert.*

Der hintere Teil des Berichtes (ab **Abschnitt 7**) beschreibt vorrangig R-Zemente mit Schleifstaub bzw. Zementstein, die mit 20 M.-%, 30 M.-%, 40 M.-% und 50 M.-% eingesetzt wurden. Der Klinkerfaktor der Zemente lag zwischen 80 M.-% und 50 M.-%. Während vormals eher die Eignung vielfältiger RC-Materialien in R-Zementen mit „Standardzusammensetzung“ (z. B. 30 M.-% RC) betrachtet wurde, lag der Fokus nunmehr auf der Verringerung des Klinkerfaktors.

Im hinteren Teil des Berichtes werden die Einflüsse der Verringerung des Klinkerfaktors auf Festigkeit und Porosität vor dem Hintergrund konstanter oder angepasster w/z-Werte eingeordnet.

## 4.2 Untersuchungen zur Packungsdichte der R-Zemente

Zur Einordnung der granulometrischen Eigenschaften wurde an den Versuchszementen mittels Stampfvolumeter die Stampfpackungsdichte bestimmt. Aus der nach Verdichtung (Stampfen) des Zementpulvers ermittelten „Rütteldichte“ und seiner „Reindichte“ wurde der Quotient, die Stampfpackungsdichte (kurz: Packungsdichte) errechnet.

Zur Bestimmung der Reindichte wurden das Flüssigkeitspyknometer-Verfahren sowie das Gaspyknometer-Verfahren verwendet.

Die Packungsdichten der R-Zemente werden i. d. R. von den granulometrischen Zusammensetzungen, insbesondere von den Korngrößenverteilungen ihrer Bestandteile beeinflusst. Da der Wertebereich von Packungsdichten mehlfiner disperser Systeme eng begrenzt ist, lagen die Stampfpackungsdichten der in diesem Projekt untersuchten R-Zemente in Größenordnungen zwischen 0,43 (geringe Packungsdichte) und 0,53 (hohe Packungsdichte). Wurde z. B. ein RC-Material sehr hoher Mahlfineinheit mit einem hohen Anteil von 50 M.-% eingesetzt, so wurden in den R-Zementen vergleichsweise geringe Packungsdichten ( $< 0,45$ ) erreicht. Wurden R-Zemente mit 30 M.-% RC-Material geringerer Feinheiten hergestellt, wurden für die Packungsdichte höhere Werte ( $> 0,49$ ) ermittelt.

## 5 Prüfungen am Zementmörtel

### 5.1 Untersuchung der Druckfestigkeit der R-Zemente am Normmörtel gemäß DIN EN 196-1

Die R-Zemente wurden gemäß DIN EN 196-1 bei einem konstanten w/z-Wert = 0,50 untersucht. Die Druckfestigkeit der R-Zement-Normmörtel wurde im Alter von zwei Tagen und 28 Tagen ermittelt.

### 5.2 Untersuchung der Druckfestigkeit von Zementmörteln mit vergleichbarer Konsistenz (SP) in Anlehnung an DIN EN 196-1

Neben der Normprüfung wurden R-Zement-Mörtel mit einem im Vergleich zur Zementnorm veränderten Wassergehalt bei konstantem Zementgehalt hergestellt und anschließend in Anlehnung an DIN EN 196-1 untersucht.

Der Wassergehalt der Frischmörtel wurde schrittweise so lange verändert, bis eine vergleichbare steifplastische Mörtelkonsistenz (SP) erreicht werden konnte. Die Methode und die Kriterien zur Feststellung der steifplastischen Mörtelkonsistenz (SP) sind in [23] beschrieben. Der Mehlkorngelhalt der steifplastischen Mörtel blieb im Vergleich zum Normmörtel unverändert und wurde über den Zementgehalt ( $z = 450 \text{ g} = \text{konstant}$ ) eingestellt. Aufgrund der anzupassenden Wassermenge ( $w \neq 225 \text{ g}$ ) veränderten sich Leimgehalt und Wasserzementwert (w/z-Wert  $\neq \text{konstant}$ ). Unter Verwendung der steifplastischen Mörtel konstanter Konsistenz wurden ebenfalls Prismen hergestellt, ihre Druckfestigkeiten wurden im Alter von zwei bzw. 28 Tagen geprüft [23] [24].

### 5.3 Porengrößenverteilungen am Festmörtel im Prüfalalter von 28 Tagen

Zementspezifische Einflussparameter, wie z. B. die Zementzusammensetzung, können sich auf die Entstehung des Porengefüges, die Porosität und die Porengrößenverteilung (PGV) von Mörteln und Betonen auswirken. Die Porosität und die Porengrößenverteilung sind für viele dauerhaftigkeitsrelevante Eigenschaften zementgebundener Baustoffe von grundlegender Bedeutung. Sie beschreiben das zementspezifische Porengefüge, wie es in und nach der Hydratation eines Zements entsteht. Außerdem verändert das während der Hydratation verfügbare Wasser das Porengefüge. Je nach Verteilung, Menge und Wirksamkeit des Wassers können Poren unterschiedlicher Größen entstehen, die die Lage und Steigung entsprechender Porengrößenverteilungen (PGV) zum Teil erheblich beeinflussen.

An den Zementmörteln wurde im Alter von 28 Tagen die Porengrößenverteilung gemessen. Die Feststellung der Porengrößenverteilung erfolgte mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie. In den Porengrößenverteilungen (PGV) wird 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. Im Folgenden wird das maximal messbare Porenvolumen als „Gesamtporosität“ bezeichnet. 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. Die Porenanteile  $< 0,01 \mu\text{m}$  und  $< 0,03 \mu\text{m}$  wurden 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.

#### 5.4 Hydratationswärmeentwicklung

Während der Hydratation eines Zements wird Wärme freigesetzt. Der Verlauf der Wärmefreisetzung kann Hinweise geben, wie intensiv Zementbestandteile mit Wasser reagieren. Neben der Hydratationswärme, die an den RC-Materialien gemäß ASTM C1897-20 im Alter von drei und sieben Tagen [vgl. Abschnitt 3.1] untersucht wurde, wurde der zeitliche Verlauf der Hydratationswärme am Normmörtel ( $w/z = 0,50$ ) unter Verwendung einiger R-Zemente ermittelt. Die Hydratationswärmefreisetzung wurde mit dem teiladiabatischen Verfahren (Langavantverfahren) gemäß DIN 196-9 am Mörtel bestimmt. Die Wärmeentwicklung der Mörtel wurde über einen Zeitraum von 42 Stunden untersucht. Sie kann Informationen zum Reaktionsfortschritt sowie zur Charakterisierung des Erhärtungsverhaltens liefern.

## 6 Darstellung der Ergebnisse und Diskussion - Teil 1: Eigenschaften von R-Zementen mit konstantem RC-Anteil unterschiedlicher Zusammensetzung

### 6.1 Packungsdichte der R-Zemente in Abhängigkeit der granulometrischen Zusammensetzung

Die Wertebereiche der an Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen untersuchten Packungsdichte variieren in Abhängigkeit der Zementzusammensetzung und des Prüfverfahrens [9] [11] [23]. Insbesondere die granulometrische Zusammensetzung der Recyclingmehle sowie der als Klinkerkomponente eingesetzten Portlandzemente beeinflussen - je nach Anteil - die Packungsdichte eines R-Zements (in diesem Projekt: Stampfpackungsdichte). Bei konstanten RC-Anteilen von 30 M.-% im R-Zement führten die granulometrischen Eigenschaften (z. B. die KGV) beider Zementbestandteile zu Packungsdichten in einem weiten Bereich zwischen 0,44 und 0,52.

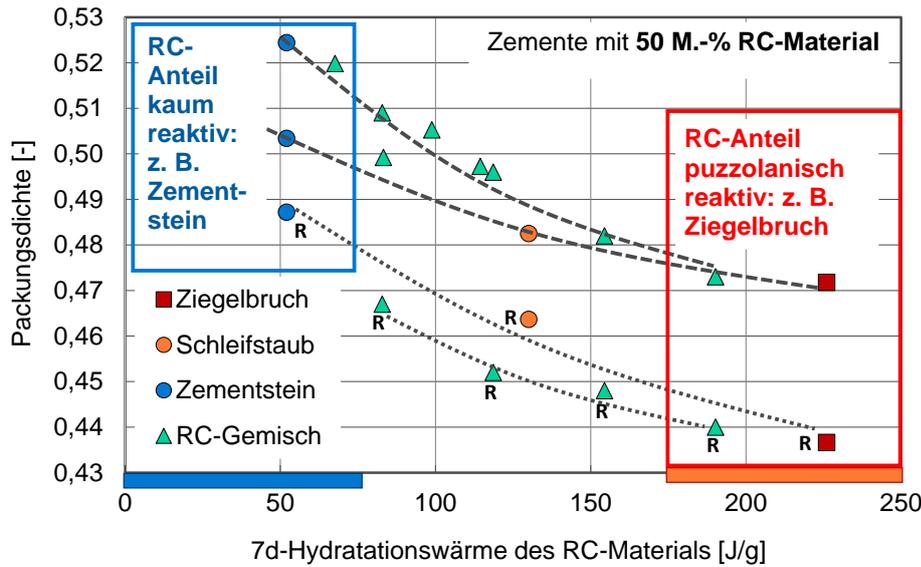
*Anmerkung: **Bild 44** im Anhang veranschaulicht die Wertebereiche der Packungsdichte von R-Zementen sowie die Wertebereiche der Hydratationswärme der im Zement eingesetzten RC-Materialien. Die Hydratationswärme des RC-Materials wurde als Indikator für seine Reaktivität herangezogen (vgl. Abschnitt 3.1). Sie ordnet z. B. puzzolanische Eigenschaften der RC-Materialien ein, die je nach chemisch-mineralogischer Zusammensetzung variieren können.*

Ziegelhaltige Zemente (z. B. mit Ziegelbruch) hatten aufgrund der leichten Mahlbarkeit von Ziegel mit entsprechend hohen Mahlfineheiten geringe Packungsdichten in der Größenordnung  $< 0,49$ . Die Zugabe von 30 M.-% eines leicht mahlbaren, reaktiven Recyclingziegels (Hydratationswärme Ziegelbruch  $> 200$  J/g) hatte demnach nicht nur die Reaktivität des Zements beeinflusst, sondern auch seine Granulometrie.

Aus schwerer mahlbarem, weniger reaktivem Mauerwerksbruch (Hydratationswärme Mauerwerk  $< 150$  J/g) wurden Recyclingmehle geringerer Feinheiten hergestellt, die Zemente wiesen entsprechend höhere Packungsdichten bis 0,52 auf. Wurden RC-Materialien gemischt, z. B. aus Ziegel und Zementstein, veränderten sich die Reaktivitäten, jedoch blieben die Packungsdichten der Zemente in einem vergleichsweise engen Bereich zwischen 0,46 und 0,49.

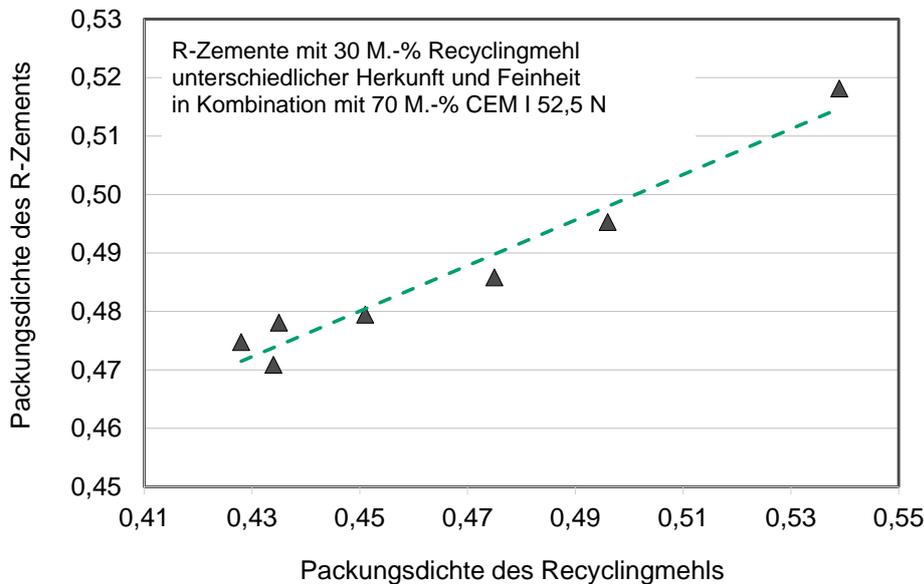
Die mit 30 M.-% wenig reaktivem Zementstein (Hydratationswärme Zementstein  $< 100$  J/g) hergestellten Zemente wiesen in ihrer Packungsdichte einen großen Schwankungsbereich auf, der sowohl mit der KGV der unterschiedlichen Recyclingmehle, als auch mit der Verwendung eines CEM I in unterschiedlichen Festigkeitsklassen begründet werden kann.

Aus **Bild 4** geht der granulometrische Einfluss der Recyclingmehle bzw. der Klinkerkomponente etwas deutlicher hervor. Es zeigt Zemente mit einem RC-Anteil von 50 M.-%, die auf Basis des CEM I höherer Festigkeitsklasse (52,5 R, untere Trendlinien) hergestellt wurden. Diese R-Zemente erreichten insgesamt geringere Packungsdichten als die Zemente auf Basis des CEM I geringerer Festigkeitsklasse (52,5 N). Die Trendlinien zeigen: Je höher die reaktiven Ziegelanteile im verwendeten Recyclingmehl, desto geringer wurden die Packungsdichten der mit ihnen hergestellten Zemente.



**Bild 4** Wertebereiche der Packungsdichte von R-Zementen und der Hydratationswärme der im Zement eingesetzten RC-Materialien, Verwendung von RC-Materialien unterschiedlicher Zusammensetzung und Reaktivität (Hydratationswärme nach ASTM C1897-20), Zemente mit 50 M.-% RC-Material in Kombination mit CEM I (Trendlinien „R“: Zemente mit 50 M.-% CEM I 52,5 R)

Der granulometrische Effekt, den die Zugabe von Recyclingmehl zur Folge haben kann, wurde an R-Zementen mit 30 M.-% Zementstein systematisch untersucht. Das folgende Bild zeigt, wie die Packungsdichte des Recyclingmehls (ZS 1 bis ZS 7) unter sonst konstanten Mischungsbedingungen die Packungsdichte des R-Zements beeinflusst. Die R-Zemente wurden mit 70 M.-% CEM I 52,5 N hergestellt.



**Bild 5** Packungsdichte des R-Zements in Abhängigkeit der Packungsdichte des Recyclingmehls

Die Mahlbarkeit des ursprünglichen RC-Materials (Altbeton) und das Aufbereitungsverfahren (Wälzmühle mit integriertem Hochleistungssichter) haben dazu geführt, dass alle Recyclingmehle (ZS) in unterschiedlichen KGV vorlagen und somit an ihnen unterschiedliche Packungsdichten ermittelt

wurden. Eine Zugabe von jeweils 30 M.-% führte bei zunehmender Packungsdichte des Recyclingmehls zu höheren Packungsdichten der entsprechenden R-Zemente.

## 6.2 Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Wasseranspruch

Die Packungsdichte  $D$  einer Partikelschüttung (auch Raumausfüllung genannt [19]) ist definiert als Verhältnis aus dem Volumen des Festraums bezogen auf das Volumen des Gesamtraums:

$$\text{Packungsdichte } D = \frac{\text{Volumen Festraum}}{\text{Volumen Gesamtraum}} \quad [-]$$

Aus der Differenz des Gesamtraums und des Festraums entsteht der Hohlraum bzw. Hohlraumgehalt. Mit der experimentellen Methode „Wasseranspruch nach Puntke“ kann der Hohlraum ermittelt und in Vol.-% angegeben werden.

Wie der Wasseranspruch für Normsteife gemäß DIN EN 196-3 (angegeben in M.-%) nimmt auch der Wasseranspruch nach Puntke mit zunehmender Packungsdichte eines Zements ab. Beide Untersuchungen werden an Zementleimen mit unterschiedlichen Wasser-Zement-Verhältnissen durchgeführt.

- Wird bei einem Zementmörtel in der Normprüfung ein konstanter Wassergehalt eingestellt ( $w/z = 0,50 = \text{konstant}$ ), der den Wasserbedarf des im Mörtel verwendeten Zements überschreitet, entsteht – bezogen auf den Zement – ein Wasserüberschuss, der sich mit einer weicheren Mörtelkonsistenz und einer erhöhten Porosität im Festmörtel darstellt.
- Wird einem Zementmörtel im Vergleich zum Wasserbedarf seines Zements weniger Wasser zugeführt, entstehen eine steifere Frischmörtelkonsistenz und eine geringere Porosität im Festmörtel.

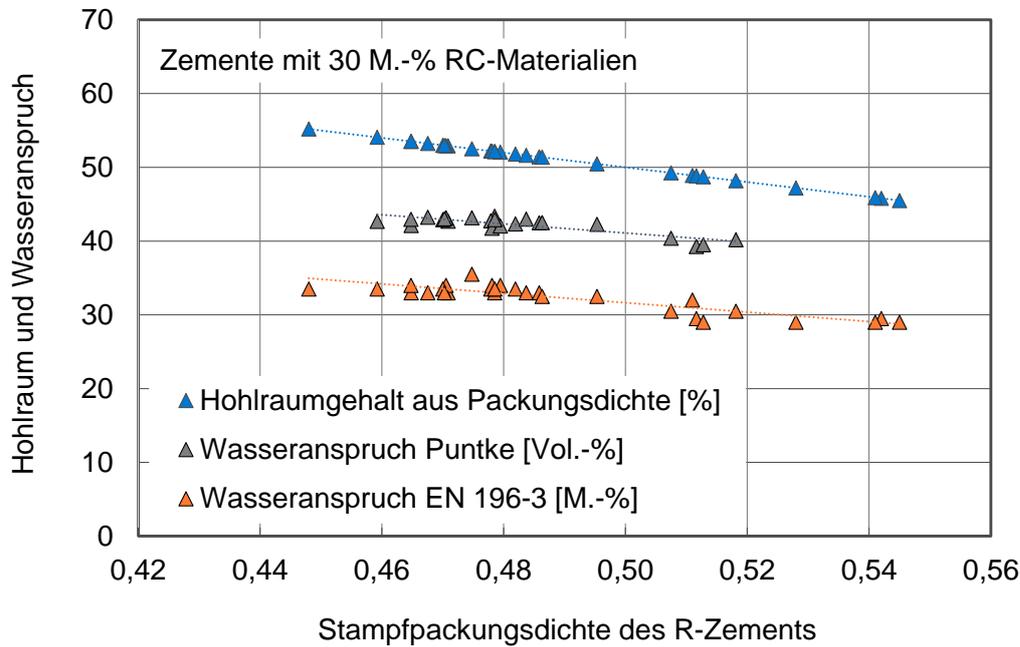
Insbesondere Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen, und daher auch die hier untersuchten R-Zemente, neigen zu diesem Verhalten, wenn sie unter Normbedingungen bei konstantem  $w/z$ -Wert verarbeitet werden. Hinzu kommt, dass RC-Materialien nach Mahlung eine große spezifische Oberfläche und eine innere Porenstruktur aufweisen können, die nicht nur zu einem erhöhten Wasseranspruch der R-Zemente führen kann. Es kann auch Wasser aus dem Zementleim im Zementpartikel aufgenommen werden, womit eine räumlich und zeitlich begrenzte  $w/z$ -Veränderung einhergehen kann.

Im **Bild 6** wurden der rechnerisch ermittelte Hohlraum, der Wasseranspruch nach Puntke (Vol.-%) sowie der Wasseranspruch für Normsteife (M.-%) in Abhängigkeit der Packungsdichte von R-Zementen, basierend auf 70 M.-% CEM I, beispielhaft dargestellt (vgl. auch [22]). Die Auswertung wurde an R-Zementen mit einem RC-Anteil von 30 M.-% durchgeführt. Die Darstellung zeigt, dass alle Parameter der hier untersuchten Zemente mit zunehmender Packungsdichte abnehmen.

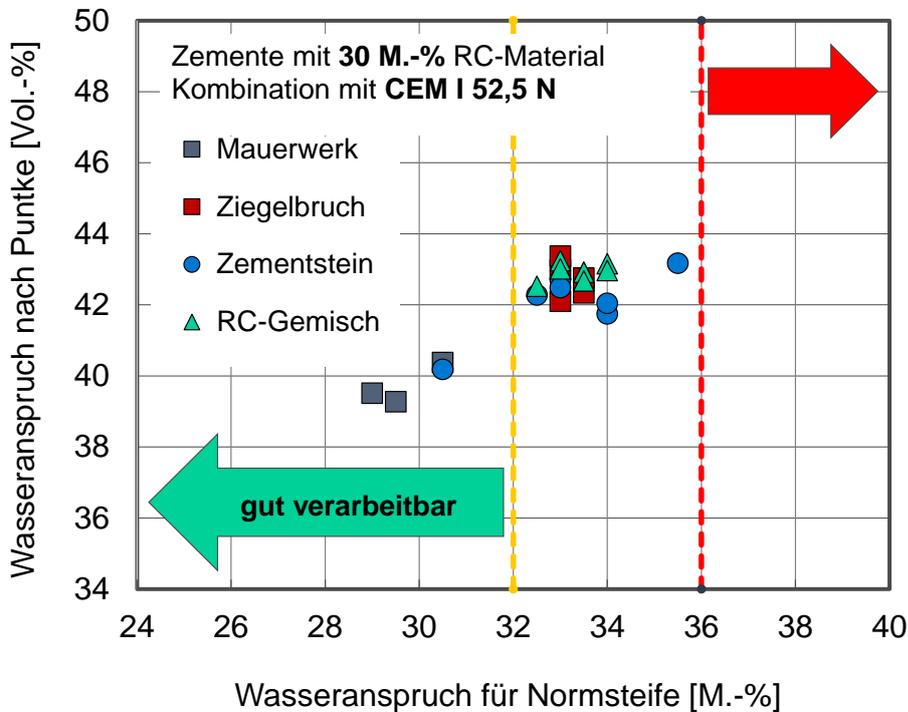
Je nach Art und Anteil des im R-Zement verwendeten Recyclingmehls und je nach Festigkeitsklasse des als Klinkerkomponente eingesetzten CEM I wurden die Packungsdichte und somit der Wasseranspruch der R-Zemente (DIN EN 196-3) beeinflusst. Dies hatte deutliche Auswirkungen auf die Verarbeitbarkeit der Frischmörtel.

**Bild 7** stellt Wertebereiche des Wasseranspruchs nach Puntke sowie des Wasseranspruchs für Normsteife (DIN EN 196-3) im Vergleich gegenüber. Die R-Zemente mit 30 M.-% Recyclingmehl und 70 M.-% CEM I 52,5 N lagen zum Teil in einem „Übergangsbereich“ bei Werten zwischen 32 M.-% und 36 M.-% (Wasseranspruch gemäß DIN EN 196-3). Das entsprach einem Wasseranspruch (Puntke) zwischen 42 Vol.-% und 44 Vol.-%. Die Normmörtel auf Basis von Zementen mit einem hohen Wasseranspruch  $> 36$  M.-% erreichten unter diesen Voraussetzungen zunehmend steife Konsistenzen. Bei einem Wasseranspruch  $< 32$  M.-% ließen sich die Normmörtel vergleichsweise gut verarbeiten.

Ein Großteil der in Deutschland hergestellten und angewendeten Zemente weist einen geringeren Wasseranspruch auf. Typische Werte für den Wasseranspruch von Normalzementen liegen zwischen 25 M.-% und 30 M.-%.

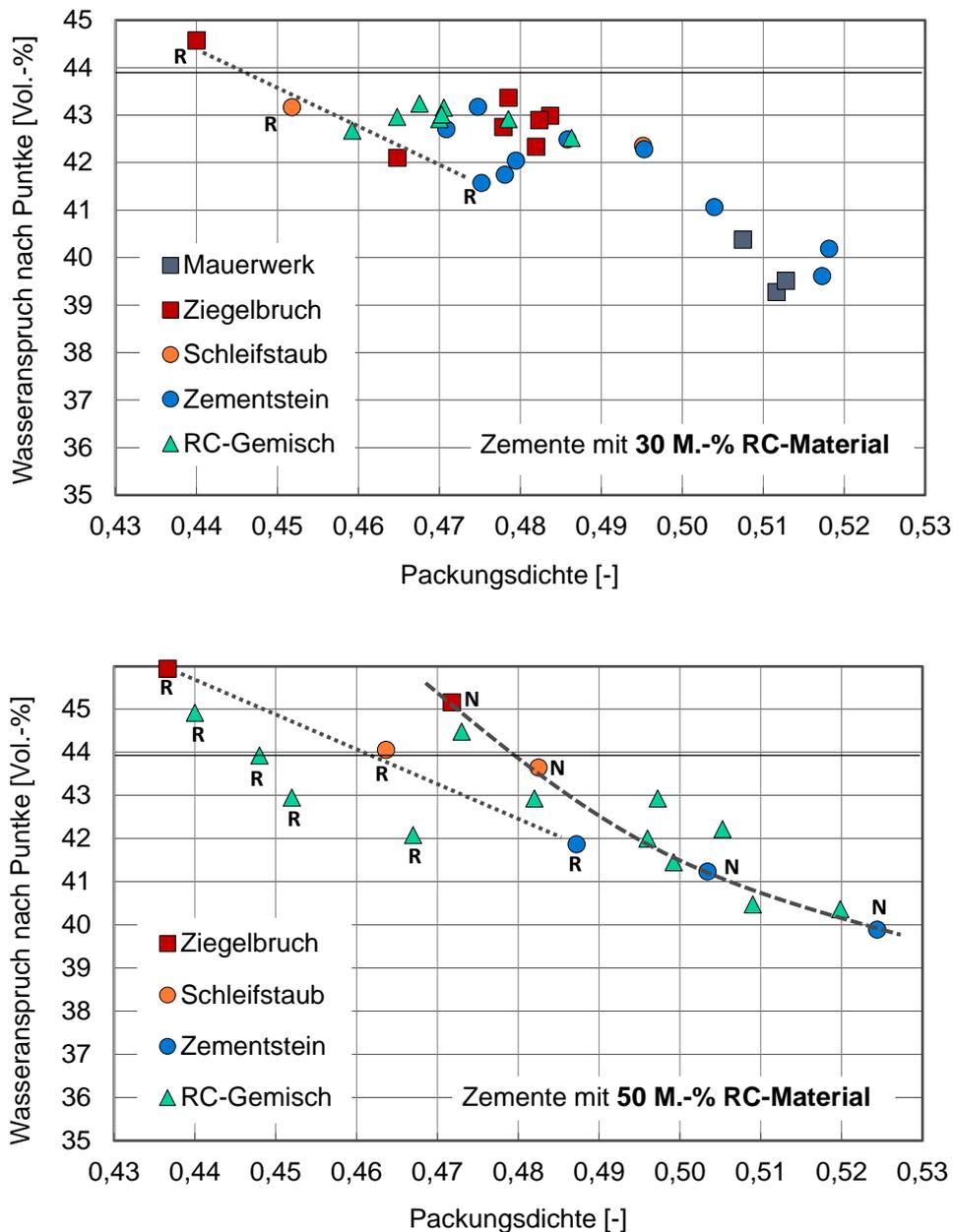


**Bild 6** Wasseranspruch für Normsteife [M.-%], Wasseranspruch nach Puntke [Vol.-%] und rechnerisch ermittelter Hohlraum [%] in Abhängigkeit der Packungsdichte der R-Zemente, Zemente mit 30 M.-% RC-Material, Verwendung unterschiedlicher RC-Materialien mit variierenden Feinheiten



**Bild 7** Wertebereiche des Wasseranspruchs nach Puntke sowie des Wasseranspruchs für Normsteife (DIN EN 196-3) im Vergleich (die Markierungen beziehen sich auf den Wasseranspruch von 32 M.-% bzw. 36 M.-%), Untersuchung von R-Zementen mit 30 M.-% Recyclingmehl und 70 M.-% CEM I 52,5 N

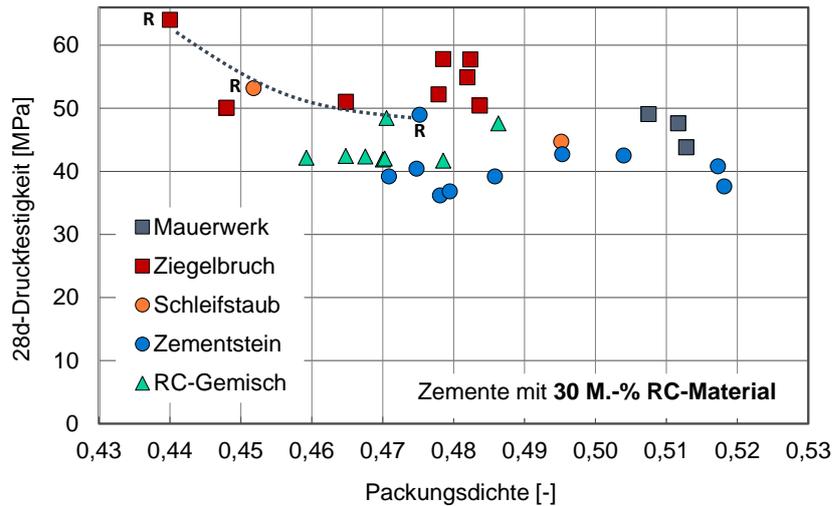
Die Auswertungen an R-Zementen mit 30 M.-% bzw. 50 M.-% Recyclingmehl in Kombination mit CEM I 52,5 N bzw. CEM I 52,5 R sind in den folgenden Bildern in Abhängigkeit der Packungsdichte dargestellt. Auch diese Zemente wiesen mit zunehmender Packungsdichte einen abnehmenden Wasseranspruch (Punkte) auf. Außerdem geht aus den Bildern hervor, dass sowohl die Art und die KGV des Recyclingmehls als auch die Festigkeitsklasse des jeweils verwendeten CEM I Einfluss auf die Werte der Packungsdichte und des Wasseranspruchs hatten.



**Bild 8** Wasseranspruch der Zemente (Punkte-Verfahren) in Abhängigkeit der Zementpackungsdichte oben: Zemente mit einem RC-Anteil von 30 M.-% und 70 M.-% CEM I, unten: Zemente mit einem RC-Anteil von 50 M.-% und 50 M.-% CEM I, Verwendung von CEM I 52,5 N bzw. CEM I 52,5 R

Besonders deutlich zeigen sich die Zusammenhänge in der Darstellung der Zemente mit einem RC-Anteil von 50 M.-% (unteres Bild) – jeweils mit Ziegelbruch, mit Schleifstaub oder mit Zementstein. Während die obere Trendlinie (Kombination CEM I 52,5 N) im Packungsdichtebereich zwischen ca. 0,47 und 0,53 liegt und die entsprechenden Zemente einen Wasseranspruch von ca. 40 Vol.-% bis

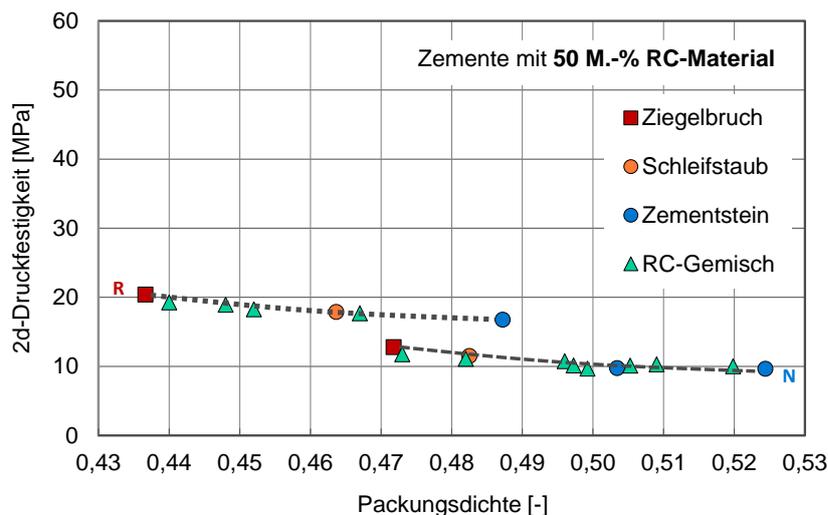


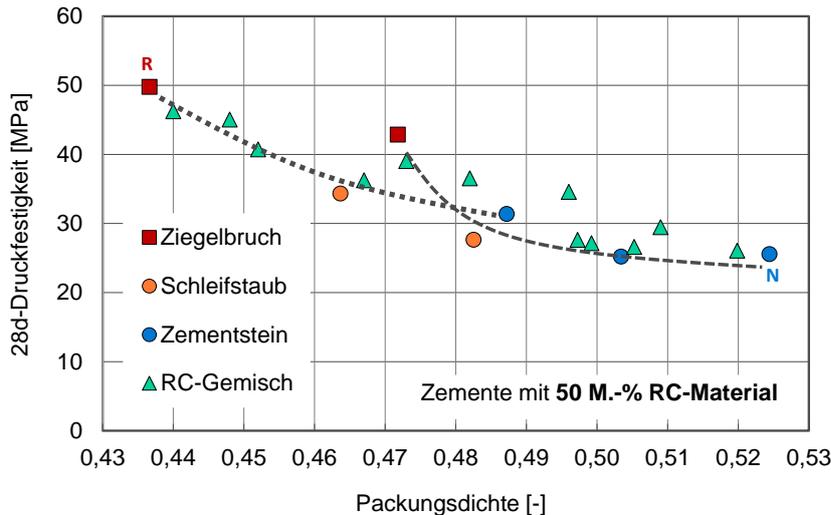


**Bild 9** Druckfestigkeit der Zemente in Abhängigkeit der Zementpackungsdichte, Zemente mit einem RC-Anteil von 30 M.-% in Kombination mit CEM I (Trendlinie „R“: Zemente mit 70 M.-% CEM I 52,5 R) oben: Anfangsfestigkeit im Prüfalalter von zwei Tagen unten: Normfestigkeit im Prüfalalter von 28 Tagen

Während die meisten ziegelbruchhaltigen Zemente mit > 20 MPa im Alter von zwei Tagen sowie mit > 50 MPa im Alter von 28 Tagen vergleichsweise hohe Festigkeiten in Kombination mit CEM I 52,5 N erzielten, so lagen die Festigkeiten der anderen R-Zemente auf etwas geringerem Niveau.

Wurden die Recyclingmehle mit CEM I 52,5 R kombiniert, hatte dies eine deutliche Verringerung der Packungsdichte des R-Zements sowie eine signifikante Erhöhung seiner Druckfestigkeiten zur Folge. Mit Ziegelbruch als Recyclingmehl erreichten diese Zemente im Alter von zwei Tagen Druckfestigkeiten von ca. 30 MPa (30 M.-% RC-Anteil) bzw. ca. 20 MPa (50 M.-% RC-Anteil). Im Alter von 28 Tagen wurden Druckfestigkeiten von bis zu 65 MPa (30 M.-% RC-Anteil) bzw. bis zu 50 MPa (50 M.-% RC-Anteil) erzielt.





**Bild 10** Druckfestigkeit der Zemente in Abhängigkeit der Zementpackungsdichte, Zemente mit einem RC-Anteil von 50 M.-% in Kombination mit CEM I (Trendlinie „R“: Zemente mit 50 M.-% CEM I 52,5 R, Trendlinie „N“: Zemente mit 50 M.-% CEM I 52,5 N)  
oben: Anfangsfestigkeit im Prüfalalter von zwei Tagen  
unten: Normfestigkeit im Prüfalalter von 28 Tagen

### 6.3.2 Stoffliche Einflüsse

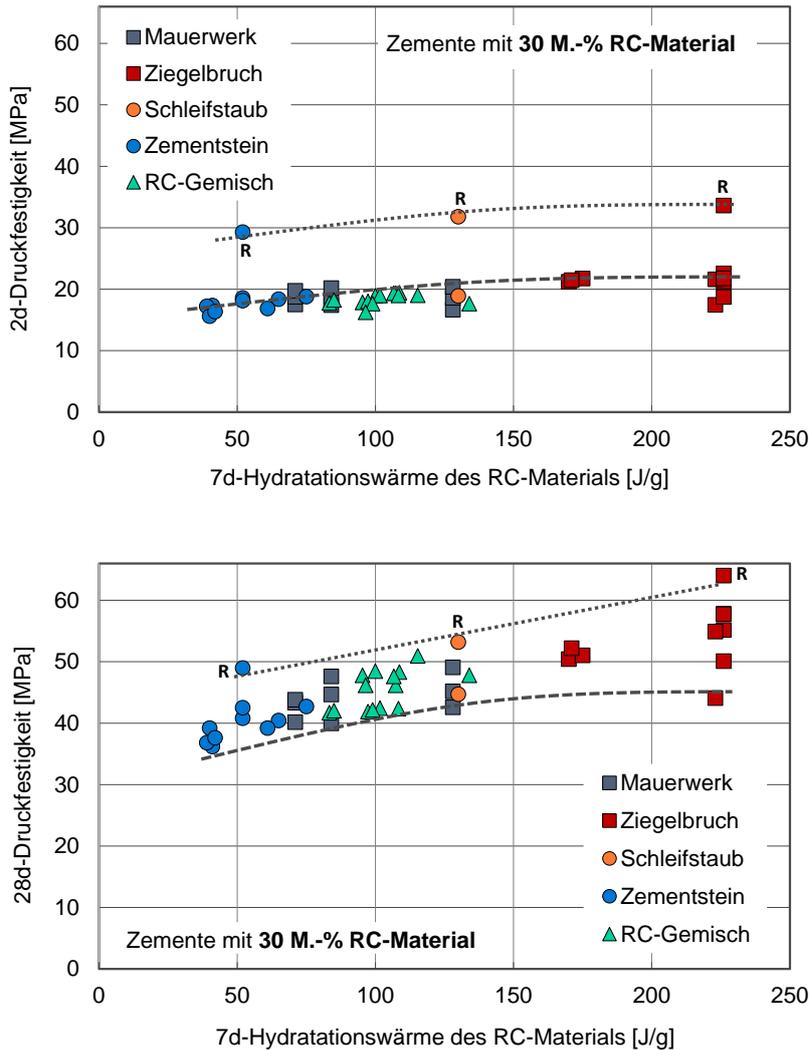
Neben dem Einfluss der granulometrischen Zementzusammensetzung ist die stoffliche Zusammensetzung untrennbar mit der Festigkeitsentwicklung eines Zements und dem Ergebnis seiner Normprüfungen verbunden. Die anhand der Hydratationswärme der RC-Materialien ermittelte Reaktivität hat entsprechenden Einfluss auf die Druckfestigkeit der R-Zemente. **Bild 11** und **Bild 12** fassen den Zusammenhang zwischen der Reaktivität des im Zement verwendeten RC-Materials und der Zementfestigkeit im Alter von zwei und 28 Tagen zusammen. Wurde vergleichsweise reaktives RC-Material mit einer Hydratationswärme  $> 200$  J/g (vgl. calcinierte Tone in **Bild 1**) entsprechender Feinheit eingesetzt, erreichten die Zemente in jedem Prüfalalter höhere Festigkeiten als R-Zemente mit weniger reaktiven Recyclingmehlen.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich granulometrische und stoffliche Effekte in ihrem Einfluss auf die Festigkeitsprüfung überlagern können. Aus **Bild 11** und **Bild 12** geht außerdem hervor, dass Zemente, die ähnliche RC-Materialien gleichbleibender Reaktivität (d. h. konstanter Hydratationswärme) bzw. aus vergleichbaren Stoffgruppen enthalten,

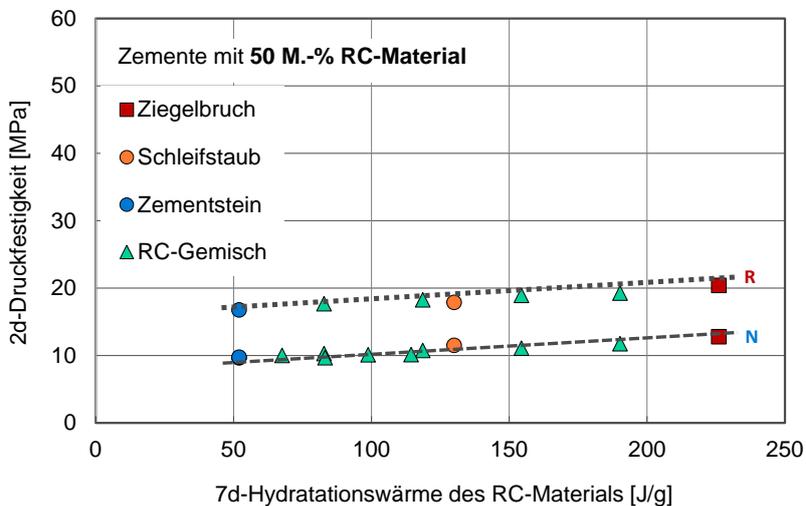
- nach Wechsel der Klinkerkomponente (z. B. von CEM I 52,5 N auf CEM I 52,5 R) oder
- nach einer Verringerung des RC-Anteils (z. B. von 50 M.-% auf 30 M.-%)

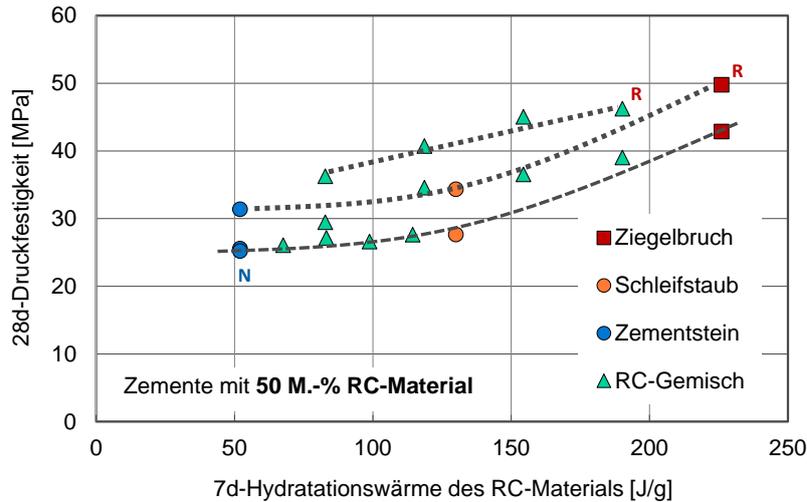
in jedem Prüfalalter Festigkeitssteigerungen erzielen können.

Wurde jedoch eine Substitution des RC-Materials durchgeführt und z. B. wenig reaktiver Zementstein durch hoch reaktiven Ziegelstein in gleichen Anteilen ersetzt, so hatte dies (unter Verwendung desselben CEM I) keine signifikanten Auswirkungen auf die Anfangsfestigkeiten. Deutliche Effekte zeigten sich hingegen in den Normfestigkeiten. Der puzzolanisch reaktive Ziegelbruch leistete zur Festigkeitsentwicklung der R-Zemente einen Beitrag, der inerte Zementstein führte zur Verringerung der Festigkeit. Je höher der substituierte RC-Anteil (30 M.-% oder 50 M.-%), desto deutlicher ausgeprägt war dieser Effekt auf die 28d-Festigkeit der R-Zemente.



**Bild 11** Druckfestigkeit der Zemente in Abhängigkeit der Hydratationswärme des im Zement eingesetzten RC-Materials, Verwendung von RC-Materialien unterschiedlicher Zusammensetzung und Reaktivität (Hydratationswärme), Zemente mit einem RC-Anteil von 30 M.-% (obere Trendlinie: Zemente mit 70 M.-% CEM I 52,5 R, untere Trendlinie: Zemente mit 70 M.-% CEM I 52,5 N)  
 Bild oben: Anfangsfestigkeit im Prüfalalter von zwei Tagen  
 Bild unten: Normfestigkeit im Prüfalalter von 28 Tagen





**Bild 12** Druckfestigkeit der Zemente in Abhängigkeit der Hydratationswärme des im Zement eingesetzten RC-Materials, Verwendung von RC-Materialien unterschiedlicher Zusammensetzung und Reaktivität (Hydratationswärme), Zemente mit einem RC-Anteil von 50 M.-% (obere Trendlinie: Zemente mit 50 M.-% CEM I 52,5 R, untere Trendlinie: Zemente mit 50 M.-% CEM I 52,5 N)  
 Bild oben: Anfangsfestigkeit im Prüfalalter von zwei Tagen  
 Bild unten: Normfestigkeit im Prüfalalter von 28 Tagen

## 6.4 Einflüsse auf die Porosität der Normmörtel im Alter von 28 Tagen

### 6.4.1 Granulometrische und stoffliche Einflüsse auf die Gesamtporosität

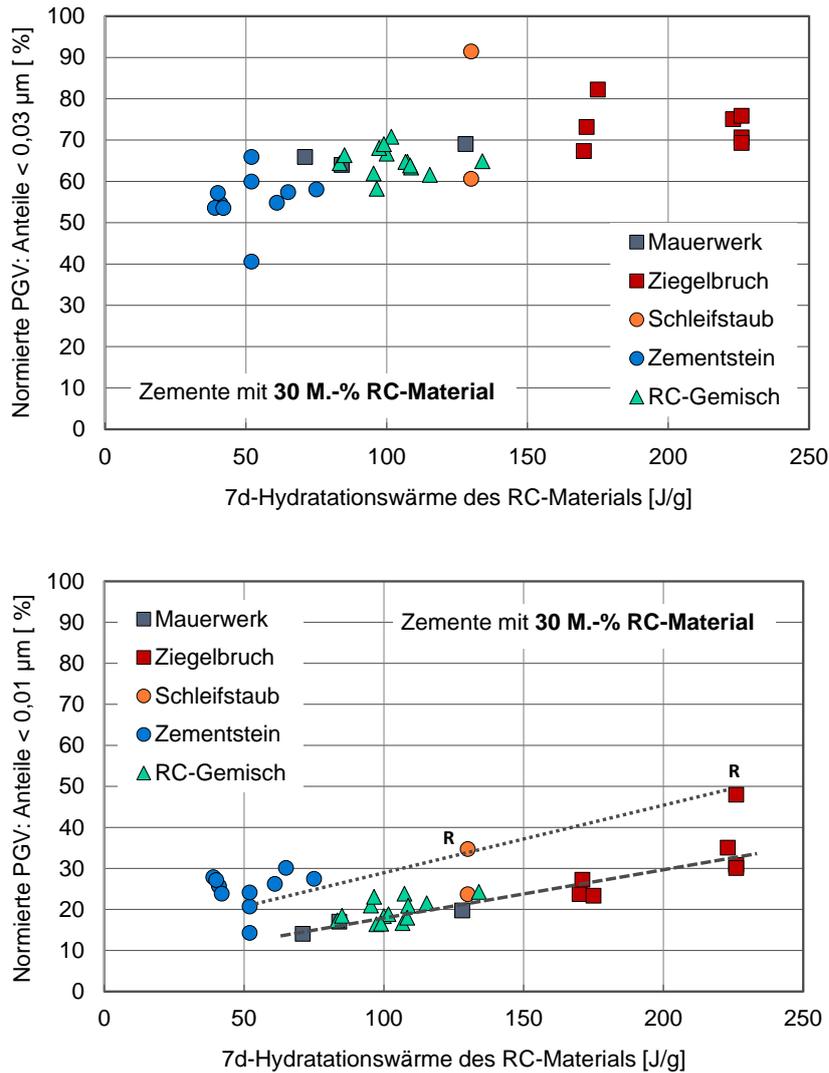
Die Gesamtporosität entspricht dem gesamten, für Quecksilber zugänglichen Porenraum. An der kumulierten Porenradienverteilung der Mörtelproben im Alter von 28 Tagen wurde das Porenvolumen ermittelt, das beim kleinsten Porenradius gemessen wurde.

*Anmerkung: Im Vergleich zu dem für Wasser bei 15 MPa zugänglichen Porenraum ist die Gesamtporosität aus der Quecksilberdruckporosimetrie i. d. R. kleiner als die in der Wasseraufnahme unter Druck ermittelten Porositäten. Die Wasseraufnahme der Festmörtel wurde in diesem Projekt nicht untersucht.*

Die Packungsdichte der R-Zemente sowie die Reaktivität der Recyclingmehle hatten keinen systematischen Einfluss auf die Gesamtporosität der Normmörtel im Alter von 28 Tagen (vgl. **Bild 45** und **Bild 46** im Anhang). Die verwendeten R-Zemente hatten einen RC-Anteil von 30 M.-%. Die Mörtel unter Verwendung ziegelhaltiger Zemente wiesen deutlich geringere Gesamtporositäten auf als die Zementmörtel ohne Ziegelanteile (z. B. Zementstein). Besonders gering waren die Gesamtporositäten bei Verwendung reaktiver Ziegelmehle. Hier wurden Porositäten < 10 Vol.-% erzielt.

### 6.4.2 Stoffliche Einflüsse auf die Porenanteile < 0,03 µm und < 0,01 µm

**Bild 13** und **Bild 47** (im Anhang) zeigen die Porenanteile < 0,03 µm bzw. < 0,01 µm der auf 100% normierten Porenradienverteilungen in Abhängigkeit der Hydratationswärme. Je ziegelreicher das RC-Material und je höher seine Hydratationswärme, umso größer wurde der für die Dauerhaftigkeit zementbasierter Baustoffe relevante Gelporenanteil.



**Bild 13** Porenanteile der R-Zement-Normmörtel < 0,03 µm (oben) sowie < 0,01 µm (unten) in Abhängigkeit der Hydratationswärme des im Zement eingesetzten RC-Materials, Untersuchung der auf 100% normierten PGV im Prüfalter von 28 Tagen, Verwendung von RC-Materialien unterschiedlicher Zusammensetzung und Reaktivität (Hydratationswärme) in Zementen mit einem RC-Anteil von 30 M.-%

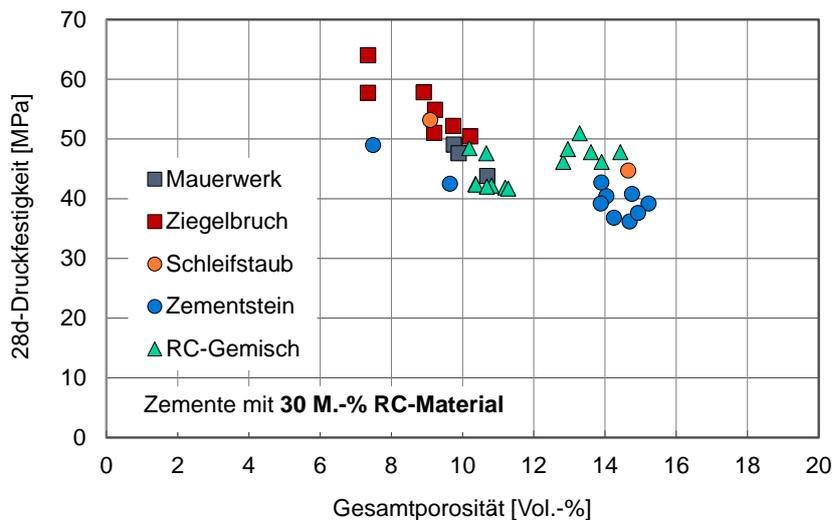
Auch der als Klinkerkomponente verwendete CEM I hatte entsprechend seiner Mahlfineinheit bzw. seines Anteils im R-Zement Einfluss auf die PGV der Mörtel. Etwa 20% bis 50% des Porenvolumens einiger hier untersuchter ziegelhaltiger Zementmörtel (RC-Anteil 30 M.-%) bestand aus Gelporen < 0,01 µm. Die Mörtel mit R-Zementen ohne Ziegel erreichten Gelporenanteile von etwa 30% und lagen damit – trotz deutlich geringerer Hydratationswärme – auf einem ähnlichen Niveau wie einige ziegelhaltige R-Zement-Mörtel.

#### 6.4.3 Zusammenhang zwischen Gesamtporosität und Druckfestigkeit

Die granulometrische und stoffliche Zusammensetzung der R-Zemente beeinflusst die Entstehung des Zementsteingefüges, seine Dichte und seine Festigkeit. Das **Bild 14** sowie **Bild 48** (im Anhang) stellen die 28-Tage-Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Porosität der Normmörtel dar.

Die Zemente mit 30 M.-% Recyclingmehl erreichten im Alter von 28 Tagen Druckfestigkeiten zwischen 35 MPa und 65 MPa. Die Gesamtporositäten lagen zwischen 7 Vol.-% und 15 Vol.-%. Zementmörtel mit 30 M.-% Zementstein zeigten eine vergleichsweise hohe Gesamtporosität sowie eine geringe Druckfestigkeit. Wurde Ziegel als Bestandteil der Zemente verwendet, erreichen die Normmörtel im Prüfalter von 28 Tagen geringere Gesamtporositäten bei gleichzeitig höheren Festigkeiten.

Aus dem Bild geht weiterhin hervor, dass eine Veränderung der Zusammensetzung der RC-Materialien (z. B. von ziegelreich zu ziegelhaltig hin zu RC-Mischungen mit wenig Ziegel bzw. zum Zementstein ohne Ziegel) zu einer deutlichen Zunahme der Gesamtporosität bzw. zu einer Abnahme der Festigkeit führte. Aber auch bei ähnlicher Gesamtporosität (z. B. bei 10 Vol.-%) gab es Festigkeitsunterschiede von bis zu ca. 10 MPa in Abhängigkeit von der Art des RC-Materials.



**Bild 14** Druckfestigkeit der Zemente in Abhängigkeit der Gesamtporosität am Normmörtel, Prüfalter 28 Tage, Verwendung von RC-Materialien unterschiedlicher Zusammensetzung in Zementen mit einem RC-Anteil von 30 M.-%

Bei Verwendung der Zemente mit einem RC-Anteil von 50 M.-% (**Bild 48**) lagen die Festigkeiten zum Teil unterhalb von 30 MPa. Sofern Recyclingmehl geringer Reaktivität und Feinheit sowie ein CEM I der Festigkeitsklasse 52,5 N eingesetzt wurden, entstand ein poröses Mörtelgefüge mit einer Gesamtporosität von ca. 18 Vol.-%. Mit der Verwendung feinerer Recyclingmehle höherer Reaktivität in Kombination mit CEM I 52,5 R konnten die Ergebnisse für Festigkeit und Porosität verbessert und in den Bereich der Zemente mit 30 M.-% RC-Anteil gebracht werden.

## 7 Darstellung der Ergebnisse und Diskussion - Teil 2: Eigenschaften von R-Zement-Mörteln in Abhängigkeit des RC-Anteils

### 7.1 Randbedingungen zur Herstellung von Mörteln mit plastischer Konsistenz unter Verwendung klinkerreduzierter R-Zemente

Mit welchem Konzept kann künftig die größtmögliche Klinker- und damit CO<sub>2</sub>-Effizienz bei gleichzeitiger Sicherstellung der Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit in Mörtel und Beton erreicht werden? In welchem Maße können auch feindisperse Stoffe aus dem Recycling mineralischer Bauabfälle oder alternative Ressourcen aus der Kreislaufwirtschaft den Portlandzementklinker substituieren und dazu beitragen, primäre Ressourcen zu schonen? Eine Möglichkeit bietet die granulometrische Optimierung klinkerreduzierter R-Zemente bei gleichzeitiger Anpassung des Wasserzementwertes. Gezielte Veränderungen der Zement- und Mörtelzusammensetzungen sollten dazu beitragen, die Frisch- und Festmörtel-eigenschaften zu steuern und somit Voraussetzungen zu schaffen, R-Zemente mit RC-Anteilen  $\geq 20$  M.-% in baupraktische Anwendungen zu bringen.

Die VDZ Technology gGmbH und das F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde haben in einem gemeinsamen Forschungsprojekt klinkereffiziente Zemente mit Klinkergehalten von 50 M.-% bis zu 35 M.-% systematisch untersucht [15]. In dem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekt "Granulometrische Optimierung klinkereffizienter Zemente – Effekte auf die Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit von Beton" wurden die granulometrischen Eigenschaften der Zemente und ihre Effekte auf dauerhaftigkeitsrelevante Betoneigenschaften untersucht. Darüber hinaus wurde untersucht, wie granulometrisch optimierte Zemente eigenschafts- und anwendungsgerecht geprüft werden können.

Die Ermittlung der Zementeigenschaften erfolgte gemäß den Definitionen der DIN EN 197-1. Dies bedeutet z. B. für die Druckfestigkeit, dass diese bei konstantem Wasserzementwert (w/z-Wert) ermittelt wurde. Die Dauerhaftigkeitsprüfungen folgten der Logik aus Zulassungsverfahren, wonach diese in konstanten Grenzrezepturen nach DIN EN 206-1 / DIN 1045-2 durchgeführt werden.

Für Betone, die gewisse Dauerhaftigkeitsprüfungen nicht mehr bestehen konnten, weil sie z. B. unter Verwendung ressourcenschonender Kompositzemente hergestellt wurden, kam ein alternatives Vorgehen zur Anwendung [23]. Diese Methode wurde nunmehr in der Untersuchung von R-Zementmörteln angewendet [24]. Bei vergleichbaren Verarbeitungseigenschaften wurde der Wassergehalt variiert. Die Anpassung (Verringerung/Erhöhung) des Wasserzementwertes erfolgte - ausgehend von Normmörteln – stufenweise so, dass eine vergleichbare steifplastische Mörtelkonsistenz (kurz: SP) vorlag.

Die Kriterien für eine steifplastische Konsistenz (SP) sind nicht an das Erreichen eines definierten Mörtelausbreitmaßes der Frischmörtel gebunden. Vielmehr waren die Frischmörtel unmittelbar nach dem Anmischen bzw. nach der Bestimmung des Mörtelausbreitmaßes auf dem Hägermann-Ausbreitisch optisch zu beurteilen. Für das Erreichen einer steifplastischen Konsistenz (SP) nach [23] mussten die Frischmörtel-Ausbreitkuchen mindestens zwei Kriterien einer „typisch steifen Konsistenz“ und mindestens zwei Kriterien einer „typisch plastischen Konsistenz“ aufweisen.

Merkmale einer steifen Mörtelkonsistenz waren z. B.:

- die Mörteloberflächen waren rau, körnig und brüchig,
- die Außenränder der Ausbreitkuchen waren nicht glatt geschlossen,
- die größeren Gesteinskörnungen und die Form des Trichters zeichneten sich deutlich ab,
- die Ausbreitkuchen hatten keinen Zusammenhalt, bildeten Lunker und waren zum Teil zerfallen.

Merkmale einer plastischen Mörtelkonsistenz waren z. B.:

- die Mörteloberflächen waren geschlossen, wenig rau bis glatt, aber nicht glänzend,

- die Außenränder der Ausbreitkuchen waren geschlossen,
- die größeren Gesteinskörnungen waren im Mörtel eingebunden, aber noch sichtbar,
- die Ausbreitkuchen hatten ein gutes Zusammenhaltevermögen und bildeten keine Lunker,
- während des Verdichtens (Hägermann-Ausbreittisch) breiteten sich die Mörtel gleichmäßig aus.

Die Lagerung und Prüfung der Mörtel folgten DIN EN 196-1.

Die Gegenüberstellung der R-Zement-Mörtel und ihrer Eigenschaften erfolgte innerhalb dieses „Bewertungskorridors“ (vgl. [23], [24]), der zum einen

- Ergebnisse mit einem konstanten w/z-Wert = 0,50 (Normbedingungen gemäß DIN EN 196-1) und zum anderen
- Ergebnisse mit einer konstanten, steifplastischen Konsistenz (SP) abbildete.

Innerhalb dieser Prüfungen blieben die Zementgehalte ( $z = 450$  g) sowie die stofflichen und granulometrischen Zusammensetzungen der Zemente unverändert. Es wurden keine Zusatzmittel (z. B. zur Beeinflussung der Konsistenz) eingesetzt.

Es wurden R-Zemente mit 20 M.-%, 30 M.-%, 40 M.-% und 50 M.-% RC-Material hergestellt und untersucht. Dabei wurden die Anteile Zementstein (ZS 8) bzw. Ziegelschleifstaub (ZI 13) schrittweise angehoben und der Klinkerfaktor (CEM I 52,5 N) wurde schrittweise bis auf 50% reduziert.

Außerdem wurden Zemente mit 50 M.-% gemischtem RC-Material in Kombination 50 M.-% Klinker (CEM I 52,5 N) hergestellt und untersucht. Das RC-Material wurde mit 10 M.-%, 20 M.-%, 30 M.-% und 40 M.-% Ziegelschleifstaub sowie 40 M.-%, 30 M.-%, 20 M.-% und 10 M.-% Zementstein gemischt und in der Summe von 50 M.-% dem R-Zement zugegeben.

Zum Vergleich wurden einige R-Zemente mit 30 M.-% bzw. mit 50 M.-% RC-Material in einem Bestandteil ihrer Zusammensetzung verändert, um

- den Einfluss der Klinkerkomponente (CEM I 52,5 N vs. CEM I 52,5 R)
- den Einfluss der Tonreaktivität (Ziegelschleifstaub vs. Ziegelbruch)
- den Einfluss der Zementsteinfeinheit (ZS 8 grob vs. ZS 9 fein)

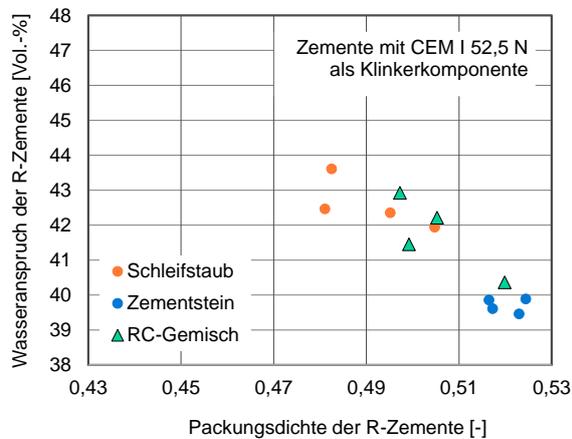
zu erfassen.

## 7.2 Wasseranspruch in Abhängigkeit der Zementzusammensetzung und der Zementpackungsdichte

Die schrittweise Erhöhung des RC-Anteils von 20 M.-% auf 50 M.-% veränderte die Packungsdichte und den Wasseranspruch der R-Zemente. Die Ergebnisse sind in **Bild 49** und **Bild 50** (s. Anhang) zusammengefasst. Die Zugabe von Ziegelschleifstaub verringerte die Packungsdichte der R-Zemente auf Werte von ca. 0,48. Nach Zugabe von Zementstein wurden geringfügig zunehmende Packungsdichten auf ca. 0,52 ermittelt. Die Packungsdichten der Zemente mit RC-Gemischen lagen je nach RC-Zusammensetzung im Bereich zwischen 0,49 und 0,52.

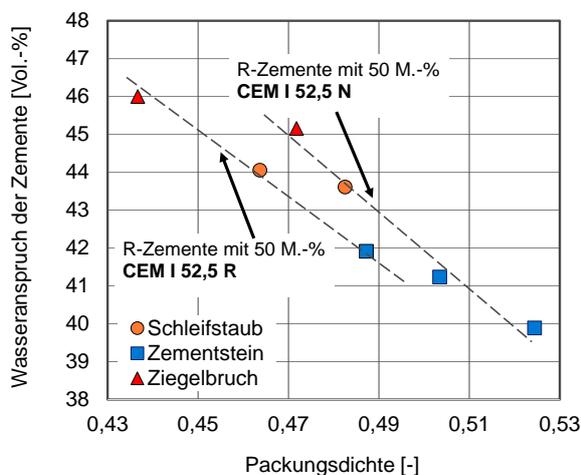
Entsprechend der Packungsdichten wurde auch der Wasseranspruch (nach Puntke) in Abhängigkeit der Zementzusammensetzung geringfügig beeinflusst (**Bild 50**). So nahm der Wasseranspruch der ziegelhaltigen Zemente von 42,0 Vol.-% auf etwa 43,5 Vol.-% zu. Bei Zugabe von Zementstein wurden Werte zwischen 39,5 Vol.-% und 40 Vol.-% ermittelt. Der Wasseranspruch der Zemente mit RC-Gemischen lag je nach RC-Zusammensetzung im Bereich zwischen 40 Vol.-% und 43 Vol.-%.

Der Zusammenhang zwischen der Packungsdichte und dem Wasseranspruch der Zemente ist dem **Bild 15** zu entnehmen. Mit zunehmender Packungsdichte der R-Zemente nahm ihr Wasseranspruch erwartungsgemäß ab.

**Bild 15**

Wasseranspruch (Punkte) in Abhängigkeit der Packungsdichte der R-Zemente mit RC-Anteilen von 20 M.-% bis 50 M.-% in Kombination mit CEM I 52,5 N als Klinkerkomponente

Einige R-Zemente mit einem RC-Anteil von 50 M.-% wurden alternativ mit CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente bzw. mit Ziegelbruch als Tonkomponente hergestellt und untersucht. Aus **Bild 16** geht hervor, dass der Zusammenhang weiterhin besteht und auch Zemente mit vergleichsweise geringen Packungsdichten (z. B. unter Verwendung von 50 M.-% Ziegelbruch in Kombination mit CEM I 52,5 R) entsprechend eingeordnet werden konnten.

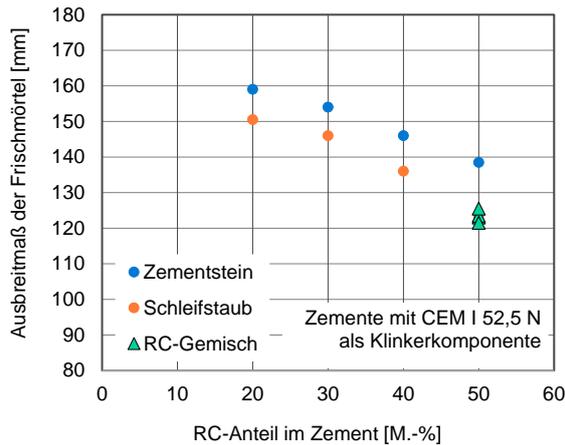
**Bild 16**

Wasseranspruch (Punkte) in Abhängigkeit der Packungsdichte der R-Zemente mit konstanten RC-Anteilen von 50 M.-% in Kombination mit CEM I 52,5 N bzw. CEM I 52,5 R als Klinkerkomponenten

### 7.3 Verarbeitbarkeit der Frischmörtel mit konstantem w/z-Wert in Abhängigkeit der Zementzusammensetzung und der Zementpackungsdichte

Unter Verwendung der R-Zemente wurden zunächst Normmörtel gemäß DIN EN 196-1 ( $w/z = 0,50$ ) hergestellt. Unmittelbar nach Herstellung wurden an den Frischmörteln die Ausbreitmaße bestimmt und in den folgenden Bildern als Mittelwerte dargestellt. Alle R-Zement-Mörtel wurden ohne Zusatzmittel gemischt.

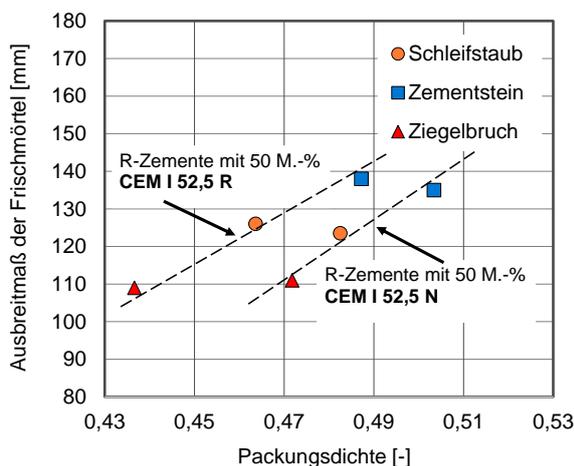
**Bild 17** zeigt, dass mit steigendem RC-Anteil die Ausbreitmaße der Frischmörtel abnahmen. Die Mörtelkonsistenz wurde zunehmend steifer und schwieriger verarbeitbar. Die Ausbreitmaße der ziegelhaltigen Mörtel nahmen von ca. 150 mm auf ca. 125 mm ab. Die Ausbreitmaße der zementsteinhaltigen Mörtel verringerten sich von ca. 160 mm auf ca. 140 mm und lagen damit auf geringfügig höherem Niveau als die ziegelhaltigen Mörtel.

**Bild 17**

Ausbreitmaß der Frischmörtel in Abhängigkeit des RC-Anteils der R-Zemente, Verwendung von RC-Materialien unterschiedlicher Zusammensetzung in Kombination mit CEM I 52,5 N als Klinkerkomponente

Zwischen den Mörtelausbreitmaßen und der Packungsdichte bzw. dem Wasseranspruch der R-Zemente mit RC-Anteilen von 20 M.-% bis 50 M.-% ließ sich kein eindeutiger Zusammenhang ableiten (vgl. **Bild 51** und **Bild 52** im Anhang). Die Auswertung der Zemente mit variablen Anteilen Recyclingmehl zeigt lediglich, dass unter Verwendung von Zementen mit hohem RC-Anteil geringe Ausbreitmaße von rd. 120 mm aufgrund steifer Mörtelkonsistenzen ermittelt wurden.

Aus der Auswertung der Zemente mit konstant 50 M.-% Recyclingmehl lässt sich ableiten, dass mit ansteigender Zementpackungsdichte auch die Mörtelausbreitmaße zunehmen können. Voraussetzung ist, dass die Klinkerkomponente unverändert blieb und ausschließlich das RC-Material substituiert wurde. Wie aus **Bild 18** hervorgeht, wurden mit 50 M.-% CEM I 52,5 N die Ausbreitmaße von ca. 110 mm auf ca. 135 mm angehoben, mit 50 M.-% CEM I 52,5 R wurden die Ausbreitmaße von ca. 110 mm auf ca. 140 mm erhöht. Beide Beispiele zeigen, dass der Ersatz von 50 M.-% Ziegelbruch durch Schleifstaub oder Zementstein zu höheren Packungsdichten sowie weicheren Konsistenzen führte.

**Bild 18**

Ausbreitmaß der Frischmörtel in Abhängigkeit der Packungsdichte der R-Zemente mit konstanten RC-Anteilen von 50 M.-% in Kombination mit CEM I 52,5 N bzw. CEM I 52,5 R als Klinkerkomponenten

## 7.4 Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Zementzusammensetzung

Im **Bild 19** wurden Ergebnisse der Anfangs- und Normfestigkeit von R-Zementen mit 30 M.-% Recyclingmehl in Kombination mit CEM I 52,5 N gegenübergestellt. Die Verdünnungslinien wurden eingetragen. Sie beschreiben den Verdünnungseffekt der in Masseprozent eingebrachten Recyclingmehl-

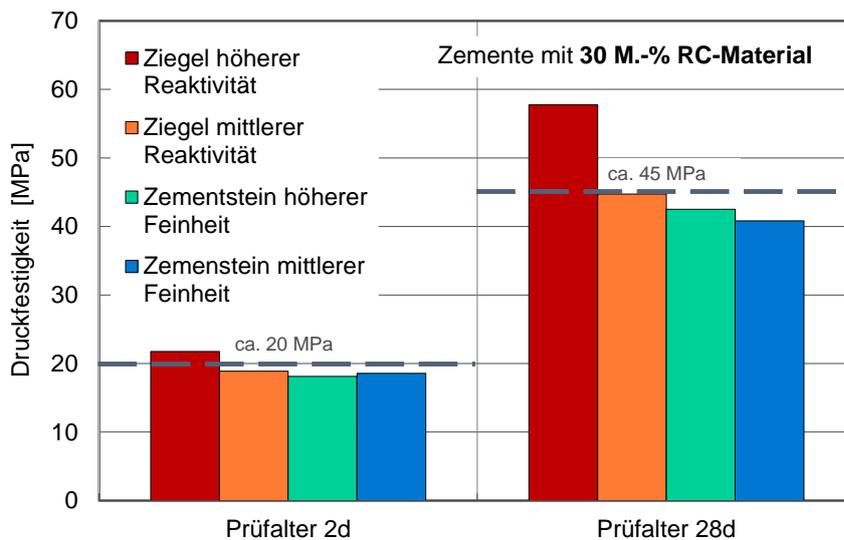
Anteile (30 M.-%, 50 M.-%) und vergleichen die Festigkeit der R-Zemente mit der Festigkeit von 100 Masseprozent CEM I entsprechender Festigkeitsklasse.

In **Bild 19** und **Bild 20** sowie in **Bild 53** und **Bild 54** (im Anhang) wurden Ergebnisse der Untersuchungen an R-Zementen mit stofflich und granulometrisch unterschiedlichen Recyclingmehlen ausgewertet:

- Ziegelbruch höherer Reaktivität
- Ziegelschleifstaub mittlerer Reaktivität
- Zementstein höherer Feinheit
- Zementstein mittlerer Feinheit

Die Zemente mit 30 M.-% Ziegelbruch höherer Reaktivität haben in jedem Prüfalalter die Verdünnungslinie überschritten und erreichten Druckfestigkeiten von 22 MPa bzw. 58 MPa. Die Zemente mit 30 M.-% Ziegelschleifstaub mittlerer Reaktivität erzielten Festigkeiten nahe der Verdünnungslinie.

Die Zemente mit jeweils 30 M.-% inertem Zementstein lagen erwartungsgemäß unter der errechneten Verdünnung. Ihre Festigkeitsverläufe unterhalb der Verdünnungslinie folgten den Erkenntnissen aus [20]. Insgesamt wurden Festigkeitsklassen gemäß DIN EN 197-1 zwischen 52,5 N (mit Ziegelbruch) und 32,5 R (mit Zementstein) ermittelt.

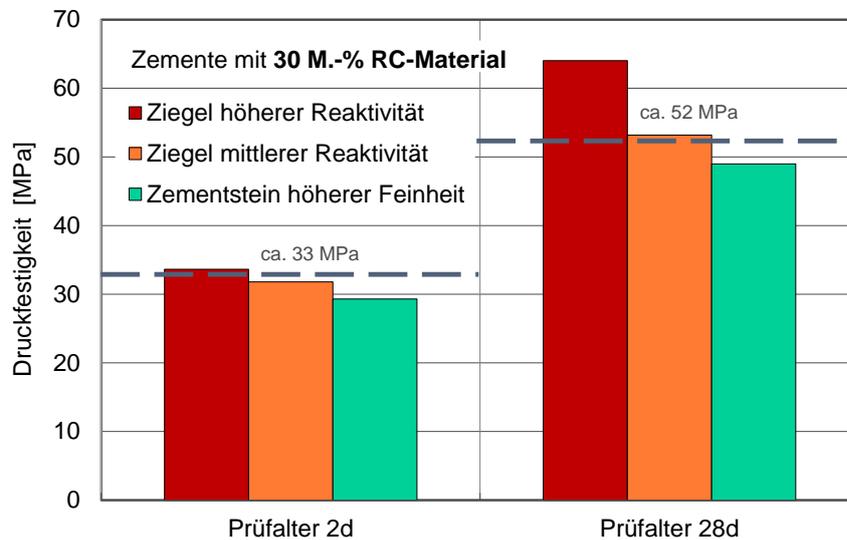


**Bild 19** Druckfestigkeiten der Normmörtel im Prüfalalter von zwei bzw. 28 Tagen, Verwendung von R-Zementen mit **30 M.-% RC-Material** unterschiedlicher Feinheit bzw. Reaktivität, Kombinationen mit **70 M.-% CEM I 52,5 N** als Klinkerkomponente

Wurde der RC-Anteil auf 50 M.-% heraufgesetzt (vgl. **Bild 53**), konnte keiner der hier untersuchten R-Zemente mit 50 M.-% CEM I 52,5 N die 2d-Verdünnungslinie (14 MPa) erreichen. Die 2d-Druckfestigkeiten erreichten Werte zwischen ca. 10 MPa und 13 MPa. Die 28d-Verdünnungslinie (32 MPa) wurde von dem R-Zement mit 50 M.-% Ziegelbruch deutlich überschritten, die anderen R-Zemente wiesen Festigkeiten < 30 MPa auf und haben somit die Anforderungen der kleinsten Festigkeitsklasse 32,5 nicht erfüllt.

Im **Bild 20** wurden ebenfalls Ergebnisse der Anfangs- und Normfestigkeit von R-Zementen mit 30 M.-% Recyclingmehl – hier in Kombination mit CEM I 52,5 R – gegenübergestellt. Die Verdünnungslinien wurden bei 33 MPa bzw. 52 MPa entsprechend markiert. Auch in dieser Zementzusammensetzung konnte der ziegelbruchhaltige Zement die Verdünnungslinien erreichen bzw. überschreiten. Mit ca. 34 MPa (2d) und ca. 64 MPa (28d) könnte dieser Zement der höchsten Festigkeitsklasse 52,5 R

zugeordnet werden. Der R-Zement mit weniger reaktivem Ziegelschleifstaub erreichte etwas geringere Normfestigkeiten, lag aber dennoch in der Festigkeitsklasse 52,5 R. Die geringsten Festigkeiten (unterhalb der Verdünnung) wurden unter Verwendung des Zementsteins gemessen. Sie erfüllten die Anforderungen der Festigkeitsklasse 42,5 R.



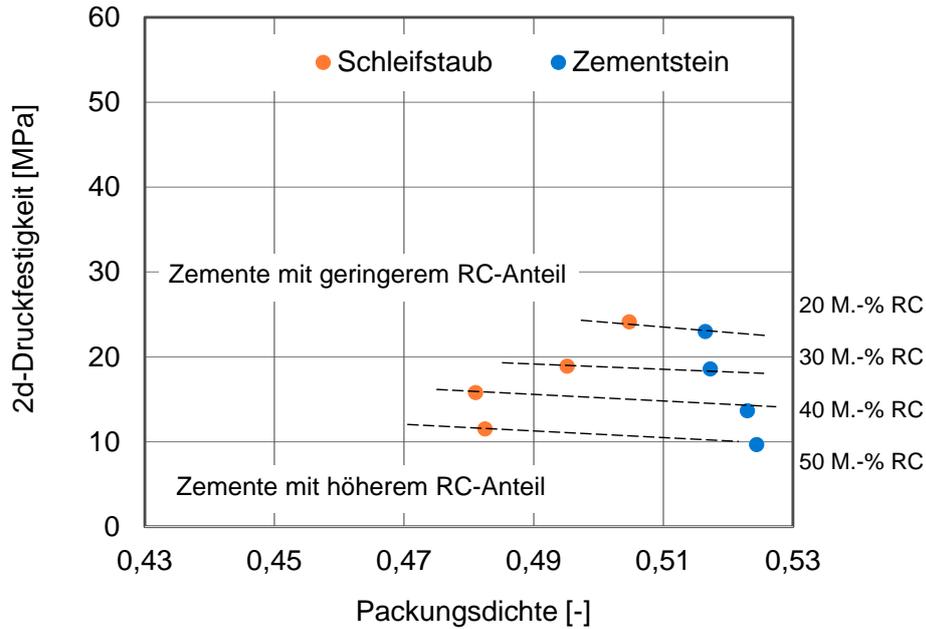
**Bild 20** Druckfestigkeiten der Normmörtel im Prüfalalter von zwei bzw. 28 Tagen, Verwendung von R-Zementen mit **30 M.-% RC-Material** unterschiedlicher Feinheit bzw. Reaktivität, Kombinationen mit **70 M.-% CEM I 52,5 R** als Klinkerkomponente

In den Untersuchungen der Zemente mit 50 M.-% Recyclingmehl in Kombination mit CEM I 52,5 R wurde die 2d-Verdünnungslinie unterschritten. Der Zement mit Ziegelbruch erzielte mit einer 28d-Druckfestigkeit von ca. 50 MPa ein Ergebnis oberhalb der Verdünnung und erfüllt zugleich die Anforderungen an die Festigkeitsklasse 42,5 R. Während der Zement mit 50 M.-% Ziegelschleifstaub die Festigkeitsklasse 32,5 R erzielte, lag der Zement mit 50 m.-% Zementstein unterhalb der Mindestdruckfestigkeit von 32,5 MPa.

## 7.5 Druckfestigkeit in Abhängigkeit des RC-Gehaltes und der Packungsdichte

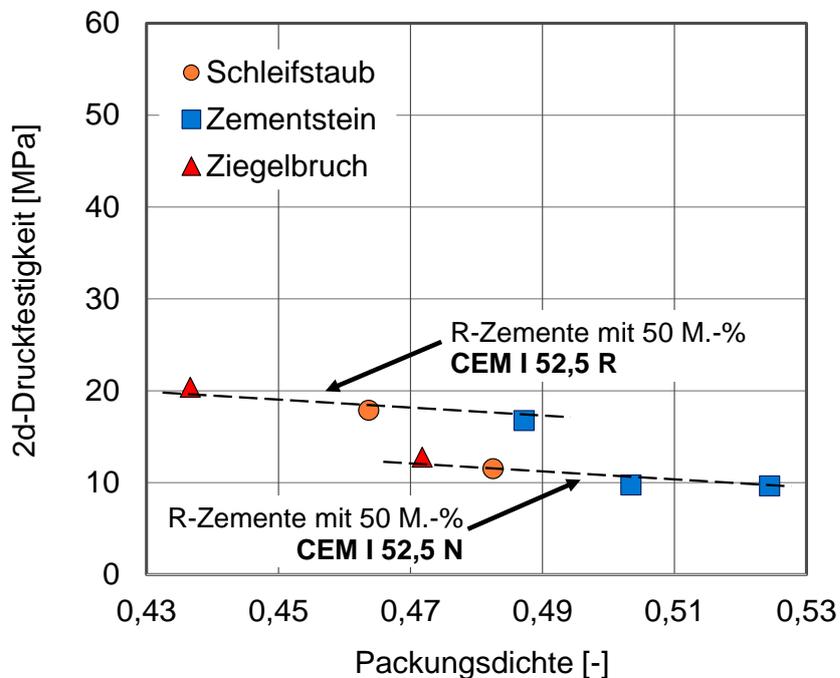
In den folgenden Bildern ist jeweils die Mörteldruckfestigkeit über der Zementpackungsdichte der R-Zemente aufgetragen. Sofern der RC-Anteil und die Klinkerkomponente gleichblieben, wurde in jedem Prüfalalter mit zunehmender Packungsdichte der R-Zemente eine abnehmende Druckfestigkeit festgestellt. Wie aus **Bild 21** hervorgeht, wiesen die ziegelhaltigen Zemente bei jeweils konstantem RC-Anteil geringere Packungsdichten auf als die zementsteinhaltigen Zemente, was sich jeweils in einer geringfügig höheren Anfangsfestigkeit äußerte.

Erwartungsgemäß hatte eine Erhöhung der RC-Anteile in jedem Prüfalalter und unter sonst konstanten Randbedingungen eine Verringerung der Druckfestigkeit (Verdünnung) zur Folge (vgl. **Bild 21** bis **Bild 24**).



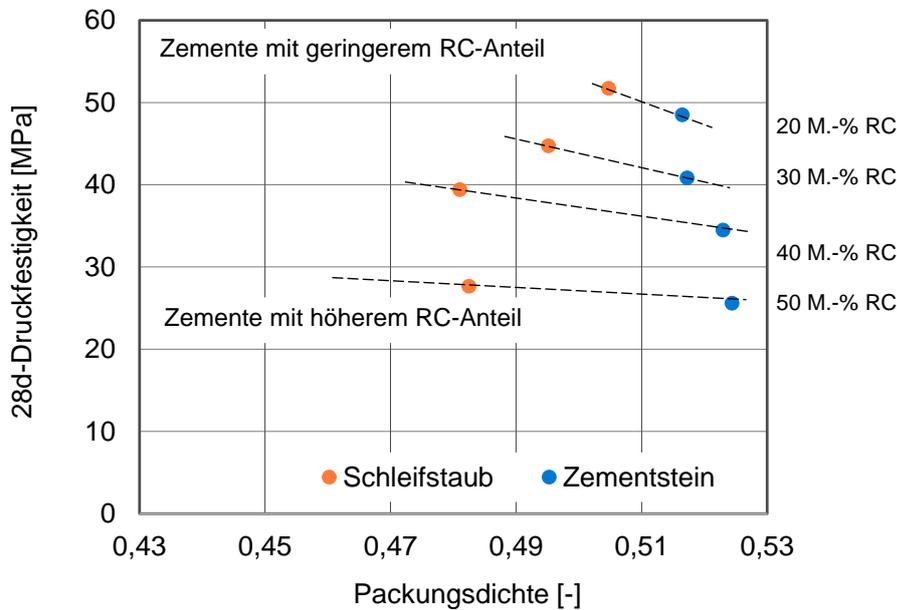
**Bild 21** Anfangsfestigkeiten der R-Zemente in Abhängigkeit ihrer Packungsdichten, Verwendung von Zementen mit RC-Anteilen von 20 M.-% bis 50 M.-% in Kombination mit CEM I 52,5 N

Im **Bild 22** wurden die Anfangsfestigkeiten einiger R-Zemente mit 50 M.-% Recyclingmehl eingetragen. Sowohl die R-Zemente auf Basis des CEM I 52,5 **N** als auch die R-Zemente auf Basis des CEM I 52,5 **R** verdeutlichen, dass mit der Änderung der Art des Recyclingmehls eine Veränderung der Packungsdichte und der Anfangsfestigkeit der Zemente einhergeht.

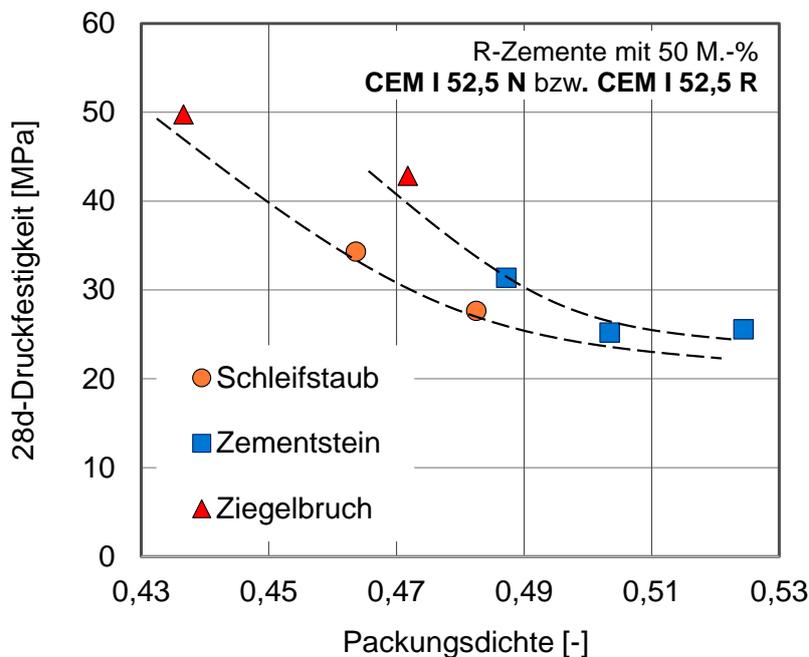


**Bild 22** Anfangsfestigkeiten der R-Zemente in Abhängigkeit ihrer Packungsdichten, Verwendung von Zementen mit einem konstanten RC-Anteil von 50 M.-% in Kombination mit CEM I 52,5 N bzw. CEM I 52,5 R

Im **Bild 23** und **Bild 24** wurden die 28d-Druckfestigkeiten in Abhängigkeit der Zementpackungsdichten aufgetragen. Die Zemente in Kombination mit CEM I 52,5 N zeigen, dass ziegelhaltige Recyclingmehle aufgrund der später einsetzenden (puzzolanischen) Reaktion zu teilweise deutlich höheren Druckfestigkeiten führen können als zementsteinhaltige Recyclingmehle. Der im Alter von zwei Tagen festgestellte Packungsdichteeffekt auf die frühe Druckfestigkeit wurde im Alter von 28 Tagen von den puzzolanischen Reaktionen überlagert und verstärkt.



**Bild 23** Normfestigkeiten der R-Zemente in Abhängigkeit ihrer Packungsdichten, Verwendung von Zementen mit RC-Anteilen von 20 M.-% bis 50 M.-% in Kombination mit CEM I 52,5 N



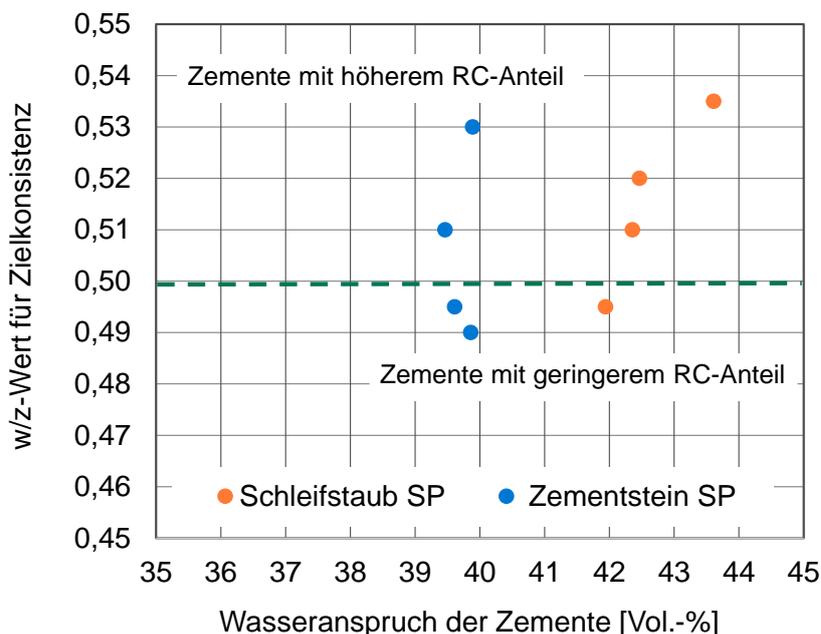
**Bild 24** Normfestigkeiten der R-Zemente in Abhängigkeit ihrer Packungsdichten, Verwendung von Zementen mit einem konstanten RC-Anteil von 50 M.-% in Kombination mit CEM I 52,5 N bzw. CEM I 52,5 R

In der Untersuchung der Zemente mit 50 M.-% Recyclingmehl in Kombination mit CEM I beider Festigkeitsklassen (**Bild 24**) wurden Packungsdichten zwischen 0,52 und 0,44 ermittelt. Die Unterschiede in der 28d Druckfestigkeit betragen bis zu 25 MPa.

Im **Bild 55** im Anhang wurden die Druckfestigkeiten der Zemente mit 50 M.-% RC-Gemisch bestehend aus Schleifstaub und gemahlenem Zementstein über der Packungsdichte eingetragen. Die Packungsdichte hatte auf die Anfangsfestigkeit keinen und auf die 28d-Festigkeit einen mäßigen Einfluss.

## 7.6 Veränderung der w/z-Werte zur Einstellung der steifplastischen Mörtelkonsistenz (SP)

Wie im Abschnitt 7.1 (Randbedingungen zur Herstellung von Mörteln mit plastischer Konsistenz unter Verwendung klinkerreduzierter R-Zemente) sowie in [23] und [24] erläutert, wurden unter Verwendung der Zemente mit 20 M.-% bis 50 M.-% RC-Anteil in Kombination mit CEM I 52,5 N Mörtel mit vergleichbarer steifplastischer Konsistenz (SP) hergestellt und untersucht. Nach Anpassung der Wasserzugabe zum Erreichen der Zielkonsistenz SP wurden die entsprechenden Wasserzementwerte (w/z-Wert SP) berechnet. Die Versuchsergebnisse wurden im **Bild 25** in Abhängigkeit des Wasseranspruchs (Punkte) aufgetragen. Das Bild zeigt, dass (ausgehend von der Normmörtelzusammensetzung mit  $w/z = 0,50$ ) bei Verwendung der ziegelhaltigen Zemente mit 30 M.-%, 40 M.-% und 50 M.-% Recyclingmehl der Wasserzementwert angehoben werden musste. Auch bei Verwendung der Zemente mit 40 M.-% und 50 M.-% Zementstein musste zum Erreichen der steifplastischen Zielkonsistenz SP das Wasser-Zement-Verhältnis auf Werte  $> 0,50$  erhöht werden.



**Bild 25** Wasserzementwerte für eine konstante, steifplastische Zielkonsistenz (SP) der Frischmörtel unter Verwendung von R-Zementen mit RC-Gehalten von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub, Zementstein) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N  
Darstellung der w/z-Werte (SP) in Abhängigkeit des Wasseranspruchs der R-Zemente

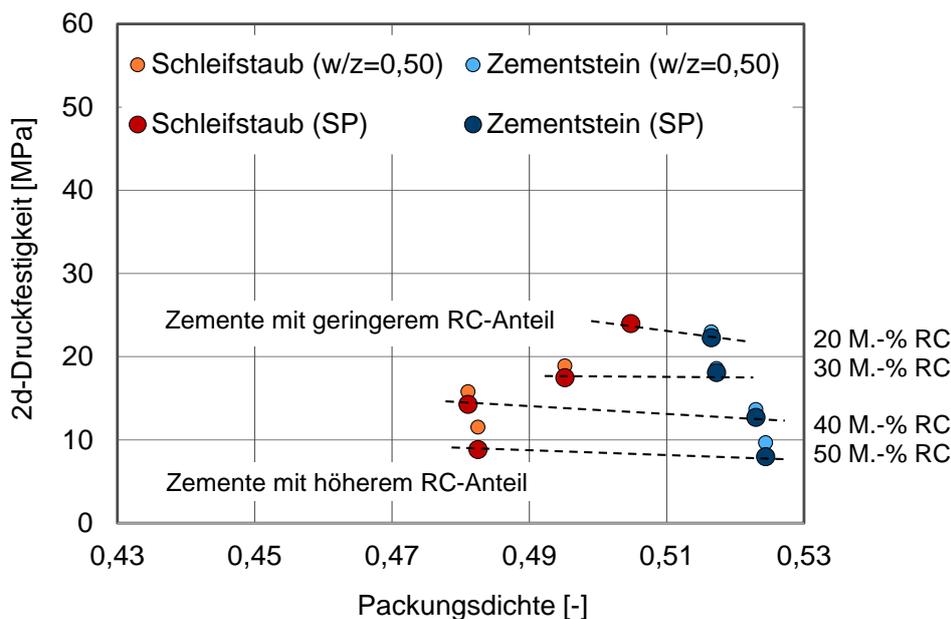
*Anmerkung: Das an Zementen mit hohem RC-Anteil sowie verringertem Klinkerfaktor durchgeführte Verfahren verdeutlicht, dass die Konsistenzen der Normmörtel in anderen Bereichen der Verarbeitbarkeit lagen als die Konsistenzen von Normmörteln unter Verwendung von hüttensand- oder kalksteinhaltigen Zementen, wie z. B. CEM II/B-S, CEM III oder CEM VI aus [23] sowie [15]. Während an R-*

Zement-Mörteln zur Einstellung der steifplastischen Konsistenz (SP) vorrangig eine w/z-Wert-Erhö-  
hung durchzuführen war, so wurde an den CEM II-, CEM III- oder CEM VI-Mörteln zur Einstellung der  
Zielkonsistenz SP überwiegend eine w/z-Wert-Absenkung in Ansatz gebracht.

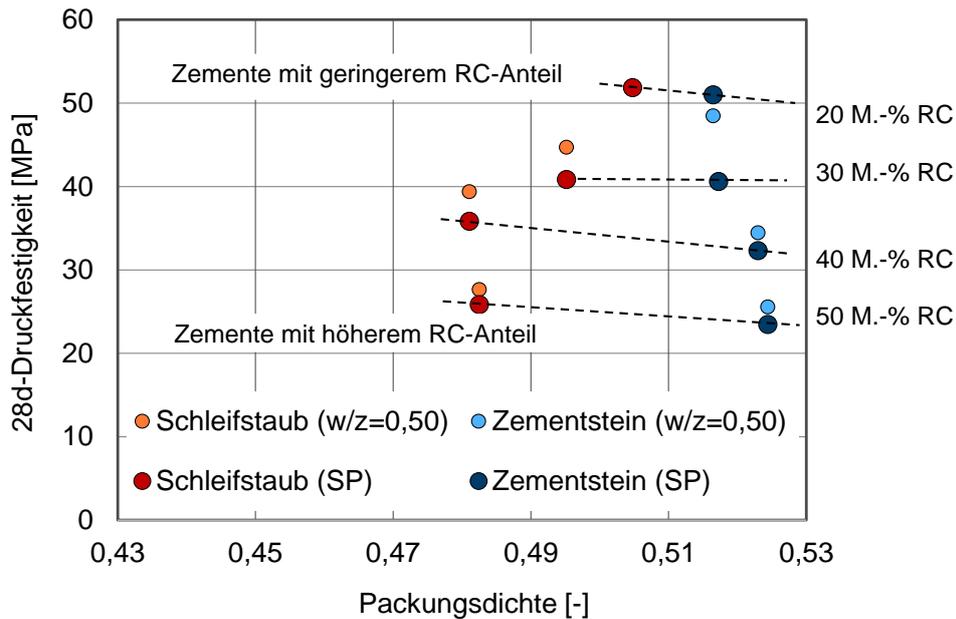
Für eine Absenkung des Wasserzementwertes eines R-Zement-Mörtels wäre eine entsprechende  
Verwendung verflüssigender Zusatzmittel notwendig, da bei Anwendung von Zementen mit hohem  
RC-Anteil (z. B. 50 M.-%) sowie hohem Wasseranspruch der Frischmörtel ohne Zusatzmittel nicht  
mehr praxisgerecht verarbeitet werden konnte.

Die Veränderung der Wasserzementwerte hatte unmittelbare Auswirkungen auf die Druckfestigkeiten  
der Zementmörtel SP (mit  $w/z \neq 0,50$ ) im Vergleich zum Normmörtel (mit  $w/z = 0,50$ ). Die Ergebnisse  
der Festigkeitsprüfungen wurden im **Bild 26** und **Bild 27** vergleichend dargestellt. Erwartungsgemäß  
führten geringe w/z-Wert-Absenkungen zu einer geringen Festigkeitserhöhung. Die Erhöhung der w/z-  
Werte hatte geringere Festigkeiten zur Folge.

In Abhängigkeit der Packungsdichte der Zemente war der am Normmörtel festgestellte Effekt an den  
hier untersuchten „SP-Mörteln“ weniger bis kaum noch ausgeprägt. Am Beispiel der R-Zemente mit  
30 M.-% Recyclingmehl stellte sich heraus, dass die SP-Mörtel mit Ziegelschleifstaub bzw. mit Ze-  
mentstein jeweils 2d-Druckfestigkeiten von ca. 18 MPa und 28d-Druckfestigkeiten von ca. 41 MPa er-  
zielten. Unter Einbeziehung einer gewissen Prüfstreuung kann im Druckfestigkeitsvergleich konstant  
steifplastisch hergestellter R-Zementmörtel (SP) ein signifikanter Einfluss der Zementpackungsdichte  
ausgeschlossen werden.



**Bild 26** Druckfestigkeit der Normmörtel im Vergleich zur Druckfestigkeit der SP-Mörtel sowie in Abhängig-  
keit der Packungsdichte der R-Zemente, Prüfalter zwei Tage, Verwendung von Zementen mit RC-  
Anteilen von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub bzw. Zementstein), jeweils in Kombination mit  
CEM I 52,5 N



**Bild 27** Druckfestigkeit der Normmörtel im Vergleich zur Druckfestigkeit der SP-Mörtel sowie in Abhängigkeit der Packungsdichte der R-Zemente, Prüfalter 28 Tage, Verwendung von Zementen mit RC-Anteilen von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub bzw. Zementstein), jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N

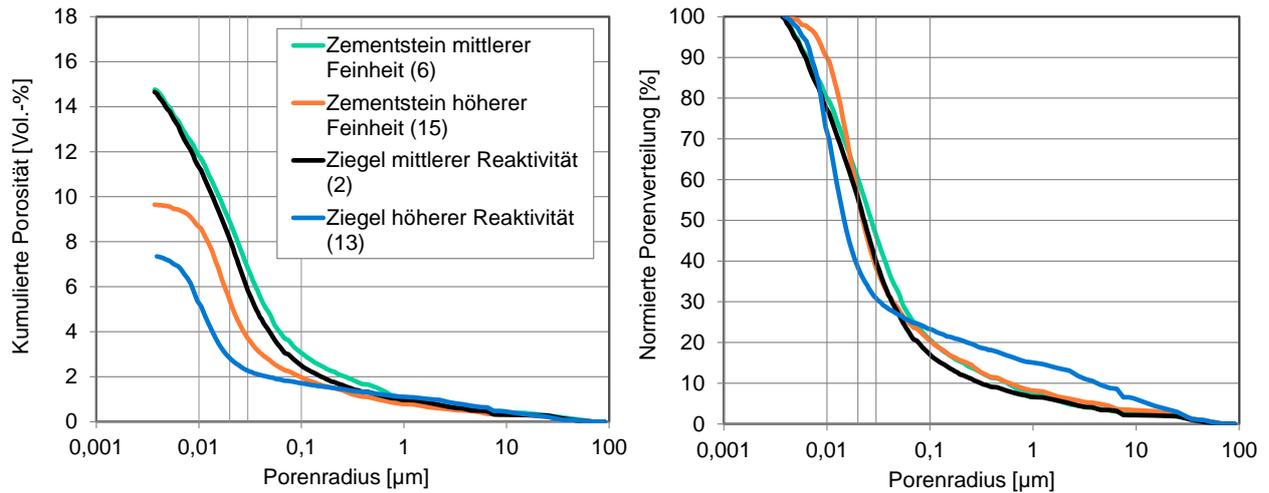
Wie an den Zementen mit 50 M.-% Ziegel- oder Zementsteinmehl wurden auch an den Zementen mit 50 M.-% RC-Gemisch  $w/z$ -Werte  $> 0,50$  ermittelt, um einen Mörtel mit Zielkonsistenz SP herstellen zu können (vgl. **Bild 56** im Anhang). Aufgrund der  $w/z$ -Wert-Erhöhung wurden die Druckfestigkeiten der Zemente im Prüfalter von zwei und 28 Tagen geringfügig reduziert. Die vergleichenden Ergebnisse sind **Bild 57** (Anhang) zu entnehmen. Wie in der Untersuchung der Normmörtel zeigte sich auch an den SP-Mörteln kein signifikanter Einfluss der Packungsdichte.

### 7.7 Einflüsse der Zusammensetzung der R-Zemente auf das Porengefüge der Normmörtel

Die Zusammensetzung der R-Zemente hat Einfluss auf die Druckfestigkeit und auf die Lage und die Steigung der Porengrößenverteilungsfunktionen (PGV) und somit auf die Dichtheit des Gefüges. Die wesentlichen Einflussparameter auf die PGV der Normmörtel ( $w/z = 0,50$ ) im Alter von 28 Tagen werden anhand der folgenden Bilder (**Bild 28** bis **Bild 32**) sowie der Bilder im Anhang (**Bild 58** bis **Bild 61**) erläutert.

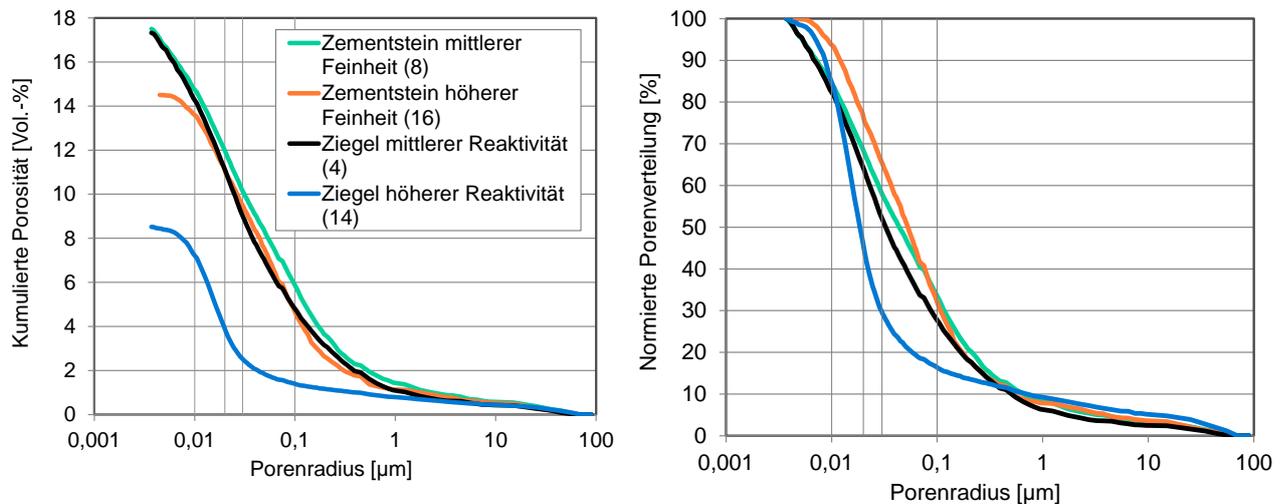
*Anmerkung: Neben dem Zement hat auch der  $w/z$ -Wert eines Mörtels Auswirkungen auf seine PGV. **Bild 30** und folgende zeigen die PGV-Auswertungen von Normmörteln ( $w/z = 0,50$ ) und von Mörteln SP ( $w/z \neq 0,50$ ) jeweils im Alter von 28 Tagen.*

**Bild 28** zeigt die Porengrößenverteilungen an Normmörteln (links kumuliert, rechts normiert) unter Verwendung von R-Zementen mit 30 M.-% RC-Material unterschiedlicher Feinheit bzw. Reaktivität, jeweils in Kombinationen mit 70 M.-% CEM I 52,5 N. Das charakteristische, reaktive Verhalten des ziegelbruchhaltigen Zementmörtels ist an der geringen Gesamtporosität  $< 8$  Vol.-% sowie der Lage weit im feinporigen Bereich erkennbar. Der Mörtel mit Zementstein mittlerer Feinheit weist im Gegensatz dazu eine hohe Gesamtporosität  $> 14$  Vol.-% auf. Die Kurve liegt deutlich im Bereich größerer Poren.



**Bild 28** Porengrößenverteilungen an Normmörteln im Prüffalter von 28 Tagen, Verwendung von R-Zementen mit **30 M.-% RC-Material** unterschiedlicher Feinheit bzw. Reaktivität, Kombinationen mit **70 M.-% CEM I 52,5 N** als Klinkerkomponente

Mit Erhöhung des RC-Anteils im Zement von 30 M.-% auf 50 M.-% nahmen die Gesamtporositäten aller Zementmörtel deutlich zu. **Bild 29** zeigt Mörtel mit Ziegel mittlerer Reaktivität und mit Zementstein in ähnlichen PGV-Kurven. Die PGV-Kurve des Mörtels mit reaktivem Ziegelbruch weist eine deutlich geringere Gesamtporosität (ca. 8 Vol.-%) auf und liegt weit im feinporigen Bereich.



**Bild 29** Porengrößenverteilungen an Normmörteln im Prüffalter von 28 Tagen, Verwendung von R-Zementen mit **50 M.-% RC-Material** unterschiedlicher Feinheit bzw. Reaktivität, Kombinationen mit **50 M.-% CEM I 52,5 N** als Klinkerkomponente

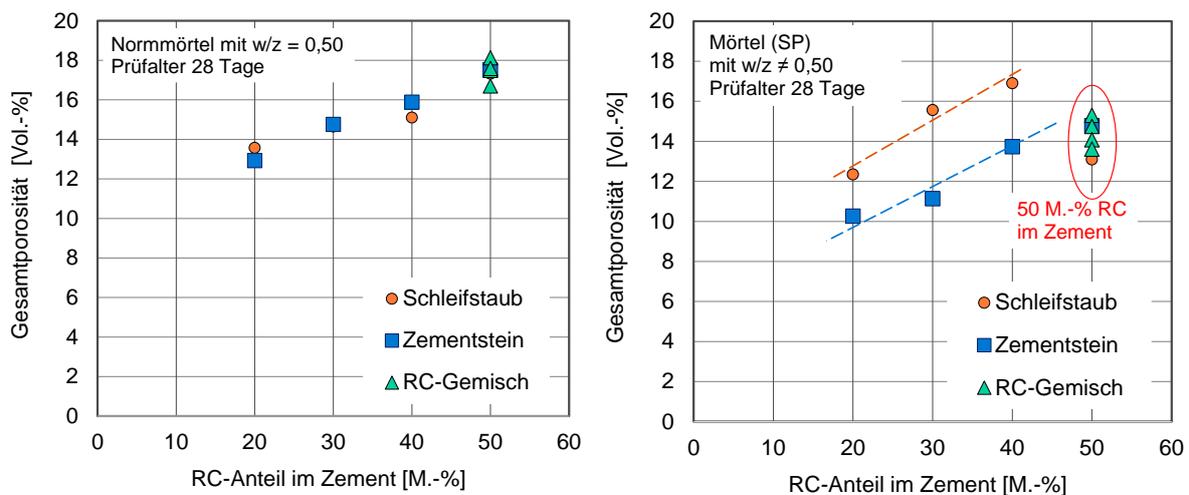
Auch der Wechsel der Klinkerkomponente verändert die PGV der Normmörtel. **Bild 58** im Anhang zeigt die Porengrößenverteilungen im Prüffalter von 28 Tagen unter Verwendung von R-Zementen mit 30 M.-% RC-Material unterschiedlicher Feinheit bzw. Reaktivität, jeweils Kombinationen mit 70 M.-% CEM I 52,5 R. Die Gesamtporositäten dieser Mörtel wurden deutlich verringert. Die Unterschiede in Lage und Steigung der PGV sind weniger ausgeprägt, wenn 30 M.-% Recyclingmehl mit CEM I 52,5 R kombiniert wurden. Dennoch wies auch hier der Mörtel mit Ziegelbruch hoher Reaktivität die Porenstruktur mit dem größten Anteil feiner Poren auf (Gesamtporosität ca. 7 Vol.-%), während der Mörtel mit Ziegelschleifstaub geringerer Reaktivität deutlich mehr Poren im gröberem Bereich und eine Gesamtporosität von ca. 9 Vol.-% aufwies.

Mit Erhöhung des RC-Anteils im Zement von 30 M.-% auf 50 M.-% nahmen auch die Gesamtporositäten der Zementmörtel auf Basis des CEM I 52,5 R deutlich zu und erreichten Werte zwischen ca. 11 Vol.-% und 14 Vol.-%. Aus **Bild 59** (Anhang) lässt sich ableiten, dass die Mörtel mit Ziegel mittlerer Reaktivität oder mit Zementstein im Porenbereich  $< 0,03 \mu\text{m}$  (normierte PGV) einen identischen PGV-Kurvenverlauf aufweisen. Die PGV-Kurve des Mörtels mit reaktivem Ziegelbruch weist in diesem Vergleich eine höhere Gesamtporosität (ca. 14 Vol.-%) auf und liegt dennoch vergleichsweise weit im feinporigen Bereich (normierte PGV).

## 7.8 Einflüsse der Zement- und Mörtelzusammensetzung auf das Porengefüge

Für die Normmörtel (mit  $w/z = 0,50$ ) und die Mörtel SP ( $w/z \neq 0,50$ ) wurden die Werte der Gesamtporosität aus der kumulierten PGV sowie die Porenanteile  $< 0,03 \mu\text{m}$  bzw.  $< 0,01 \mu\text{m}$  aus der normierten PGV ermittelt.

**Bild 30** zeigt die Gesamtporosität der Mörtel in Abhängigkeit des RC-Anteils der im Mörtel verwendeten R-Zemente. Mit zunehmendem RC-Anteil nahmen die Porositäten zu. Während am Normmörtel der Zusammenhang unabhängig von der Art des Recyclingmehls war, differenzierte sich der Zusammenhang beim Mörtel mit angepassten  $w/z$ -Werten (SP). Die Gesamtporositäten der Mörtel SP lagen bei RC-Gehalten von 20 M.-%, 30 M.-% und 40 M.-% Zementstein auf einem geringeren Wertenniveau als bei ziegelhaltigen Mörteln. Die Zemente mit 50 M.-% RC ließen sich nicht in diesen Zusammenhang einordnen.



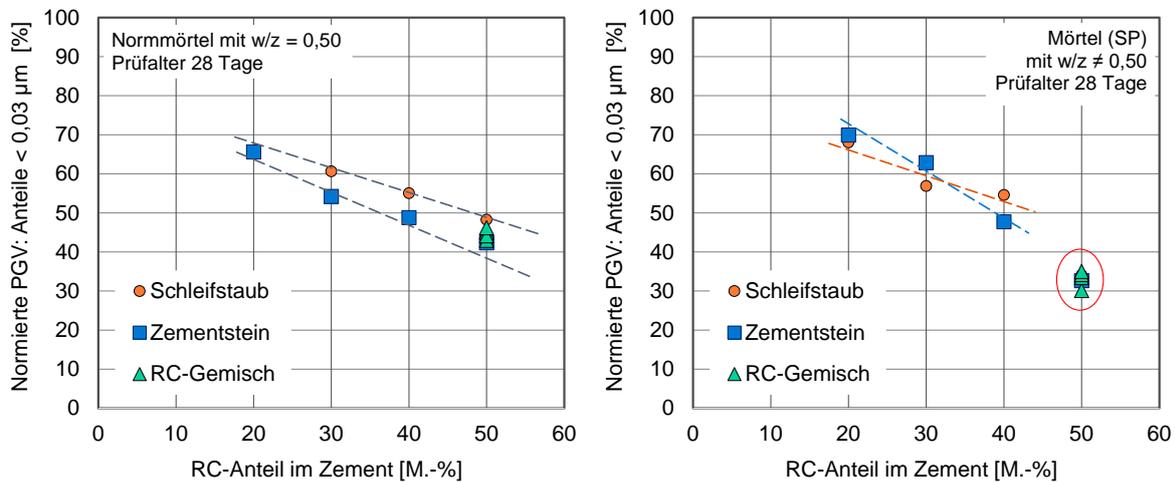
**Bild 30** Gesamtporosität der R-Zement-Mörtel in Abhängigkeit des RC-Anteils der R-Zemente, Prüfmörtel 28 Tage, Verwendung von R-Zementen mit RC-Gehalten von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub, Zementstein, Gemische) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N als Klinkerkomponente links: Gesamtporosität am Normmörtel; rechts: Gesamtporosität am SP-Mörtel

Die Gesamtporosität schließt das Volumen aller mit Quecksilberdruckporosimetrie messbaren Porengrößen ein, somit auch das Volumen besonders feiner Poren, wie z. B. das Gelporenvolumen. In der auf 100% normierten Porengrößenverteilung (PGV) eines Mörtels wurden die Anteile sehr feiner Poren (z. B. Gelporenanteile) prozentual zur entsprechenden Gesamtporosität errechnet.

Die Gesamtporosität kann maßgeblich vom Anteil der Poren mit Radien  $< 0,03 \mu\text{m}$  beeinflusst werden. Je weiter eine PGV-Kurve im feinporigen Bereich  $< 0,03 \mu\text{m}$  liegt und je größer die entsprechenden Porenanteile  $< 0,03 \mu\text{m}$ , umso kleiner die Gesamtporosität. Wurden die Gesamtporositäten der Mörtel durch Erhöhung des RC-Anteils im Zement erhöht, verringerten sich gleichzeitig die Anteile feiner

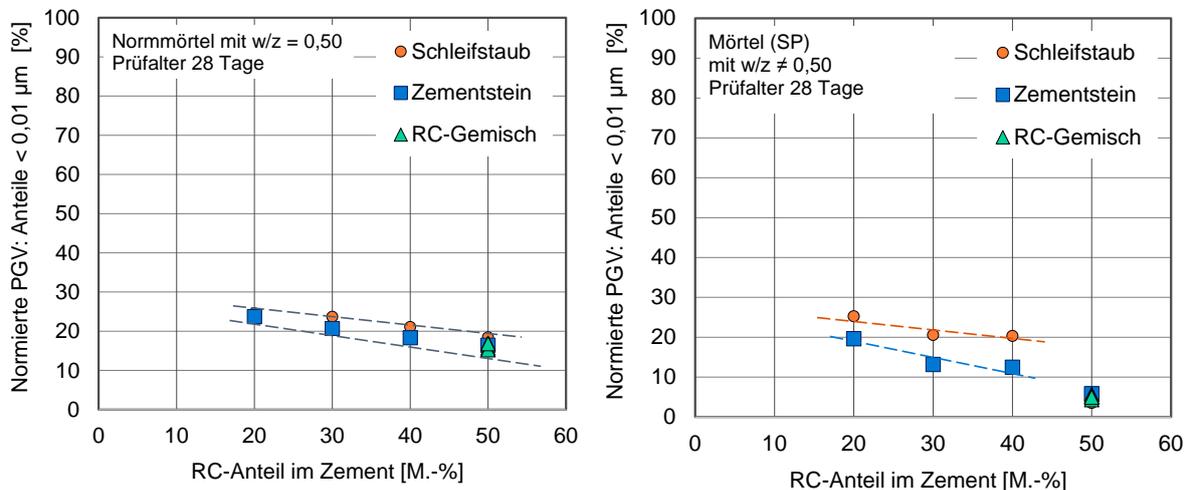
Poren. Bei den SP-Mörteln äußerte sich der Effekt in einem unterschiedlichen Anstieg der Kurve (vgl. **Bild 60** im Anhang).

Mit **Bild 31** kann bestätigt werden, dass unter sonst gleichen Bedingungen mit zunehmenden RC-Anteilen bis zu 40 M.-% im Zement die Anteile der Poren  $< 0,03 \mu\text{m}$  linear abnehmen. Die Zemente mit 50 M.-% RC ließen sich nicht in diesen Zusammenhang einordnen.



**Bild 31** Porenanteile der R-Zement-Mörtel  $< 0,03 \mu\text{m}$  (normierte PGV) in Abhängigkeit des RC-Anteils der R-Zemente, Prüfmörtel 28 Tage, Verwendung von R-Zementen mit RC-Gehalten von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub, Zementstein, Gemische) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N als Klinckerkomponente

links: Untersuchungen am Normmörtel; rechts: Untersuchungen am SP-Mörtel



**Bild 32** Porenanteile der R-Zement-Mörtel  $< 0,01 \mu\text{m}$  (normierte PGV) in Abhängigkeit des RC-Anteils der R-Zemente, Prüfmörtel 28 Tage, Verwendung von R-Zementen mit RC-Gehalten von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub, Zementstein, Gemische) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N als Klinckerkomponente

links: Untersuchungen am Normmörtel; rechts: Untersuchungen am SP-Mörtel

Auch die Anteile der dauerhaftigkeitsrelevanten Gelporen  $< 0,01 \mu\text{m}$  nahmen ab, wenn unter sonst konstanten Randbedingungen die RC-Anteile der in den Mörteln verwendeten R-Zemente bis auf 40 M.-% zunahm. **Bild 32** verdeutlicht, dass die ziegelhaltigen Mörtel bei vergleichbaren RC-

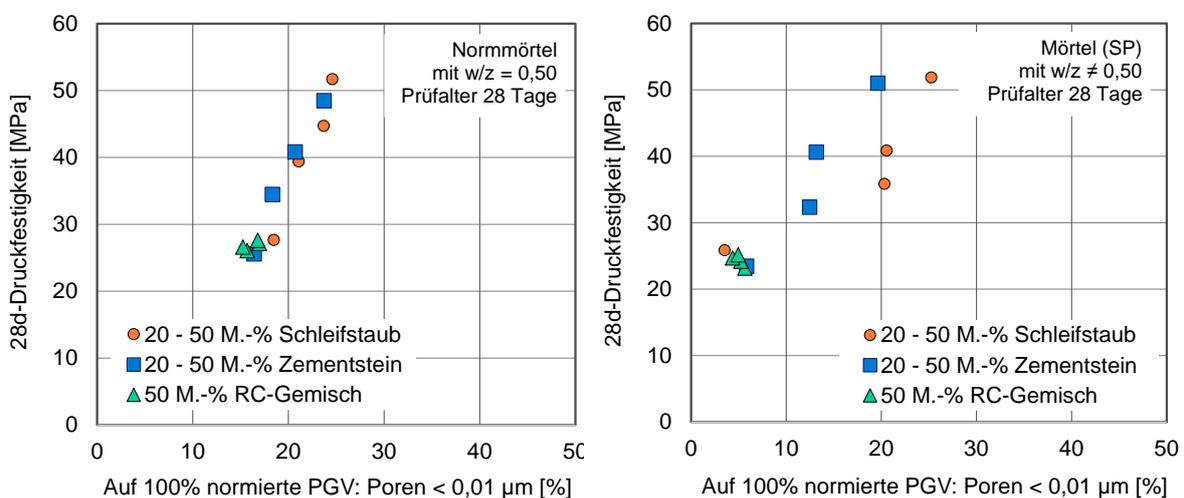
Gehalten etwas höhere Anteile feiner Poren und somit ein dichteres Gefüge aufweisen als die Mörtel auf der Basis des Recyclingmehls aus Zementstein.

### 7.9 Einflüsse des Porengefüges auf die Druckfestigkeit im Prüfalter von 28 Tagen

Die folgenden Bilder verdeutlichen, dass mit zunehmendem RC-Anteil im Zement sowie unter sonst konstanten Randbedingungen nicht nur die dauerhaftkeitsrelevanten Porenanteile der Mörtel verringert werden, sondern auch die Druckfestigkeit der Mörtel deutlich abnehmen kann.

Wie aus **Bild 33** hervorgeht, folgten die Normfestigkeiten der Mörtel, unabhängig von der Art des RC-materials, einem linearen Verlauf. Nahmen die Gelporenanteile von ca. 25% auf ca. 15% ab, reduzierte sich die Druckfestigkeit erheblich von ca. 50 MPa auf ca. 25 MPa.

Auch die steifplastisch hergestellten Mörtel zeigten diesen grundsätzlichen Zusammenhang, wenngleich die Mörtel mit bis zu 40 M.-% Ziegelschleifstaub bei vergleichbarer Festigkeit etwas höhere Gelporenanteile aufwiesen als die Mörtel mit Zementstein.

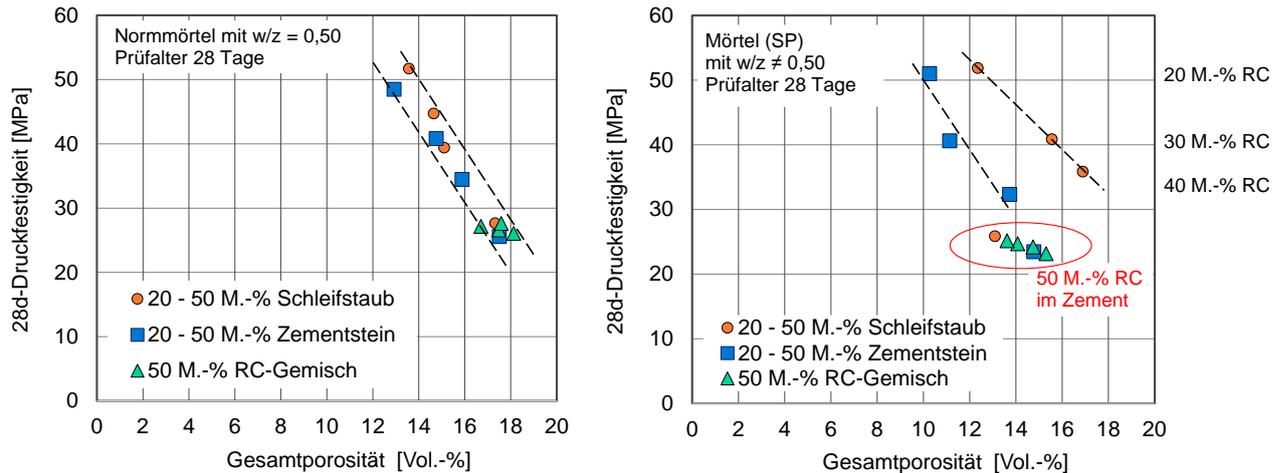


**Bild 33** Druckfestigkeit der R-Zement-Mörtel in Abhängigkeit der Gelporenanteile <math>< 0,01 \mu\text{m}</math> (normierte PGV), Prüfalter 28 Tage, Verwendung von R-Zementen mit RC-Gehalten von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub, Zementstein, Gemische) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N, links: Untersuchungen am Normmörtel; rechts: Untersuchungen am SP-Mörtel

Ein ähnlicher Zusammenhang konnte anhand der Ergebnisse der 28d-Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Porenanteile <math>< 0,03 \mu\text{m}</math> festgestellt werden. Im **Bild 61** im Anhang wird deutlich, dass auch mit zunehmenden Porenanteilen <math>< 0,03 \mu\text{m}</math> ein Anstieg der 28d-Druckfestigkeit erwartbar ist.

Auch die Gesamtporosität zeigt den o.g. Zusammenhang zur Druckfestigkeit. Wie aus **Bild 34** hervorgeht, verringerten sich die Druckfestigkeiten der Normmörtel in ähnlicher Weise und unabhängig von der Art des im Zement verwendeten RC-Materials, wenn die Gesamtporositäten zunahmen.

Die Mörtel SP zeigten einen differenzierten Zusammenhang. Ausgehend von ca. 50 MPa nahmen die Festigkeiten der Mörtel SP unter Verwendung von Zementstein stärker in Abhängigkeit einer zunehmenden Gesamtporosität ab als die Festigkeiten der ziegelhaltigen Mörtel SP. Außerdem kann abgeleitet werden, dass trotz vergleichbarer Druckfestigkeit der SP-Mörtel (z. B. bei rd. 40 MPa) im ziegelhaltigen Mörtel SP deutlich höhere Gesamtporositäten ermittelt wurden als im zementsteinhaltigen Mörtel SP.

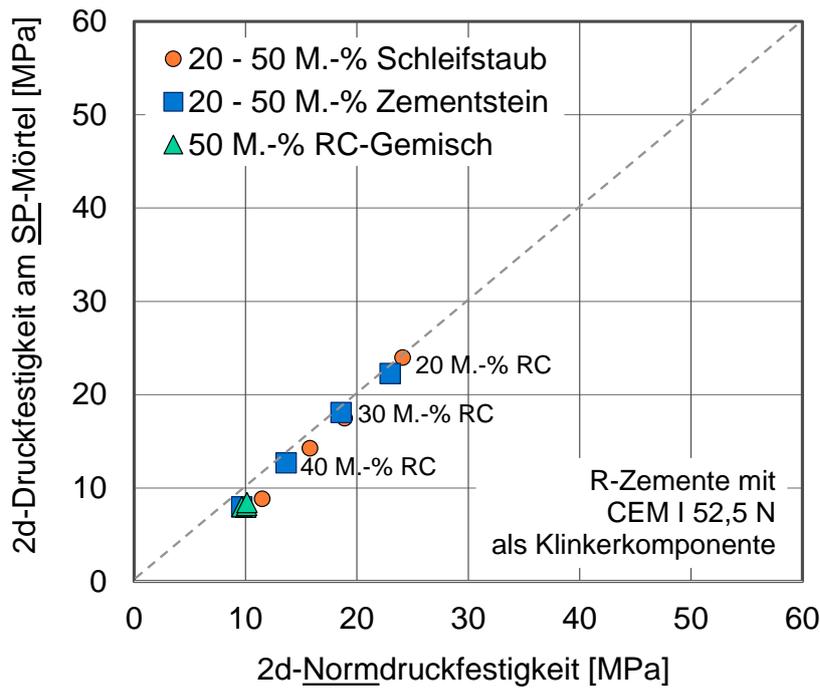


**Bild 34** Druckfestigkeit der R-Zement-Mörtel in Abhängigkeit der Gesamtporosität (kumulierte PGV), Prüfalalter 28 Tage, Verwendung von R-Zementen mit RC-Gehalten von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub, Zementstein, Gemische) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N, links: Untersuchungen am Normmörtel; rechts: Untersuchungen am SP-Mörtel

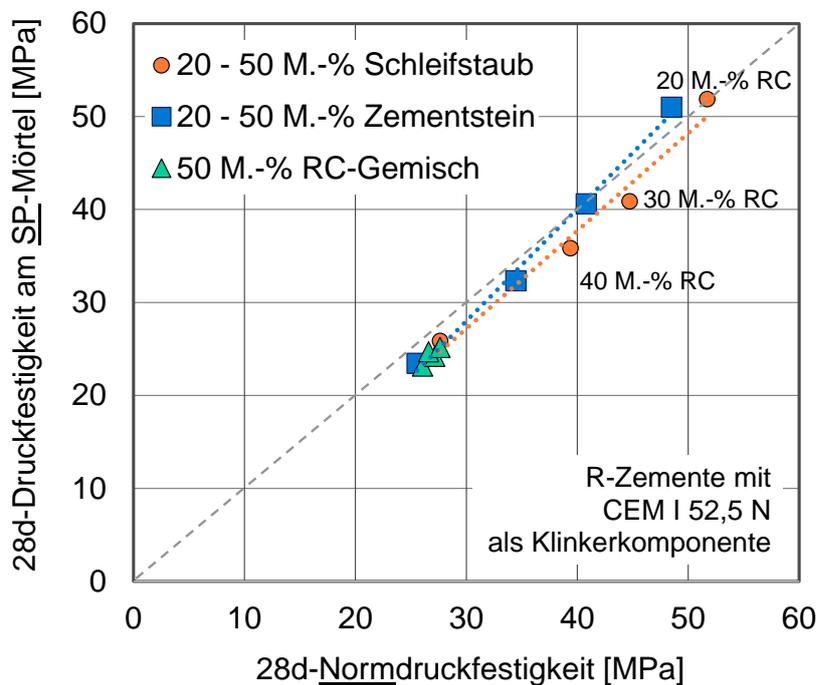
### 7.10 Normmörtel und SP-Mörtel im Vergleich der Druckfestigkeit und der Gesamtporosität

Die Druckfestigkeit der Normmörtel ( $w/z = 0,50$ ) wurde der Druckfestigkeit der SP-Mörtel ( $w/z \neq 0,50$ ) gegenübergestellt. Der Vergleich der Festigkeiten im Prüfalalter von zwei Tagen ist **Bild 35** im dargestellt. Zur Einordnung der Ergebnisse wurde zwischen null und 60 MPa eine Diagonale eingetragen. Dem Verlauf folgend, wurden an den Mörteln mit 20 M.-%, 30 M.-% und 40 M.-% Recyclingmehl im Zement – unabhängig vom  $w/z$ -Wert bei Mörtelherstellung - keine signifikanten Unterschiede in der 2d-Druckfestigkeit ermittelt. Die Normmörtel unter Verwendung der R-Zemente mit 50 M.-% Recyclingmehl oder RC-Gemischen erreichten mit etwa 10-12 MPa minimal höhere Festigkeiten als die entsprechenden SP-Mörtel.

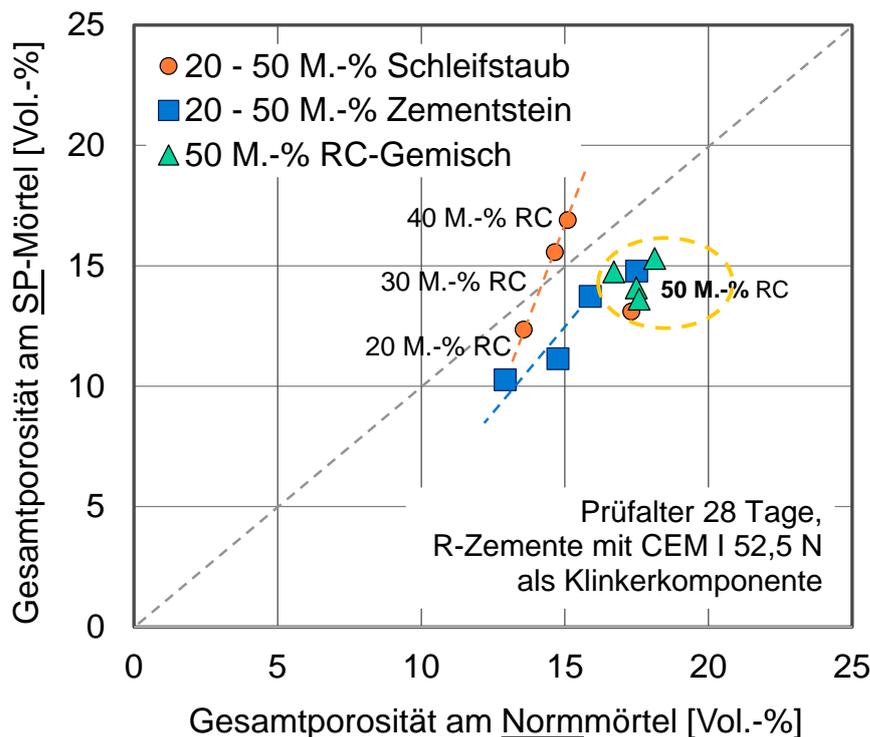
Aus **Bild 36** lässt sich ableiten, dass die Ergebnisse aus den Festigkeitsprüfungen am Normmörtel oder am SP-Mörtel nur sehr geringe Unterschiede im Prüfalalter von 28 Tagen aufweisen und nahe der Diagonalen verlaufen. Je nach  $w/z$ -Wert-Verringerung oder  $w/z$ -Wert-Erhöhung am SP-Mörtel wurden Festigkeitsunterschiede von maximal 4 MPa im Vergleich zum entsprechenden Normmörtel ermittelt. Außerdem geht aus dem Bild hervor, dass die SP-Mörtel unter Verwendung der R-Zemente mit 20 M.-% bzw. 30 M.-% Recyclingmehl – unabhängig der Art des RC-Materials – vergleichbare Druckfestigkeiten von etwa 51 MPa bzw. 41 MPa aufwiesen. Die Mörtel unter Verwendung der R-Zemente mit 50 M.-% Recyclingmehl oder RC-Gemischen erreichten sowohl mit konstantem als auch mit verändertem Wassergehalt Druckfestigkeiten auf sehr geringem Niveau unter 30 MPa.



**Bild 35** Druckfestigkeit der Normmörtel ( $w/z = 0,50$ ) im Vergleich zur Druckfestigkeit der SP-Mörtel ( $w/z \neq 0,50$ ), Prüflalter zwei Tage, Verwendung von Zementen RC-Gehalten von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub, Zementstein, Gemische) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N



**Bild 36** Druckfestigkeit der Normmörtel ( $w/z = 0,50$ ) im Vergleich zur Druckfestigkeit der SP-Mörtel ( $w/z \neq 0,50$ ), Prüflalter 28 Tage, Verwendung von Zementen RC-Gehalten von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub, Zementstein, Gemische) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N



**Bild 37** Gesamtporosität der Normmörtel ( $w/z = 0,50$ ) im Vergleich zur Gesamtporosität der SP-Mörtel ( $w/z \neq 0,50$ ), Prüfalter 28 Tage, Verwendung von Zementen RC-Gehalten von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub, Zementstein, Gemische) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N

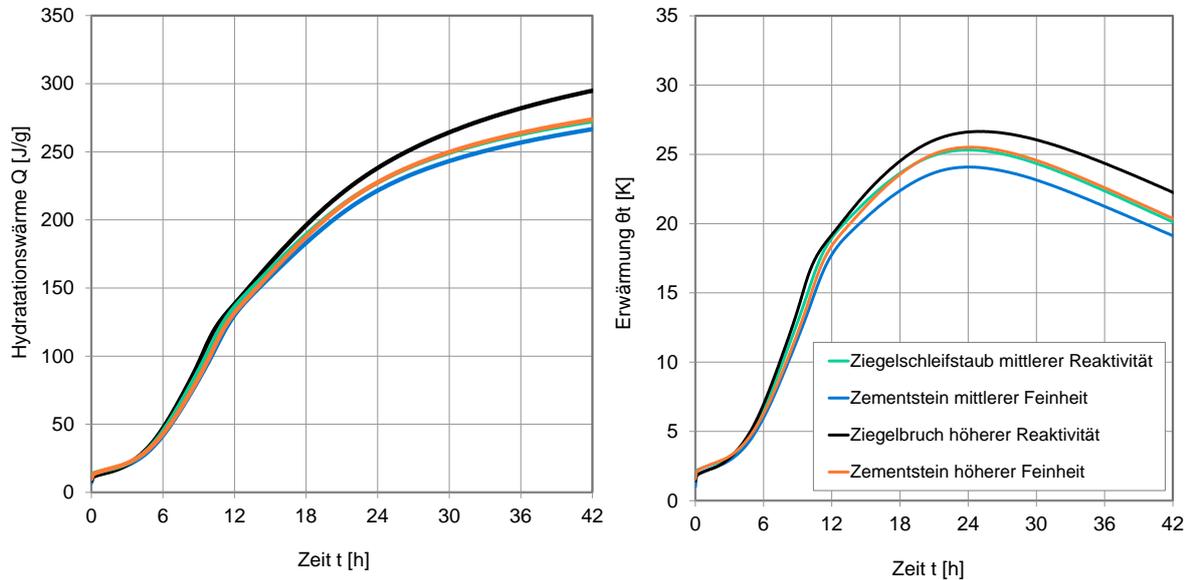
Aus **Bild 37** geht hervor, dass bei Anwendung fast aller Zemente am Normmörtel eine etwas höhere Gesamtporosität festgestellt wurde als am entsprechenden Mörtel, der mit steifplastischer Konsistenz hergestellt wurde. Unter der Verwendung von 30 M.-% bzw. 40 M.-% Ziegelschleifstaub wurde zur Anpassung der Konsistenz SP der  $w/z$ -Wert auf  $> 0,50$  angehoben, was zu höheren Gesamtporositäten der SP-Mörtel im Vergleich zu den Normmörteln führte. Auch an den SP-Mörteln mit 40 M.-% bzw. 50 M.-% Zementstein wurde eine  $w/z$ -Wert-Erhöhung durchgeführt, diese führte allerdings zu geringeren Gesamtporositäten am SP-Mörtel, die Gesamtporositäten am Normmörtel lagen mit etwa 13 Vol.-% bis 17 Vol.-% durchweg auf etwas höherem Niveau im Vergleich zu den SP-Mörteln (10 Vol.-% bis 15 Vol.-%). Die Zemente mit 50 M.-% RC-Gemisch bzw. Ziegelschleifstaub ließen sich in diese Zusammenhänge nicht einordnen.

### 7.11 Hydratationswärme an R-Zement-Normmörteln in Abhängigkeit der RC-Materialien

Die Hydratationswärme von klinkerreduzierten Zementen (z. B. CEM II) ist in der Regel geringer als die von Portlandzementen CEM I, da die weiteren Bestandteile eine geringere spezifische Wärmefreisetzung zeigen als Portlandzementklinker. Die maximale Hydratationswärme wird hauptsächlich vom Klinker beeinflusst. Der zeitliche Verlauf wird von den Mengenverhältnissen der anderen Bestandteile und ihrer Feinheit bestimmt. [25] Im Rahmen dieses Projektes wurden ausschließlich R-Zemente mit einem RC-Anteil von 30 M.-% untersucht. Die als Klinkerkomponente verwendeten Portlandzemente der Festigkeitsklassen 42,5 R, 52,5 N und 52,5 R hatten die gleiche Herkunft. Die Prüfmörtel hatten Normzusammensetzung ( $w/z = 0,50$ ).

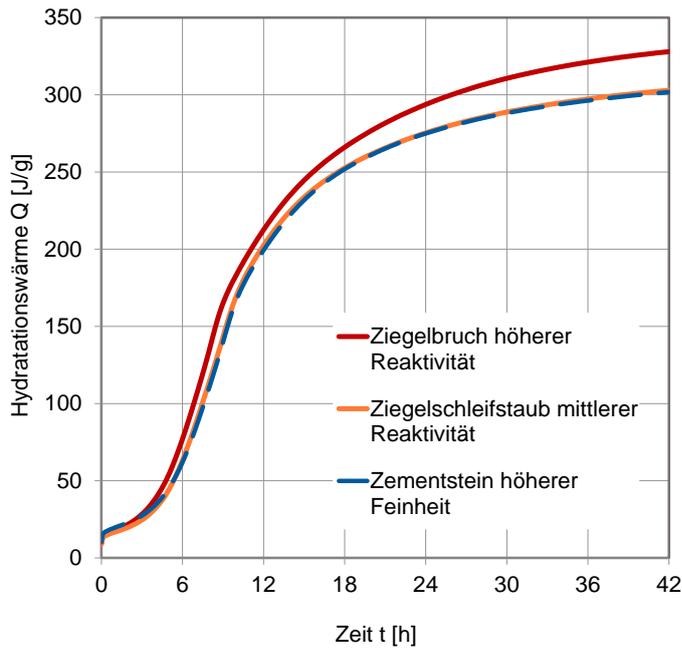
**Bild 38** stellt beispielhaft den zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzung und den Temperaturverlauf während des Versuches an R-Zement-Mörteln mit 30 M.-% ziegel- oder zementsteinhaltigem RC-Material dar. Die RC-Materialien wurden mit CEM I 52,5 N kombiniert. Die maximale Hydratationswärme

wurde unter Verwendung des reaktiven Ziegelbruchs ermittelt. Nach einer Versuchsdauer von 18 Stunden nahm die Hydratationswärme weiter deutlich zu und erreichte nach 42 Stunden einen Wert von rd. 300 J/g. Die anderen Kurven hatten ab 18 Stunden einen vergleichsweise flachen Verlauf, was für eine geringere Reaktivität der R-Zemente mit Zementstein oder Ziegelschleifstaub spricht. Die niedrigste Wärmefreisetzung wurde unter Verwendung des Zements mit Zementstein der geringsten Feinheit ermittelt.



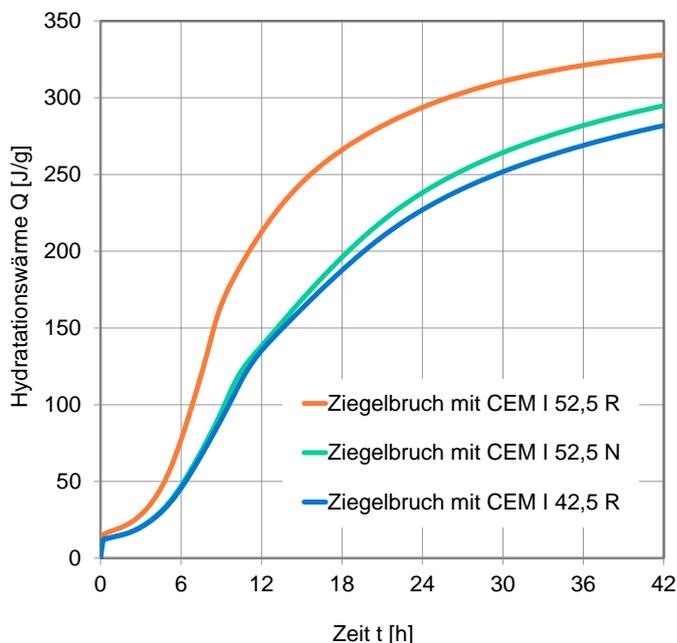
**Bild 38** Untersuchung der Hydratationswärme an Normmörteln über eine Prüfdauer von 42 Stunden, Anwendung von Zementen mit 30 M.-% RC-Material (ZI 3, ZI 13, ZS 8, ZS9) unterschiedlicher Feinheit bzw. Reaktivität sowie 70 M.-% CEM I 52,5 N als Klinkerkomponente

Zum Vergleich stellt **Bild 39** den zeitlichen Verlauf der Hydratationswärmefreisetzung der R-Zementmörtel auf Basis eines CEM I 52,5 R dar. Wurden mit CEM I 52,5 N nach 42 Stunden Ergebnisse  $< 300$  J/g ermittelt, so wurden mit CEM I 52,5 R Werte  $> 300$  J/g erzielt. Die maximale Hydratationswärme wurde auch hier unter Verwendung des reaktiven Ziegelbruchs ermittelt.

**Bild 39**

Untersuchung der Hydratationswärme an Normmörteln über eine Prüfdauer von 42 Stunden, Anwendung von Zementen mit 30 M.-% RC-Material unterschiedlicher Feinheit bzw. Reaktivität sowie 70 M.-% CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente

Im **Bild 40** wurden ausschließlich Ergebnisse der ziegelbruchhaltigen Zementmörtel gegenübergestellt. 30 M.-% Ziegelbruch wurden mit CEM I der Festigkeitsklassen 42,5 R, 52,5 N oder 52,5 R gemischt. Erwartungsgemäß erreichte der Mörtel mit CEM I 52,5 R die höchste Hydratationswärme, die Wärmefreisetzung hatte den höchsten Anstieg. Die geringste Hydratationswärme wurde unter Verwendung des CEM I 42,5 R festgestellt, sie betrug nach 42 Stunden ca. 280 J/g.

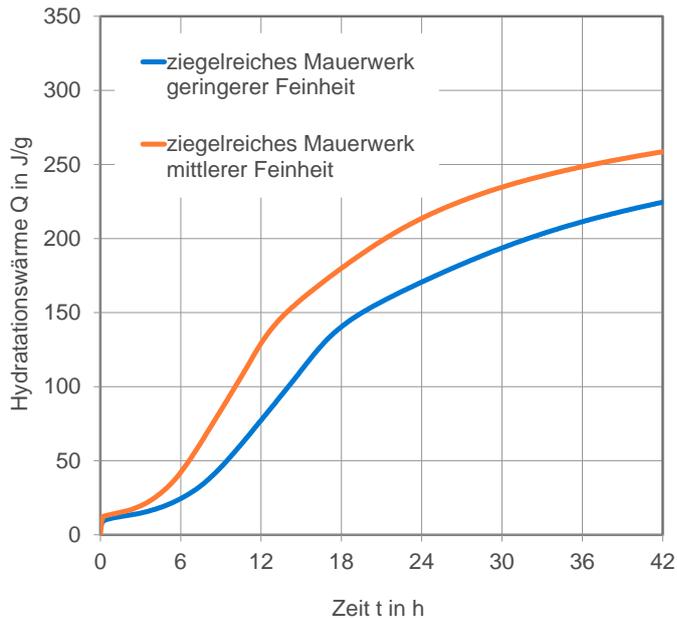
**Bild 40**

Untersuchung der Hydratationswärme an Normmörteln über eine Prüfdauer von 42 Stunden, Anwendung von Zementen mit 30 M.-% Ziegelbruch sowie 70 M.-% CEM I unterschiedlicher Festigkeitsklassen als Klinkerkomponente

In weiteren Versuchen wurden R-Zementmörtel mit CEM I geringerer Festigkeitsklasse 42,5 R sowie mit RC-Materialien aus gemischtem, ziegelhaltigem Mauerwerksbruch untersucht (**Bild 62** im Anhang). Die Verwendung eines ziegelabgereicherten RC-Materials aus Mauerwerksbruch führte nach einer Versuchsdauer von ca. 18 Stunden zu einem flachen Verlauf der Hydratationskurve. Mit rd. 250

J/g erreichten diese R-Zementmörtel nach 42 Stunden sowie im Vergleich zum Mörtel mit Ziegelbruch Ergebnisse auf deutlich geringerem Niveau.

Im nächsten Schritt wurde untersucht, welchen Einfluss die Mahlfineinheit des ziegelreichen (MA 1) bzw. des ziegelhaltigen Mauerwerksbruchs (MA 3) auf die Hydratationswärme hatte. Im **Bild 41** sind die Hydratationswärmeverläufe der R-Zementmörtel mit Mauerwerksbruch M1 bei einer Feinheit von ca. 4000 cm<sup>2</sup>/g bzw. 5000 cm<sup>2</sup>/g dargestellt. Bereits zu Beginn des Hydratationsversuches zeigte sich, dass der Mörtel mit dem feineren Recyclingmehl reaktiver ist. Der Kurvenverlauf hatte eine deutlich größere Steigung. Die Hydratationswärme nach 42 Stunden lag bei rd. 250 J/g, während bei Verwendung des gröbereren Recyclingmehls ein geringerer Wert von rd. 225 J/g ermittelt wurde.

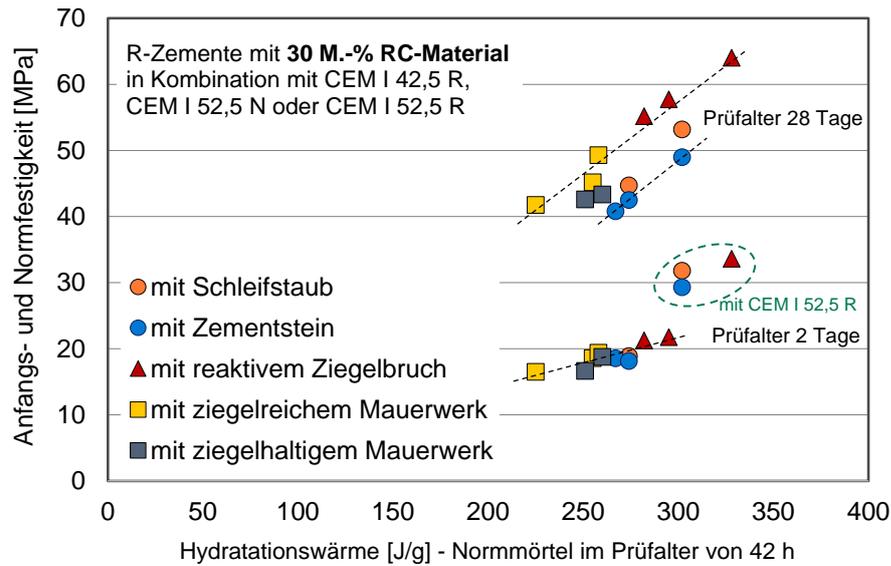


**Bild 41**

Untersuchung der Hydratationswärme an Normmörteln über eine Prüfdauer von 42 Stunden, Anwendung von Zementen mit 30 M.-% ziegelreichem RC-Material (MA 1) unterschiedlicher Feinheit sowie 70 M.-% CEM I 42,5 R als Klinkerkomponente

Die feinere Aufbereitung des Recyclingmehls hatte bei Verwendung des ziegelärmeren Mauerwerksbruchs MA 3 nicht so deutliche Effekte wie bei Aufbereitung von MA 1. Auch hier wurden Mahlfineinheiten von ca. 4000 cm<sup>2</sup>/g bzw. 5000 cm<sup>2</sup>/g angesetzt. **Bild 63** im Anhang zeigt, dass beide Mörtel nach einer Prüfdauer von 42 Stunden eine Hydratationswärmefreisetzung in vergleichbarer Größenordnung bei rd. 250 J/g erreichten.

Zur Auswertung der Hydratationsversuche wurden im **Bild 42** die Druckfestigkeiten der R-Zemente im Prüfalter von zwei und 28 Tagen in Abhängigkeit der Hydratationswärme eingetragen. Die Untersuchungen im Langavant-Verfahren (DIN 196-9) wurden bis zum Prüfalter von 42 Stunden durchgeführt. Mit zunehmender Hydratationswärme der Normmörtel mit 30 M.-% RC-Material nahmen Anfangs- und Normfestigkeiten gleichermaßen zu. Während die Druckfestigkeit im Alter von zwei Tagen vorrangig von der Hydratation der Klinkerkomponente dominiert wurde, zeigte sich im Alter von 28 Tagen ein deutlicher Einfluss der Art des Recyclingmehls, seiner Reaktivität sowie seiner Feinheit. Die Festigkeiten nahmen insbesondere zu, wenn reaktiver Ziegelbruch mit CEM I höherer Festigkeitsklasse kombiniert wurde.



**Bild 42** Druckfestigkeit der R-Zemente im Prüfmörtel von zwei und 28 Tagen in Abhängigkeit der Hydratationswärme (Langavant-Verfahren), Untersuchungen der Normmörtel im Prüfmörtel 42 Stunden, Anwendung von Zementen mit 30 M.-% RC-Material sowie 70 M.-% CEM I

An zwei R-Zementen mit 50 M.-% gemischtem RC-Material wurden vergleichende Hydratationsversuche durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Anhang (**Bild 64** bis **Bild 66**) dargestellt.

## 8 Zusammenfassung

Es wurden Eigenschaften feindisperser Stoffe aus dem Recycling mineralischer Bauabfälle und ihre Anwendung als Hauptbestandteil im Zement untersucht. Die Recyclingmaterialien wurden entweder im mehlfinen Anlieferungszustand (z. B. als Ziegelschleifstaub) oder nach Siebung, Mahlung bzw. Sichtung auf Zementfeinheit in Anteilen von 20 M.-%, 30 M.-%, 40 M.-% oder 50 M.-% mit Portlandzement CEM I gemischt. Neben Recyclingziegeln, Ziegelbrechsanden und Ziegelschleifstäuben wurden RC-Brechsande aus gemischtem, ziegelhaltigem Mauerwerk sowie aus Betonbruch aufbereitet. Außerdem wurden Zementsteinmehle aus der selektiven Zerkleinerung von Altbeton sowie Mischungen unterschiedlicher RC-Materialien verwendet. Die mehlfinen RC-Materialien bzw. RC-Gemische werden nachfolgend als Recyclingmehle bezeichnet.

Die Herkunft sowie die stoffliche Zusammensetzung der RC-Materialien hatten erheblichen Einfluss auf die in der mechanischen Aufbereitung entstehenden Korngrößenverteilungen (Laserbeugung) und Mahlfineiten (Blaine-Verfahren) sowie auf die Reaktivität der Recyclingmehle während der Hydratation. Die Reaktivität der Recyclingmehle wurde anhand ihrer Hydratationswärme nach ASTM C1897-20 eingeschätzt, die in einem Bereich zwischen Quarzsand (nicht reaktiv: 25 J/g) und calciniertem Ton (puzzolanisch reaktiv: 230 J/g) lag. Die ziegelreichen RC-Materialien hatten aufgrund ihrer porösen Struktur und einer relativ hohen spezifischen Oberfläche ein etwas ausgeprägteres Sorptionsverhalten (GraviSorb) gegenüber Luftfeuchtigkeit als gemischte RC-Materialien mit kleinerem Ziegelanteil sowie geringerer Oberfläche. Art und Anteil des Recyclingmehls und die Festigkeitsklasse des CEM I hatten Einfluss auf die Stampfpackungsdichte, den Wasseranspruch nach DIN EN 196-3 und damit auch auf die Verarbeitbarkeit der Frischmörtel.

50 M.-% Ziegelbruch mit hoher Feinheit (RRSB:  $x' < 30 \mu\text{m}$ ) und Portlandzement CEM I 52,5 R führten zu einem Wasseranspruch nach Puntke von rd. 46 Vol.-% und einem Wasseranspruch für Normsteife von etwa 36 M.-%. Typische Werte für den Wasseranspruch von Normalzementen liegen zwischen 25 M.-% und 30 M.-%.

Mit CEM I 52,5 N oder Recyclingmehl geringerer Feinheit bzw. geringer Reaktivität (z. B. Mauerwerksbruch oder Zementstein mit  $x' < 40 \mu\text{m}$ ) nahmen unter sonst vergleichbaren Randbedingungen die Packungsdichte zu und der Wasseranspruch nach Puntke ab. Gleiches galt für einen RC-Anteil von 30 M.-%. Mit einem Wasseranspruch von 40 Vol.-% (etwa 30 M.-% für Normsteife) stellten sich Ausbreitmaße (Hägerrmann-Ausbreittisch) von etwa 160 mm ein.

In vergleichenden Untersuchungen an Mörteln mit variiertem Wassergehalt und konstant steifplastischer Konsistenz (SP) waren bei Zementen mit bis zu 50 M.-% Recyclingmehl der Wassergehalt und somit der w/z-Wert auf Werte  $w/z > 0,50$  anzuheben. Dies führte erwartungsgemäß zu einer Erhöhung des kapillaren Porenanteils  $> 0,01 \mu\text{m}$  im Gefüge und einer Abnahme der Mörtelfestigkeit im Vergleich zum Normmörtel.

Mit zunehmender Hydratationswärme der Normmörtel nach DIN 196-9 (Langavant-Verfahren) mit 30 M.-% RC-Material nahmen Anfangs- und Normfestigkeiten gleichermaßen zu. Während die Druckfestigkeit im Alter von zwei Tagen vorrangig von der Hydratation der Klinkerkomponente dominiert wurde, zeigte sich im Alter von 28 Tagen ein deutlicher Einfluss der Art des Recyclingmehls, seiner Reaktivität sowie seiner Feinheit. Die Festigkeiten nahmen insbesondere zu, wenn reaktiver Ziegelbruch mit CEM I höherer Festigkeitsklasse kombiniert wurde.

Wurden 30 M.-% feiner Ziegelbruch durch 30 M.-% groben Zementstein ersetzt, so stieg bei Verwendung von jeweils 70 M.-% CEM I 52,5 R die Packungsdichte von etwa 0,44 auf 0,48 an, gleichzeitig verringerte sich die Normfestigkeit von ca. 64 MPa auf ca. 49 MPa. Mit CEM I 52,5 N erhöhte sich unter sonst konstanten Randbedingungen die Packungsdichte auf etwa 0,52. Die Normfestigkeit dieses R-Zements mit 30 M.-% Zementstein lag bei etwa 41 MPa. Die Normfestigkeit des R-Zements mit 30 M.-% Ziegelbruch in Kombination mit CEM I 52,5 N erreichte hingegen einen Wert 58 MPa.

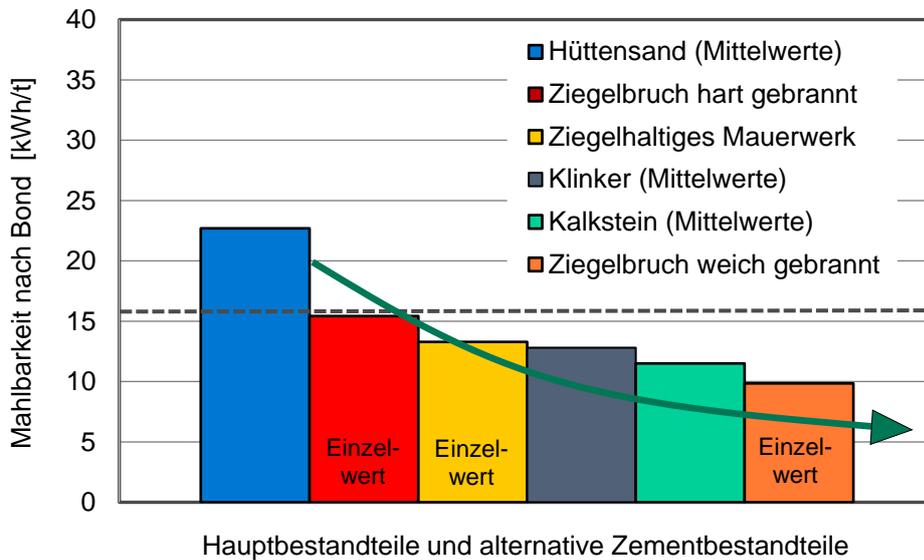
Das Beispiel zeigt, dass sich stoffliche Effekte aufgrund der Reaktivität und granulometrische Effekte aufgrund der Korngrößenverteilung überlagern und ggf. verstärken können. Neben der Hydratationswärme nach ASTM C1897-20 und der Feinheit der Recyclingmehle (Blaine) zeigte sich neben einer moderaten Erhöhung der Anfangsfestigkeit eine Erhöhung der Normfestigkeit um bis zu 20 MPa. CEM I 52,5 N und 30 M.-% grober Zementstein geringer Reaktivität (Hydratationswärme ca. 40 J/g) ergaben beispielsweise Normfestigkeiten im Bereich zwischen 36 MPa und 39 MPa. Unter Verwendung eines reaktiven, vergleichsweise feinen Recyclingmehls aus Ziegelbruch (Hydratationswärme ca. 225 J/g) erreichte die Normfestigkeit der R-Zemente Werte im Bereich zwischen 44 MPa und 58 MPa.

Die Zunahme bzw. Abnahme der Druckfestigkeiten ging einher mit einer Veränderung des Porengefüges der Festmörtel im Prüfalter von 28 Tagen (Quecksilberdruckporosimetrie). So nahm unter vergleichbaren Bedingungen (z. B. RC-Anteil konstant 30 M.-%) die Druckfestigkeit erwartungsgemäß mit zunehmender Gesamtporosität der Mörtel ab. Während an den Mörteln unter Verwendung reaktiver Recyclingmehle vergleichsweise hohe Festigkeiten und geringe Gesamtporositäten festgestellt wurden, zeigten Mörtel mit Recyclingmehlen geringerer Reaktivität entsprechend geringere Festigkeiten bei höheren Gesamt- und Kapillarporositäten.

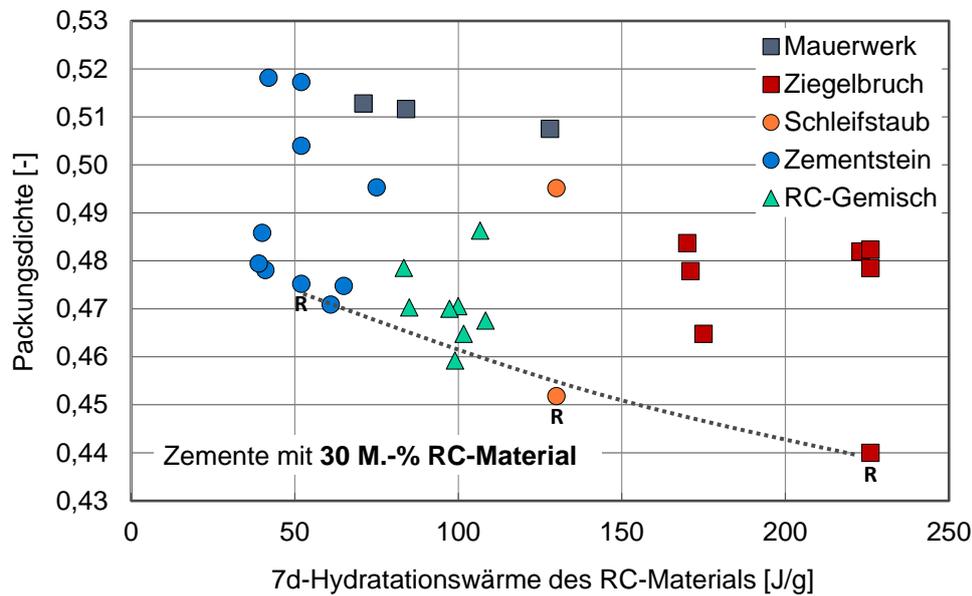
Die zunehmende Substitution von Klinker durch Recyclingmehl führte in jedem Prüfalter zu einer Verringerung der Druckfestigkeit sowie zu einer Erhöhung der Gesamtporosität. So wurden z. B. die Normfestigkeiten der R-Zemente von ca. 50 MPa auf ca. 25 MPa verringert, wenn der RC-Anteil von 20 M.-% auf 50 M.-% angehoben wurde. Gleichzeitig nahm die Gesamtporosität von etwa 13 Vol.-% auf 18 Vol.-% zu.

Für eine Anpassung der Mörtelfestigkeit durch Absenkung des Wasserzementwertes wäre eine entsprechende Verwendung verflüssigender Zusatzmittel notwendig, da bei Verwendung von Zementen mit hohem RC-Anteil (z. B. 50 M.-%) sowie hohem Wasseranspruch der Frischmörtel ohne Zusatzmittel nicht mehr praxisgerecht verarbeitet werden konnte.

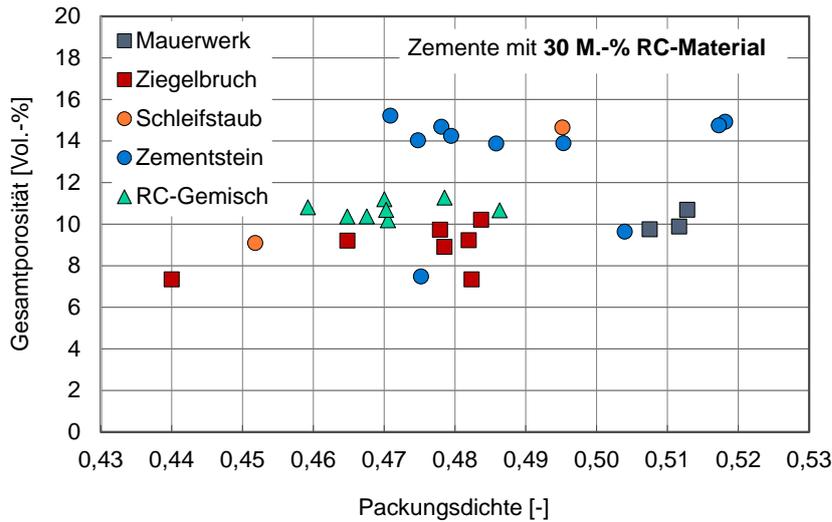
9 Anhang



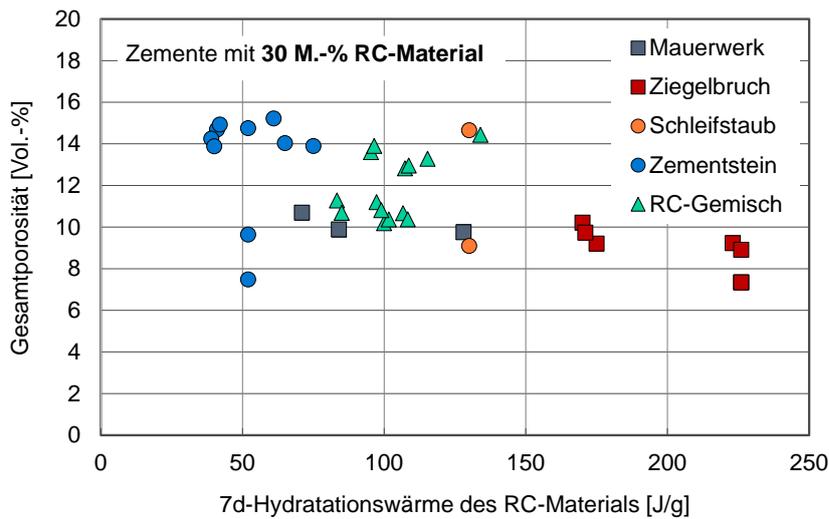
**Bild 43** VDZ-Ergebnisse zur Mahlbarkeit nach Bond, Untersuchung von Zementhauptbestandteilen im Vergleich zu ziegelhaltigen RC-Ausgangsstoffen aus [22]



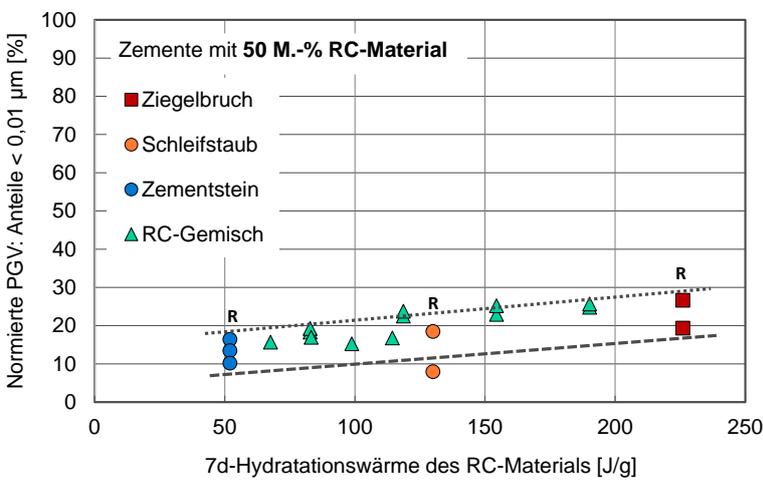
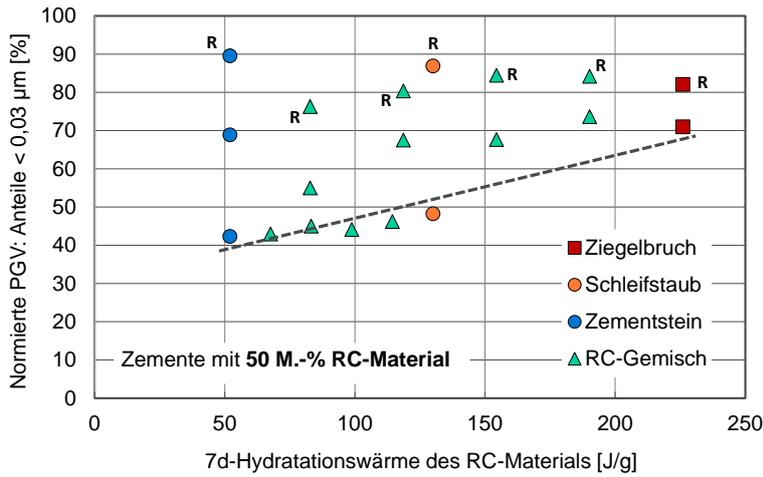
**Bild 44** Wertebereiche der Packungsdichte von R-Zementen und der Hydratationswärme der im Zement eingesetzten RC-Materialien, Verwendung von RC-Materialien unterschiedlicher Zusammensetzung und Reaktivität (Hydratationswärme nach ASTM C1897-20), Zemente mit 30 M.-% RC-Material in Kombination mit CEM I (Trendlinie „R“: Zemente mit 70 M.-% CEM I 52,5 R)



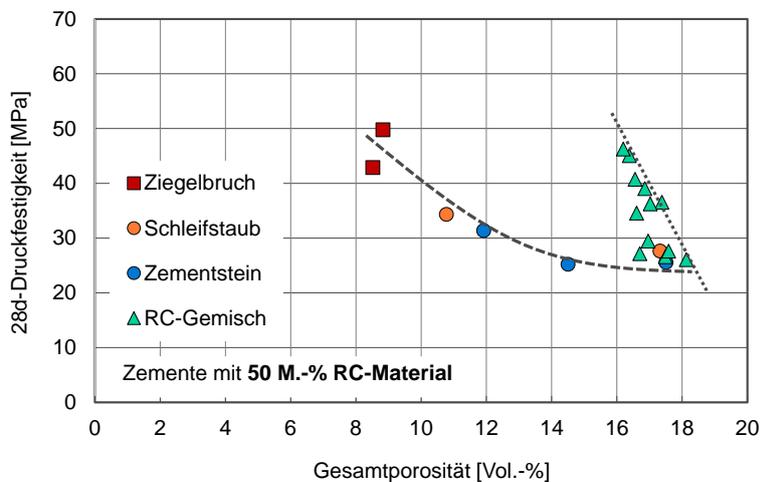
**Bild 45** Gesamtporosität der R-Zement-Normmörtel (Prüfalter 28 Tage) in Abhängigkeit der Packungsdichte der R-Zemente, Verwendung von RC-Materialien unterschiedlicher Zusammensetzung in Zementen mit einem RC-Anteil von 30 M.-%



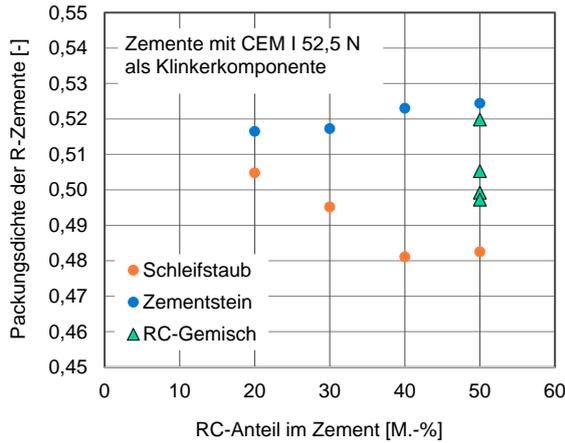
**Bild 46** Gesamtporosität der R-Zement-Normmörtel (Prüfalter 28 Tage) in Abhängigkeit der Hydratationswärme des im Zement eingesetzten RC-Materials, Verwendung von RC-Materialien unterschiedlicher Zusammensetzung und Reaktivität (Hydratationswärme) in Zementen mit einem RC-Anteil von 30 M.-%



**Bild 47** Porenanteile der R-Zement-Normmörtel < 0,03 μm (oben) sowie < 0,01 μm (unten) in Abhängigkeit der Hydratationswärme des im Zement eingesetzten RC-Materials, Untersuchung der auf 100% normierten PGV im Prüfalter von 28 Tagen, Verwendung von RC-Materialien unterschiedlicher Zusammensetzung und Reaktivität (Hydratationswärme) in Zementen mit einem RC-Anteil von 50 M.-%

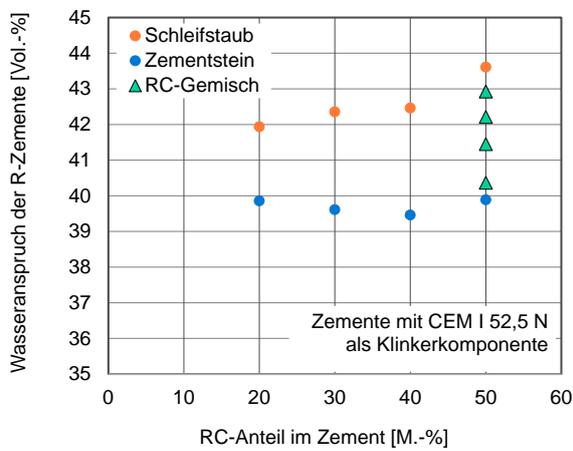


**Bild 48** Druckfestigkeit der Zemente in Abhängigkeit der Gesamtporosität am Normmörtel, Prüfalter 28 Tage, Verwendung von RC-Materialien unterschiedlicher Zusammensetzung in Zementen mit einem RC-Anteil von 50 M.-%



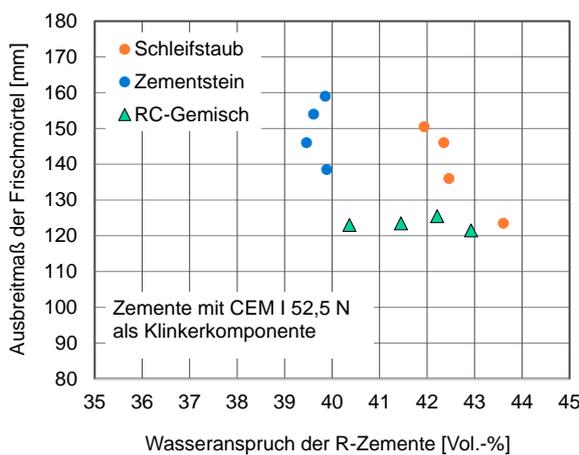
**Bild 49**

Packungsdichte der R-Zemente in Abhängigkeit ihres RC-Anteils, Verwendung von RC-Materialien unterschiedlicher Zusammensetzung in Kombination mit CEM I 52,5 N als Klinkerkomponente



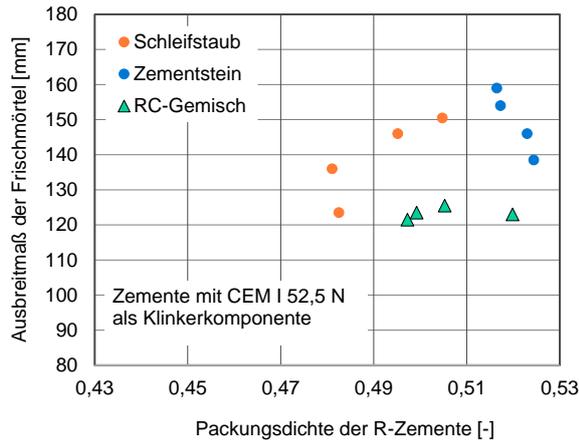
**Bild 50**

Wasseranspruch der R-Zemente (Punkte) in Abhängigkeit ihres RC-Anteils, Verwendung von RC-Materialien unterschiedlicher Zusammensetzung in Kombination mit CEM I 52,5 N als Klinkerkomponente



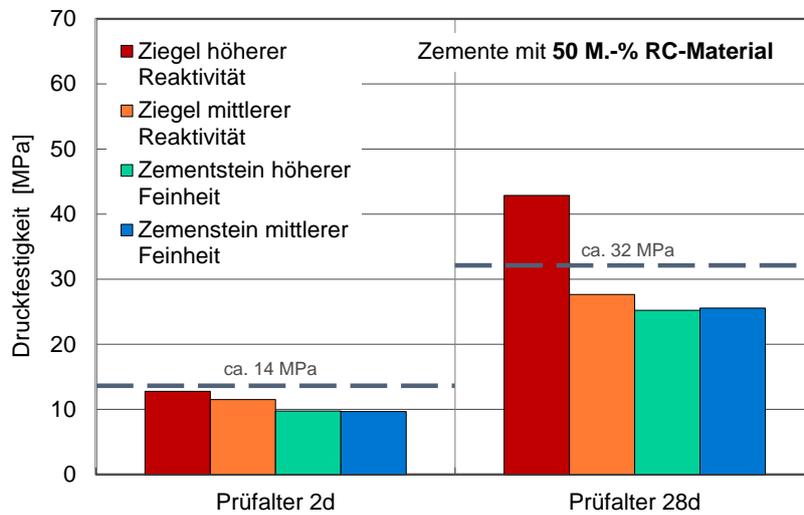
**Bild 51**

Ausbreitmaß der Frischmörtel in Abhängigkeit des Wasseranspruchs (Punkte) der R-Zemente mit RC-Anteilen von 20 M.-% bis 50 M.-% in Kombination mit CEM I 52,5 N als Klinkerkomponente



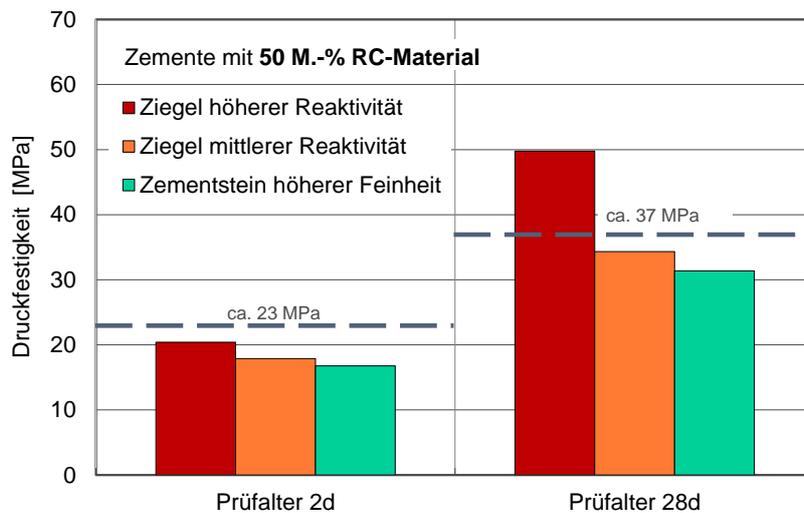
**Bild 52**

Ausbreitmaß der Frischmörtel in Abhängigkeit der Packungsdichte der R-Zemente mit RC-Anteilen von 20 M.-% bis 50 M.-% in Kombination mit CEM I 52,5 N als Klinkerkomponente



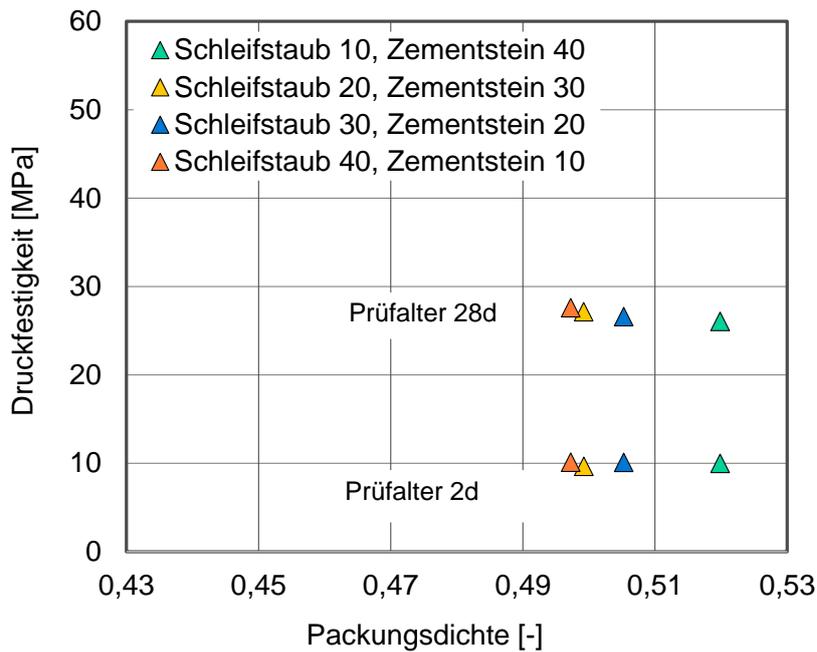
**Bild 53**

Druckfestigkeiten der Normmörtel im Prüfalter von zwei bzw. 28 Tagen, Verwendung von R-Zementen mit **50 M.-% RC-Material** unterschiedlicher Feinheit bzw. Reaktivität, Kombinationen mit **50 M.-% CEM I 52,5 N** als Klinkerkomponente

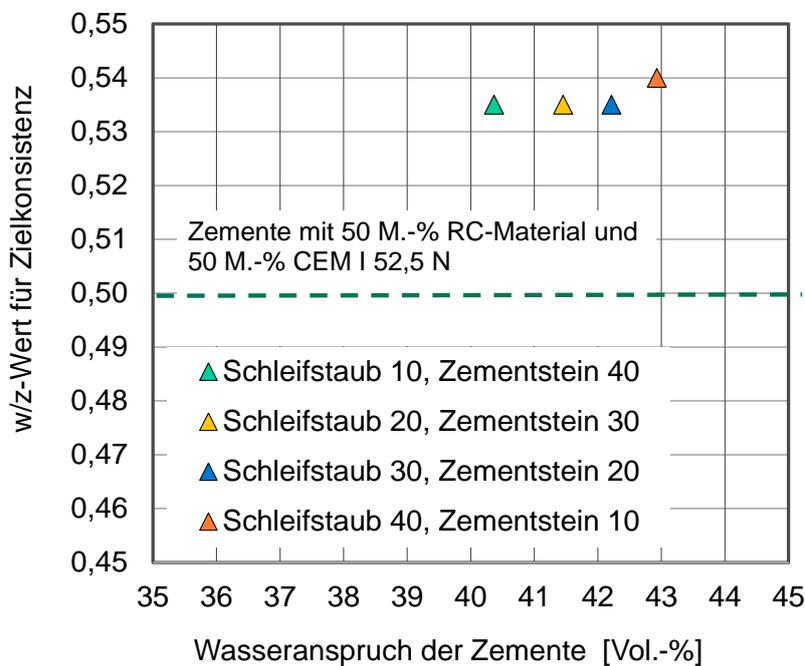


**Bild 54**

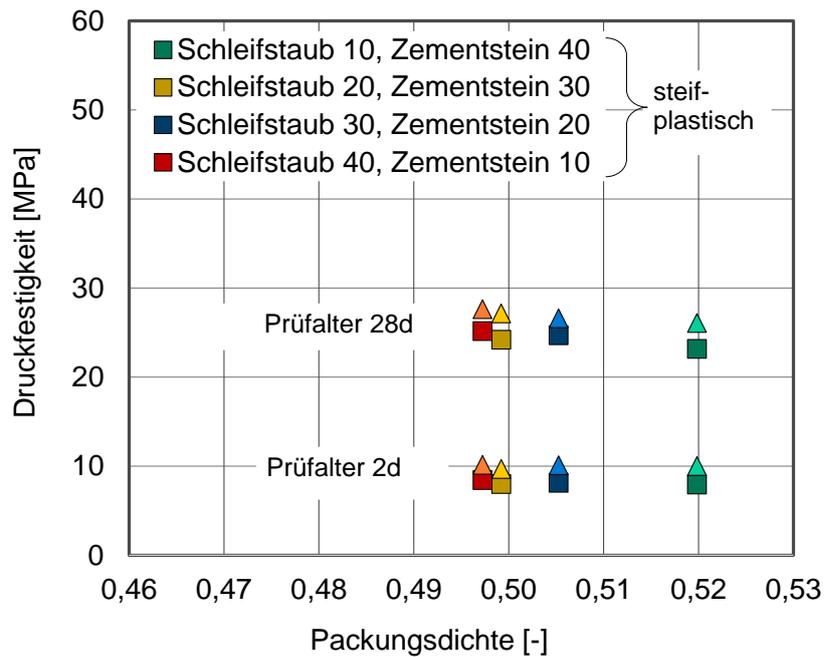
Druckfestigkeiten der Normmörtel im Prüfalter von zwei bzw. 28 Tagen, Verwendung von R-Zementen mit **50 M.-% RC-Material** unterschiedlicher Feinheit bzw. Reaktivität, Kombinationen mit **50 M.-% CEM I 52,5 R** als Klinkerkomponente



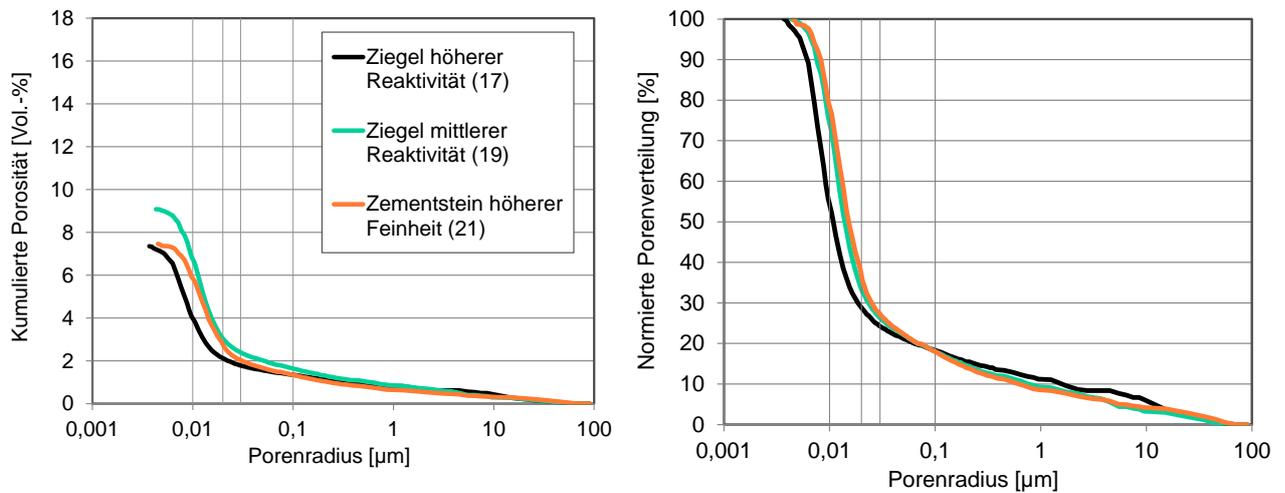
**Bild 55** Druckfestigkeiten der R-Zemente in Abhängigkeit ihrer Packungsdichten, Prüfalter zwei und 28 Tage, Verwendung von Zementen mit 50 M.-% RC-Gemischen unterschiedlicher Zusammensetzung in Kombination mit CEM I 52,5 N



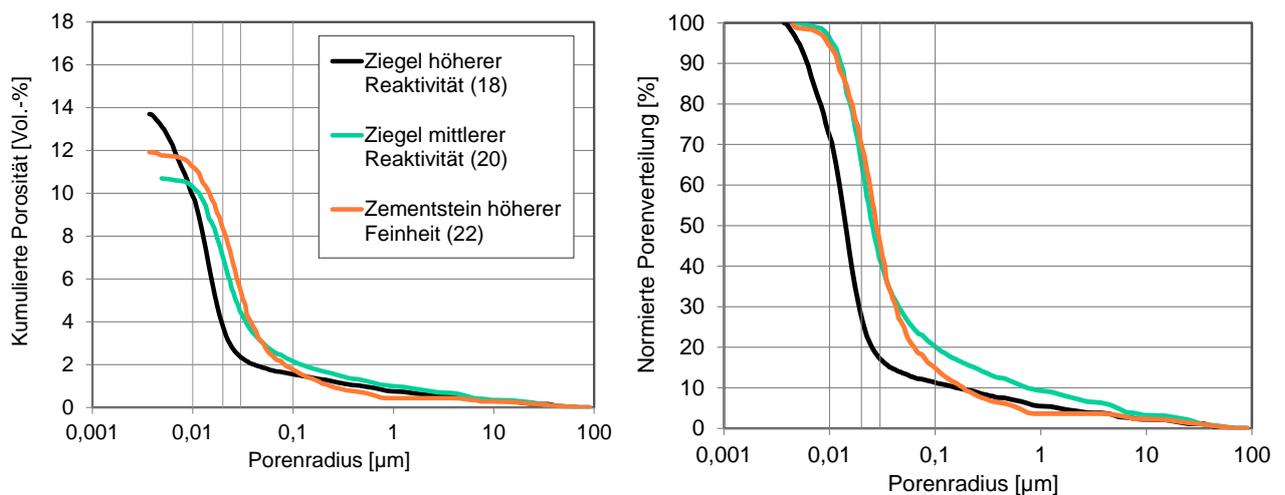
**Bild 56** Wasserzementwerte für eine konstante, steifplastische Zielkonsistenz (SP) der Frischmörtel unter Verwendung von R-Zementen mit 50 M.-% RC-Gemischen (Schleifstaub, Zementstein) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N  
Darstellung der w/z-Werte (SP) in Abhängigkeit des Wasseranspruchs der R-Zemente



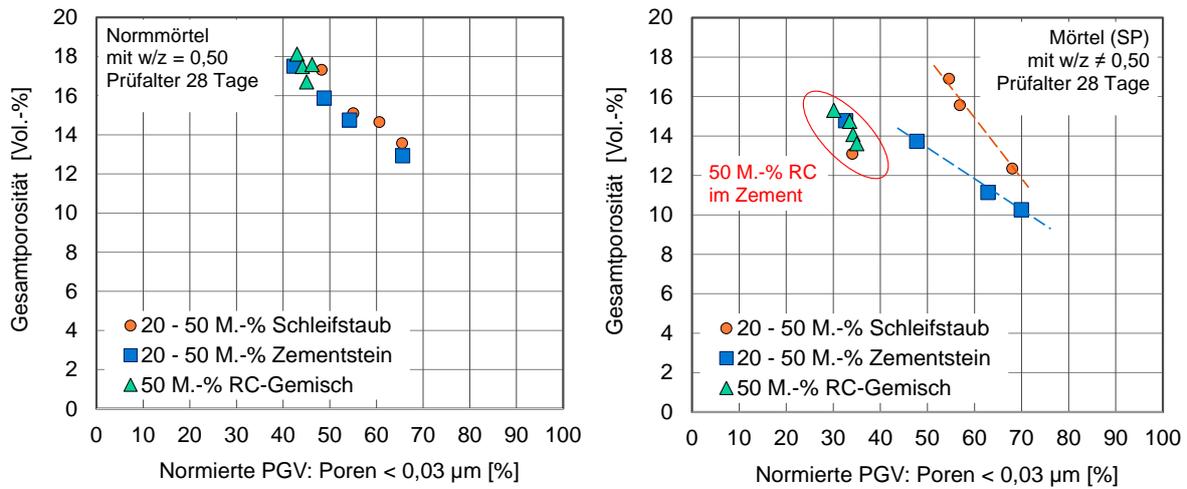
**Bild 57** Druckfestigkeit der Normmörtel im Vergleich zur Druckfestigkeit der SP-Mörtel sowie in Abhängigkeit der Packungsdichte der R-Zemente, Prüfalter zwei Tage und 28 Tage, Verwendung von R-Zementen mit 50 M.-% RC-Gemischen (Schleifstaub, Zementstein) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N  
(Markierung Dreieck: Normmörtel; Markierung Quadrat: SP-Mörtel)



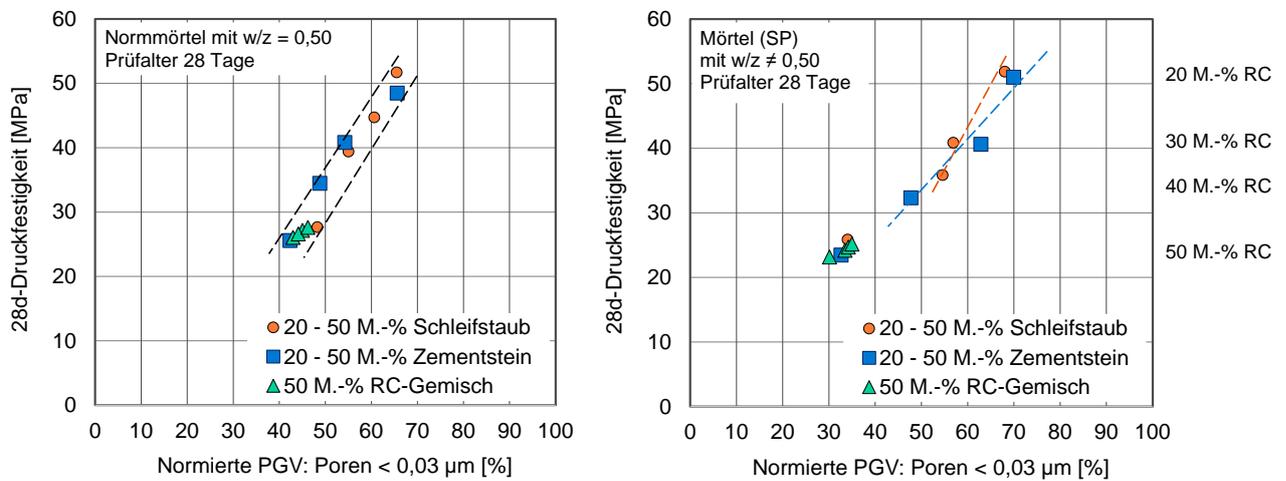
**Bild 58** Porengrößenverteilungen an Normmörteln im Prüfalter von 28 Tagen, Verwendung von R-Zementen mit **30 M.-% RC-Material** unterschiedlicher Feinheit bzw. Reaktivität, Kombinationen mit **70 M.-% CEM I 52,5 R** als Klinkerkomponente



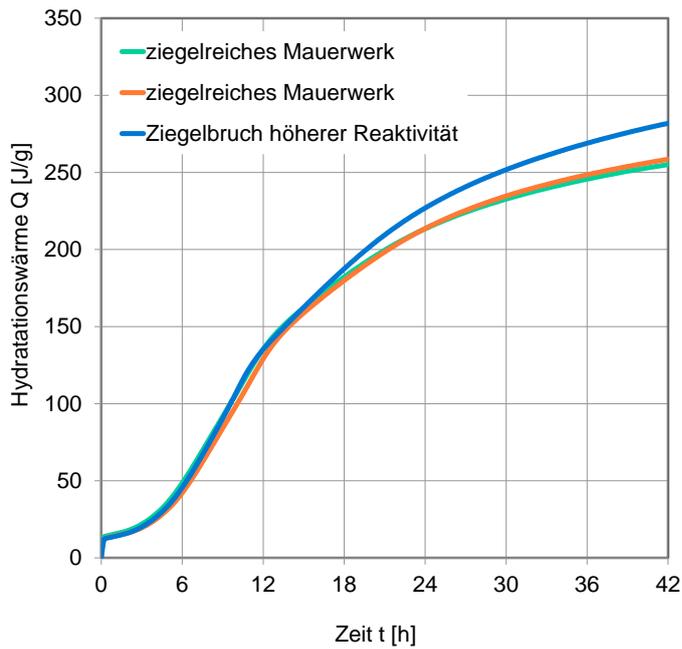
**Bild 59** Porengrößenverteilungen an Normmörteln im Prüfalter von 28 Tagen, Verwendung von R-Zementen mit **50 M.-% RC-Material** unterschiedlicher Feinheit bzw. Reaktivität, Kombinationen mit **50 M.-% CEM I 52,5 R** als Klinkerkomponente



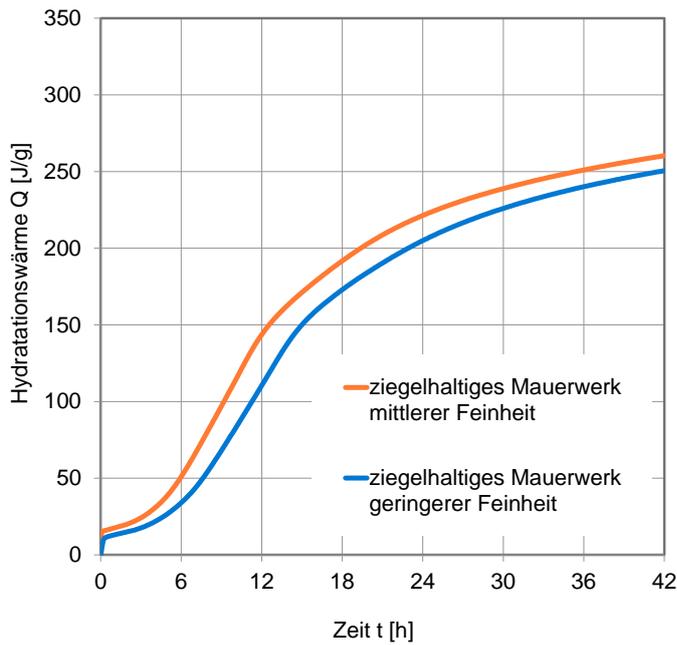
**Bild 60** Gesamtporosität der R-Zement-Mörtel (kumulierte PGV) in Abhängigkeit der Porenanteile < 0,03 µm (normierte PGV), Prüfalter 28 Tage, Verwendung von R-Zementen mit RC-Gehalten von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub, Zementstein, Gemische) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N als Klinkerkomponente  
links: Untersuchungen am Normmörtel; rechts: Untersuchungen am SP-Mörtel



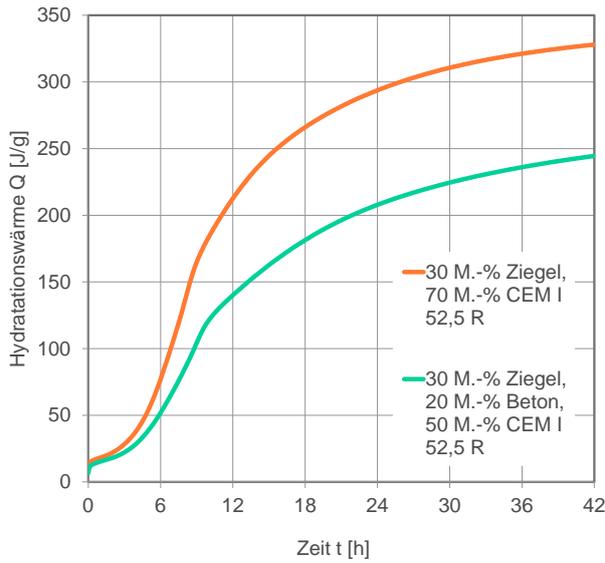
**Bild 61** Druckfestigkeit der R-Zement-Mörtel in Abhängigkeit der Porenanteile < 0,03 µm (normierte PGV), Prüfalter 28 Tage, Verwendung von R-Zementen mit RC-Gehalten von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub, Zementstein, Gemische) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N,  
links: Untersuchungen am Normmörtel; rechts: Untersuchungen am SP-Mörtel

**Bild 62**

Untersuchung der Hydratationswärme an Normmörteln über eine Prüfdauer von 42 Stunden, Anwendung von Zementen mit 30 M.-% ziegelreichem RC-Material (MA 1, ZI 3) vergleichbarer Mahlfineinheit sowie 70 M.-% CEM I 42,5 R als Klinkerkomponente

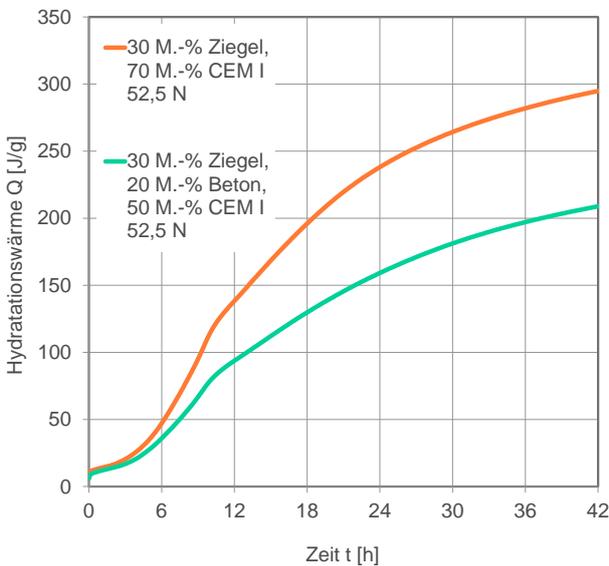
**Bild 63**

Untersuchung der Hydratationswärme an Normmörteln über eine Prüfdauer von 42 Stunden, Anwendung von Zementen mit 30 M.-% ziegelhaltigem RC-Material (MA 3) unterschiedlicher Feinheit sowie 70 M.-% CEM I 42,5 R als Klinkerkomponente



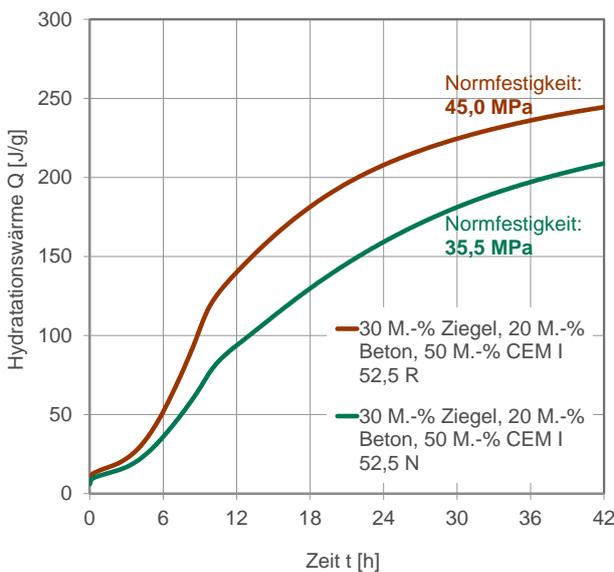
**Bild 64**

Untersuchung der Hydratationswärme an Normmörteln über eine Prüfdauer von 42 Stunden, Anwendung von Zementen mit 30 M.-% Ziegelbruch (grün: 20 M.-% Betonbruch) in Kombination mit 70 M.-% bzw. 50 M.-% CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente



**Bild 65**

Untersuchung der Hydratationswärme an Normmörteln über eine Prüfdauer von 42 Stunden, Anwendung von Zementen mit 30 M.-% Ziegelbruch (grün: 20 M.-% Betonbruch) in Kombination mit 70 M.-% bzw. 50 M.-% CEM I 52,5 N als Klinkerkomponente



**Bild 66**

Untersuchung der Hydratationswärme an Normmörteln über eine Prüfdauer von 42 Stunden, Anwendung von Zementen mit 30 M.-% Ziegelbruch und 20 M.-% Betonbruch in Kombination mit 50 M.-% CEM I 52,5 R bzw. CEM I 52,5 N als Klinkerkomponente

**10 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis (Abschnitte 1 bis 8)**

Tabelle 1	Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Reaktivität
Tabelle 2	Granulometrische Eigenschaften der Recyclingmehle aus ziegelhaltigen (MA, ZI) bzw. zementgebundenen RC-Ausgangsstoffen (ZS, BB)
Tabelle 3	Eigenschaften der als Klinkerbestandteile eingesetzten Portlandzemente
Bild 1	Untersuchungen zur Bestimmung der Hydratationswärme (Doppelbestimmung), Beispiele im Vergleich von Ziegelbruch ZI und Mauerwerksbruch MA mit calcinierten Tonen sowie anderen mineralischen Ausgangsstoffen (Quarz und Hüttensand sind als Einzelwerte abgebildet)
Bild 2	Untersuchungen zur Bestimmung der Hydratationswärme (Doppelbestimmung), Beispiele im Vergleich von Zementstein ZS und Betonbruch BB mit Quarz (als Einzelwert abgebildet)
Bild 3	Untersuchungen an RC-Materialien zur Bestimmung der Hydratationswärme und des chemisch gebundenen Wassers nach ASTM C1897-20
Bild 4	Wertebereiche der Packungsdichte von R-Zementen und der Hydratationswärme der im Zement eingesetzten RC-Materialien, Verwendung von RC-Materialien unterschiedlicher Zusammensetzung und Reaktivität (Hydratationswärme nach ASTM C1897-20), Zemente mit 50 M.-% RC-Material in Kombination mit CEM
Bild 5	Packungsdichte des R-Zements in Abhängigkeit der Packungsdichte des Recyclingmehls
Bild 6	Wasseranspruch für Normsteife [M.-%], Wasseranspruch nach Punkte [Vol.-%] und rechnerisch ermittelter Hohlraum [%] in Abhängigkeit der Packungsdichte der R-Zemente, Zemente mit 30 M.-% RC-Material, Verwendung unterschiedlicher RC-Materialien mit variierenden Feinheiten
Bild 7	Wertebereiche des Wasseranspruchs nach Punkte sowie des Wasseranspruchs für Normsteife (DIN EN 196-3) im Vergleich (die Markierungen beziehen sich auf den Wasseranspruch von 32 M.-% bzw. 36 M.-%), Untersuchung von R-Zementen mit 30 M.-% Recyclingmehl und 70 M.-% CEM I 52,5 N
Bild 8	Wasseranspruch der Zemente (Punkte-Verfahren) in Abhängigkeit der Zementpackungsdichte, oben: Zemente mit einem RC-Anteil von 30 M.-% und 70 M.-% CEM I, unten: Zemente mit einem RC-Anteil von 50 M.-% und 50 M.-% CEM I, Verwendung von CEM I 52,5 N bzw. CEM I 52,5 R
Bild 9	Druckfestigkeit der Zemente in Abhängigkeit der Zementpackungsdichte, Zemente mit einem RC-Anteil von 30 M.-% in Kombination mit CEM I oben: Anfangsfestigkeit im Prüfaltest von zwei Tagen, unten: Normfestigkeit im Prüfaltest von 28 Tagen
Bild 10	Druckfestigkeit der Zemente in Abhängigkeit der Zementpackungsdichte, Zemente mit einem RC-Anteil von 50 M.-% in Kombination mit CEM I oben: Anfangsfestigkeit im Prüfaltest von zwei Tagen, unten: Normfestigkeit im Prüfaltest von 28 Tagen

- Bild 11 Druckfestigkeit der Zemente in Abhängigkeit der Hydratationswärme des im Zement eingesetzten RC-Materials, Verwendung von RC-Materialien unterschiedlicher Zusammensetzung und Reaktivität (Hydratationswärme), Zemente mit einem RC-Anteil von 30 M, Bild oben: Anfangsfestigkeit im Prüfalalter von zwei Tagen, Bild unten: Normfestigkeit im Prüfalalter von 28 Tagen
- Bild 12 Druckfestigkeit der Zemente in Abhängigkeit der Hydratationswärme des im Zement eingesetzten RC-Materials, Verwendung von RC-Materialien unterschiedlicher Zusammensetzung und Reaktivität (Hydratationswärme), Zemente mit einem RC-Anteil von 50 M.-%, Bild oben: Anfangsfestigkeit im Prüfalalter von zwei Tagen, Bild unten: Normfestigkeit im Prüfalalter von 28 Tagen
- Bild 13 Porenanteile der R-Zement-Normmörtel  $< 0,03 \mu\text{m}$  (oben) sowie  $< 0,01 \mu\text{m}$  (unten) in Abhängigkeit der Hydratationswärme des im Zement eingesetzten RC-Materials, Untersuchung der auf 100% normierten PGV im Prüfalalter von 28 Tagen, Verwendung von RC-Materialien unterschiedlicher Zusammensetzung und Reaktivität (Hydratationswärme) in Zementen mit einem RC-Anteil von 30 M.-%
- Bild 14 Druckfestigkeit der Zemente in Abhängigkeit der Gesamtporosität am Normmörtel, Prüfalalter 28 Tage, Verwendung von RC-Materialien unterschiedlicher Zusammensetzung in Zementen mit einem RC-Anteil von 30 M.-%
- Bild 15 Wasseranspruch (Punkte) in Abhängigkeit der Packungsdichte der R-Zemente mit RC-Anteilen von 20 M.-% bis 50 M.-% in Kombination mit CEM I 52,5 N als Klinkerkomponente
- Bild 16 Wasseranspruch (Punkte) in Abhängigkeit der Packungsdichte der R-Zemente mit konstanten RC-Anteilen von 50 M.-% in Kombination mit CEM I 52,5 N bzw. CEM I 52,5 R als Klinkerkomponenten
- Bild 17 Ausbreitmaß der Frischmörtel in Abhängigkeit des RC-Anteils der R-Zemente, Verwendung von RC-Materialien unterschiedlicher Zusammensetzung in Kombination mit CEM I 52,5 N als Klinkerkomponente
- Bild 18 Ausbreitmaß der Frischmörtel in Abhängigkeit des Wasseranspruchs (Punkte) der R-Zemente mit RC-Anteilen von 20 M.-% bis 50 M.-% in Kombination mit CEM I 52,5 N als Klinkerkomponente
- Bild 19 Druckfestigkeiten der Normmörtel im Prüfalalter von zwei bzw. 28 Tagen, Verwendung von R-Zementen mit 30 M.-% RC-Material unterschiedlicher Feinheit bzw. Reaktivität, Kombinationen mit 70 M.-% CEM I 52,5 N als Klinkerkomponente
- Bild 20 Druckfestigkeiten der Normmörtel im Prüfalalter von zwei bzw. 28 Tagen, Verwendung von R-Zementen mit 30 M.-% RC-Material unterschiedlicher Feinheit bzw. Reaktivität, Kombinationen mit 70 M.-% CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente
- Bild 21 Anfangsfestigkeiten der R-Zemente in Abhängigkeit ihrer Packungsdichten, Verwendung von Zementen mit RC-Anteilen von 20 M.-% bis 50 M.-% in Kombination mit CEM I 52,5 N

- Bild 22 Anfangsfestigkeiten der R-Zemente in Abhängigkeit ihrer Packungsdichten, Verwendung von Zementen mit einem konstanten RC-Anteil von 50 M.-% in Kombination mit CEM I 52,5 N bzw. CEM I 52,5 R
- Bild 23 Normfestigkeiten der R-Zemente in Abhängigkeit ihrer Packungsdichten, Verwendung von Zementen mit RC-Anteilen von 20 M.-% bis 50 M.-% in Kombination mit CEM I 52,5 N
- Bild 24 Normfestigkeiten der R-Zemente in Abhängigkeit ihrer Packungsdichten, Verwendung von Zementen mit einem konstanten RC-Anteil von 50 M.-% in Kombination mit CEM I 52,5 N bzw. CEM I 52,5 R
- Bild 25 Wasserzementwerte für eine konstante, steifplastische Zielkonsistenz (SP) der Frischmörtel unter Verwendung von R-Zementen mit RC-Gehalten von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub, Zementstein) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N, Darstellung der w/z-Werte (SP) in Abhängigkeit des Wasseranspruchs der R-Zemente
- Bild 26 Druckfestigkeit der Normmörtel im Vergleich zur Druckfestigkeit der SP-Mörtel sowie in Abhängigkeit der Packungsdichte der R-Zemente, Prüfalalter zwei Tage, Verwendung von Zementen mit RC-Anteilen von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub bzw. Zementstein), jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N
- Bild 27 Druckfestigkeit der Normmörtel im Vergleich zur Druckfestigkeit der SP-Mörtel sowie in Abhängigkeit der Packungsdichte der R-Zemente, Prüfalalter 28 Tage, Verwendung von Zementen mit RC-Anteilen von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub bzw. Zementstein), jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N
- Bild 28 Porengrößenverteilungen an Normmörteln im Prüfalalter von 28 Tagen, Verwendung von R-Zementen mit 30 M.-% RC-Material unterschiedlicher Feinheit bzw. Reaktivität, Kombinationen mit 70 M.-% CEM I 52,5 N als Klinkerkomponente
- Bild 29 Porengrößenverteilungen an Normmörteln im Prüfalalter von 28 Tagen, Verwendung von R-Zementen mit 50 M.-% RC-Material unterschiedlicher Feinheit bzw. Reaktivität, Kombinationen mit 50 M.-% CEM I 52,5 N als Klinkerkomponente
- Bild 30 Gesamtporosität der R-Zement-Mörtel in Abhängigkeit des RC-Anteils der R-Zemente, Prüfalalter 28 Tage, Verwendung von R-Zementen mit RC-Gehalten von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub, Zementstein, Gemische) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N als Klinkerkomponente, links: Gesamtporosität am Normmörtel; rechts: Gesamtporosität am SP-Mörtel
- Bild 31 Porenanteile der R-Zement-Mörtel  $< 0,03 \mu\text{m}$  (normierte PGV) in Abhängigkeit des RC-Anteils der R-Zemente, Prüfalalter 28 Tage, Verwendung von R-Zementen mit RC-Gehalten von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub, Zementstein, Gemische) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N als Klinkerkomponente, links: Untersuchungen am Normmörtel; rechts: Untersuchungen am SP-Mörtel
- Bild 32 Porenanteile der R-Zement-Mörtel  $< 0,01 \mu\text{m}$  (normierte PGV) in Abhängigkeit des RC-Anteils der R-Zemente, Prüfalalter 28 Tage, Verwendung von R-Zementen mit RC-Gehalten von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub, Zementstein, Gemische) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N als

- Klinkerkomponente, links: Untersuchungen am Normmörtel; rechts: Untersuchungen am SP-Mörtel
- Bild 33 Druckfestigkeit der R-Zement-Mörtel in Abhängigkeit der Gelporenanteile  $< 0,01 \mu\text{m}$  (normierte PGV), Prüfalter 28 Tage, Verwendung von R-Zementen mit RC-Gehalten von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub, Zementstein, Gemische) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N, links: Untersuchungen am Normmörtel; rechts: Untersuchungen am SP-Mörtel
- Bild 34 Druckfestigkeit der R-Zement-Mörtel in Abhängigkeit der Gesamtporosität (kumulierte PGV), Prüfalter 28 Tage, Verwendung von R-Zementen mit RC-Gehalten von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub, Zementstein, Gemische) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N, links: Untersuchungen am Normmörtel; rechts: Untersuchungen am SP-Mörtel
- Bild 35 Druckfestigkeit der Normmörtel ( $w/z = 0,50$ ) im Vergleich zur Druckfestigkeit der SP-Mörtel ( $w/z \neq 0,50$ ), Prüfalter zwei Tage, Verwendung von Zementen RC-Gehalten von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub, Zementstein, Gemische) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N
- Bild 36 Druckfestigkeit der Normmörtel ( $w/z = 0,50$ ) im Vergleich zur Druckfestigkeit der SP-Mörtel ( $w/z \neq 0,50$ ), Prüfalter 28 Tage, Verwendung von Zementen RC-Gehalten von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub, Zementstein, Gemische) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N
- Bild 37 Gesamtporosität der Normmörtel ( $w/z = 0,50$ ) im Vergleich zur Gesamtporosität der SP-Mörtel ( $w/z \neq 0,50$ ), Prüfalter 28 Tage, Verwendung von Zementen RC-Gehalten von 20 M.-% bis 50 M.-% (Schleifstaub, Zementstein, Gemische) - jeweils in Kombination mit CEM I 52,5 N
- Bild 38 Untersuchung der Hydratationswärme an Normmörteln über eine Prüfdauer von 42 Stunden, Anwendung von Zementen mit 30 M.-% RC-Material (ZI 3, ZI 13, ZS 8, ZS9) unterschiedlicher Feinheit bzw. Reaktivität sowie 70 M.-% CEM I 52,5 N als Klinkerkomponente
- Bild 39 Untersuchung der Hydratationswärme an Normmörteln über eine Prüfdauer von 42 Stunden, Anwendung von Zementen mit 30 M.-% RC-Material (ZI 3, ZI 13, ZI 9) unterschiedlicher Feinheit bzw. Reaktivität sowie 70 M.-% CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente
- Bild 40 Untersuchung der Hydratationswärme an Normmörteln über eine Prüfdauer von 42 Stunden, Anwendung von Zementen mit 30 M.-% Ziegelbruch (ZI 3) sowie 70 M.-% CEM I unterschiedlicher Festigkeitsklassen als Klinkerkomponente
- Bild 41 Untersuchung der Hydratationswärme an Normmörteln über eine Prüfdauer von 42 Stunden, Anwendung von Zementen mit 30 M.-% ziegelreichem RC-Material (MA 1) unterschiedlicher Feinheit sowie 70 M.-% CEM I 42,5 R als Klinkerkomponente
- Bild 42 Druckfestigkeit der R-Zemente im Prüfalter von zwei und 28 Tagen in Abhängigkeit der Hydratationswärme (Langavant-Verfahren), Untersuchungen der Normmörtel im Prüfalter 42 Stunden, Anwendung von Zementen mit 30 M.-% RC-Material sowie 70 M.-% CEM I

## 11 Literaturverzeichnis

- [1] 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
- [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] Konsortium R-Beton. *Ressourcenschonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation, R-Beton* ©. Verfügbar unter: <https://www.r-beton.de/>
- [5] Severins, Katrin; Müller, Christoph. *Brechsand als Hauptbestandteil im Zement*. Beton 2017, S. 323-326
- [6] 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
- [7] 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*
- [8] *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: Forschungsinstitut der Zementindustrie, FIZ o.J.
- [9] 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
- [10] Pierkes, Roland; Schulze, Simone E.; Rickert, Jörg. *Durability of composite cements with calcined clay*. International Cement Review 2018, S. 34-36
- [11] *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

- [12] 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
- [13] Müller, Christoph; Ehrenberg, Andreas. *Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit hüttensand- und flugaschereichen Zementen: Schlussbericht IGF-Vorhabens 18228 N*. Düsseldorf: 2017
- [14] Müller, C.; Severins, K.. *Dauerhaftigkeit von Betonen mit flugaschereichen Zementen*. Beton 2007/3, S. 119
- [15] VDZ gGmbH. *Granulometrische Optimierung klinkereffizienter Zemente - Effekte auf die Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit von Beton (DBU-Forschungsprojekt AZ 34647/01)*. Düsseldorf: 2023
- [16] 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
- [17] 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
- [18] Reschke, Thorsten. *Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton*. Düsseldorf: 2001
- [19] Palm, S.. *Optimierung der Raumauffüllung und der Komponentenverteilung von Multikompositzementen*. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger 2009
- [20] Müller-Pfeiffer, Michael. *Herstellung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen durch gemeinsames oder getrenntes Mahlen und Mischen*. Düsseldorf: 2000
- [21] DIN EN Entwurf 197-6 2022-06. *Zement - Teil 6: Zement mit rezyklierten Baustoffen; Deutsche und Englische Fassung prEN 197-6:2022*
- [22] 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
- [23] Dobala, Elena. *Randbedingungen zur Herstellung von Mörteln mit plastischer Konsistenz unter Verwendung ressourceneffizienter Zemente*. Bochum, Univ., Masterarbeit, 2022. Bochum, 2022
- [24] Laschet, Pierre. *Randbedingungen für die Anwendung von Recyclingmehlen in ressourceneffizienten, zementgebundenen Baustoffen*. Aachen, FH, Masterarbeit, 2023. Aachen, 2023
- [25] Hermerschmidt, Wibke. *Modelle zur Beschreibung der thermomechanischen Materialeigenschaften jungen Betons*. Braunschweig, 2016. Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2016
- [26] Beuntner, Nancy. *Zur Eignung und Wirkungsweise calcinierter Tone als reaktive Bindemittelkomponente im Zement*. München: 2017
- [27] *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: Forschungsinstitut der Zementindustrie, FIZ 2004*
- [28] Severins, Katrin; Palm, Sebastian. *Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen - Bekannte Stoffe - Neue Konzepte*, . 2011
- [29] 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
- [30] Grabois, T.M.; Cordeiro, G.C.; Filho, R.D. Toledo. *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
- [31] 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
- [32] Schulze, Simone. *Nutzung von natürlichen getemperten Tonen als Zementhauptbestandteil: Schlussbericht zu dem geförderten Vorhaben: 16566 N. Düsseldorf: VDZ gGmbH 2012*
- [33] 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
- [34] 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
- [35] 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
- [36] 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
- [37] 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

- 
- [38] Krüsemann, Magdalena. *Einfluss von Granulometrie und w/z-Wert auf die Eigenschaften von Zementmörteln*. Bochum: 2017
- [39] 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
- [40] Ge, Zhi; Wu, Xinheng; 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
- [41] 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
- [42] 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

## 12 Bezug des Forschungsthemas zur aktuellen gesellschaftspolitischen Situation

Die Nachfrage nach Baustoffen aus dem Recycling ist bisher nicht signifikant gestiegen. Wichtiges Argument scheint oftmals der Preis zu sein, insbesondere im Vergleich mit primären Ausgangsstoffen sowie primären Baustoffen.

Die sog. „Ressourcen-Themen“ (wie z. B. ein verantwortungsbewusster oder ressourcenschonender Umgang mit Rohstoffen, Energie, Wasser, Materialien, Bodenschätzen und Baustoffen – auch mit RC-Baustoffen) scheinen noch immer wenig in der Gesellschaft verankert. Die Transformation in einigen umwelt- und ressourcenpolitischen Sektoren schreitet nichts desto trotz voran.

Im Bereich der Erforschung, der Herstellung und der Anwendung ressourcen- und klinkereffizienter Zemente haben sich während der Projektlaufzeit wesentliche Randbedingungen für die Durchführung dieses ZukunftBau-Projekt verbessert. Im Abschnitt 2 wurden beispielsweise Aspekte aus Normungs- und Zulassungsverfahren für RC-haltige Zemente und ihre Bestandteile vorgestellt.

Insgesamt leistete die Vernetzung mit anderen Projekt-, Forschungs- und Industriepartnern aus der Kreislaufwirtschaft einen maßgeblichen Beitrag zum Erreichen der Forschungsziele. Branchenübergreifende Kommunikation und Wissenschaftstransfer dienten als Unterstützung auf neuen Forschungswegen entlang der Wertschöpfungskette und der Wertstoffkreisläufe.

## 13 Ergebnisverwertung und Plan zum Ergebnistransfer

### 13.1 Verwendbarkeit der Ergebnisse für die Entwicklung zukünftiger Produkte

In der Verwendung feindisperser, mineralischer RC-Baustoffe bei der Zementherstellung kann eine Chance zur nachhaltigen und ressourcenschonenden Rohstoffsicherung sowie zur Etablierung neuer, zukunftsfähiger Verfahrenswege entlang der Wertschöpfungskette bzw. innerhalb der Kreislaufwirtschaft gesehen werden.

Die Verwendung von RC-Baustoffen unterschiedlicher Zusammensetzungen könnte sich in der Zementmahlung etablieren. Dabei könnten die stofflichen und energetischen Inhalte der ursprünglichen Baustoffe im Kreislauf geführt werden und erhalten bleiben.

Einer kurzfristigen Einführung aller Vorhabenergebnisse in die Praxis stehen gewisse administrative Gesichtspunkte entgegen. Insbesondere umweltanalytische oder bauaufsichtliche Restriktionen könnten die Herstellung und Anwendung vielfältiger feindisperser Stoffe aus dem Recycling mineralischer Bauabfälle in Zulassungsverfahren wie in der Praxiseinführung verzögern.

Nach derzeitigem Stand der Normungs- und Zulassungsverfahren könnten die Ergebnisse mittelfristig umgesetzt werden.

### 13.2 Verwertung der Ergebnisse bei Instituten

- Schaffung neuer, zukunftsorientierter Verfahrens- und Verwertungswege entlang der Wertschöpfungsketten bzw. Wertekreisläufe
- Beitrag zur Entwicklung eines ressourcenschonenden Verwertungs- und Kreislaufwirtschaftskonzeptes für feindisperse Stoffe und Stoffgemische aus dem Recycling mineralischer Bauabfälle
- signifikante Weiterentwicklung des wissenschaftlichen/technischen Know-hows, Erarbeitung neuer Erkenntnisse sowie praktisch umsetzbarer Methoden auf Grundlage der Forschungstätigkeit, Erweiterung und Stärkung der Kompetenzen im Bereich Forschung
- Entwicklung neuer CO<sub>2</sub>-Minderungs- sowie Kreislaufwirtschaftsstrategien.

### 13.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

- Schaffung von technisch-wissenschaftlichen Grundlagen für die ressourcenschonende Herstellung von R-Zementen als Bindemittel für dauerhafte Betone
- Ressourcenschutz (Schutz natürlicher Ressourcen und Verwendung regional verfügbarer Ressourcen, z. B. aus der Kreislaufwirtschaft)
- Klimaschutz und weitere Verringerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Zementherstellung durch Steigerung der Klinkereffizienz und Verringerung des Klinkerfaktors
- Lebensdauer des Betons erhöhen und gleichzeitig CO<sub>2</sub>-Intensität des Betons senken
- Ausrichtung verfahrenstechnischer Optimierungsschritte auf die ressourcenschonende Kreislaufwirtschaft sowie auf stoffspezifische Potenziale
- Einbindung der Bauaufsicht, Einführung neuer Produkte in das regelwerksbasierte Baugeschäft und in den deutschen Markt (z. B. Zulassungsanträge beim DIBt) – vgl. Abschnitt 8.

### 13.4 Verwertungsmöglichkeiten außerhalb des Vorhabens (Institute, Unternehmen)

Aus dem Verwertungsplan des Zuwendungsantrags weiterhin relevant:

Die Ergebnisse finden Verwertung in der Recyclingindustrie, insbesondere in Unternehmen, die selektiven Rückbau betreiben, eine aktive Aufbereitung mineralischer Bauabfälle unterschiedlicher Herkunft durchführen und rezyklierte Produkte sortenrein herstellen.

Weitere Verwertungsmöglichkeiten sind gegeben:

- in Unternehmen, die fehlerhafte mineralische Bauprodukte während der Produktion ausschleusen und selbst aufbereiten, z. B. Ziegelwerke, sowie in entsprechenden Forschungseinrichtungen
- in den Unternehmen, die RC-Gesteinskörnungen anwenden, z. B. Betonwerke, sowie in entsprechenden Forschungseinrichtungen
- in Zementwerken, die eine Herstellung von R-Zementen planen, um natürliche Ressourcen zu schützen sowie Klinker im Zement effizienter einzusetzen.