

IBU BAU+TEC GmbH
Innovative Baustoffkonzepte im Umweltschutz, Wiesbaden

und

Fachgebiet Baustoffkunde, Bautenschutz/Sanierungsbaustoffe,
Bauphysik der
Hochschule Wismar
University of Applied Sciences Technology, Business and Design

**Erarbeitung werkstofftechnischer Kenntnisse zur Struktur neuer
Recycling (RC-)zemente und labormaßstäbliche Entwicklung
umweltfreundlicher RC-Bauprodukte für Einsatzbereiche
im Hoch- und Tiefbau**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 34465/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Wolfgang Perbix & Prof. Dr.-Ing. Winfried Malorny

Wiesbaden, Juli 2021

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	34465/01	Referat	23	Fördersumme	124.969 €
Antragstitel		Erarbeitung werkstofftechnischer Kenntnisse zur Struktur neuer Recycling(RC-)zemente und labormaßstäbliche Entwicklung umweltfreundlicher RC-Bauprodukten für Einsatzbereiche im Hoch- und Tiefbau			
Stichworte		Abwasser, Grundwasser, Produkte, Materialien, Verminderung, Werkstoffe			
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
21 Monate		19.12.2018		31.08.2020	
Zwischenberichte		keine			
Bewilligungsempfänger				Tel 0611-72 44 493	
IBU BAU+TEC GmbH				Fax -	
Humboldtstr. 14				Projektleitung	
65189 Wiesbaden				Dr.-Ing. Perbix	
				Bearbeiter	
				Dr.-Ing. Perbix	
Kooperationspartner					
Hochschule Wismar University of Applied Sciences Technology, Business and Design Fachgebiet Baustoffkunde, Bautenschutz/Sanierungsbaustoffe, Bauphysik der Hochschule Wismar Prof. Dr.-Ing. Winfried Malorny Philipp-Müller-Straße 14 23966 Wismar					
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>In der Bau- und Recyclingpraxis wird Altbeton dem Stand der Technik entsprechend durch Brechen und Sieben aufbereitet und der so gewonnene Betonbruch - oftmals auch als RC-Körnung, RC-Zuschlag oder Betongranulat bezeichnet - überwiegend für untergeordnete Anwendungen, z.B. als Schottersatz im Tiefbau, eingesetzt. Die Ausschöpfung des technischen und wirtschaftlichen Potentials des Betonabfalls als neue Rohstoffquelle für innovative Recyclingbaustoffe (RC-Baustoffe) bleibt bei diesem Downcycling ebenso ungenutzt wie das hohe Umweltentlastungspotential der neuen Recyclingtechnik hinsichtlich Energieeffizienz und CO₂-Einsparungen. Mit dem Zuge eines BMBF-geförderten F&E-Projektes entwickelten energieeffizienten und CO₂-armen Aufbereitungstechnik können erstmals aus dem ursprünglichen Verbundbaustoff Altbeton hochwertige und umweltfreundliche Recyclingzemente (RC-CEM) und Recyclinggesteinskörnungen (RC-GK) als Ersatz konventioneller Zemente und Gesteinskörnungen gewonnen werden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass insbesondere die ausgeprägte Reaktivität des Recyclingzementes sowie die Steuerung seiner Verarbeitungseigenschaften weiterer vertiefender Materialuntersuchungen bedürfen. Aufbauend auf den im o.g. BMBF-Förderprojekt gewonnenen Erkenntnissen waren diese Problemstellungen im vorliegenden Projekt zu klären, um somit die abschließenden Voraussetzungen zur Markteinführung der neuen Technologie zu schaffen.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt □ An der Bornau 2 □ 49090 Osnabrück □ Tel 0541/9633-0 □ Fax 0541/9633-190 □ http://www.dbu.de					

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im ersten Teil des Projektes wurden zunächst laborexperimentelle Untersuchungen zu den Charakteristiken von Recyclingbindemitteln aus Zementstein als Modell der Bindephase von (Alt-)Betonen durchgeführt sowie Maßnahmen zur Anpassung dieser an die Erfordernisse der praktischen Anwendung im Bauwesen. Hierbei fanden auch die Untersuchungsergebnisse früherer eigener Versuchsreihen Beachtung. Die Untersuchungen wurden vergleichend mit normgemäßen, marktüblichen Zementen vorgenommen. Dabei erfolgte die Erarbeitung vertiefter werkstofftechnischer Kenntnisse mittels Röntgendiffraktometrie und Thermoanalyse zur Bestimmung ihrer Zusammensetzung und Reaktivität, während die Lasergranulometrischen Untersuchungen der Darstellung der Kornverteilung und Mahlfineinheit sowie qualitative und quantitative Mikrostrukturuntersuchungen mittels Quecksilberdruckporosimetrie der physikalischen Spezifikationen der neuen Bindemittel dienen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen konnte in anwendungstechnisch orientierten Bindemittelentwicklungen und begleitenden Untersuchungen Möglichkeiten der Aussteuerung von Reaktivität und Verarbeitbarkeit der RC-Bindemittel gezeigt werden. In den anschließenden Untersuchungen der aus Betonbrechsanden gewonnenen Recyclingbindemittel wurden die vorstehend für das Modellsystem „reiner Zementstein“ beschriebenen Sachverhalte hinsichtlich Verarbeitbarkeit, Festigkeit, und Festigkeitsentwicklung weitestgehend bestätigt, so dass hiermit die Formulierung marktgängiger Produkte mit Recyclingzementen aus Brechsanden möglich geworden ist.

Die Ermittlung der Umweltbilanz der Recyclingbindemittel war Gegenstand des zweiten Teils des Projektes. Zur Beurteilung der Ressourceneffizienz, des Energiebedarfs und der CO₂-Emissionen der neuen Recyclingbindemittel wurden die jeweiligen Kennwerte mit denjenigen konventioneller Zemente verglichen. Zu diesem Zweck wurden thermoanalytische Untersuchungen am Brechsand durchgeführt und der erforderliche thermische Energieeinsatz zur Aktivierung des Recyclingbindemittels unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades der Ofentechnik und Wärmerückgewinnung ermittelt. Zusammen mit den Ergebnissen aus den Betrachtungen zu den Rohstoff-bedingten CO₂-Emissionen und der Berechnung des Gesamtenergiebedarfs - bestehend thermischer und elektrischer Energie - wurden die zu erwartenden CO₂-Emissionen der neuen Technologie ermittelt und den Kennwerten konventioneller Zemente gegenübergestellt.

Ergebnisse und Diskussion

Ausweislich der Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Zusammensetzung und Struktur der RC-Bindemittel hat sich gezeigt, dass dem Grad der mechanischen Aufbereitung, der Mahlfineinheit, wie sie in Abhängigkeit von den gewählten Zerkleinerungsaggregaten und deren Betriebsweise zu erzielen ist, maßgebliche Bedeutung zukommt. Routinemäßig sind etwa zwei Drittel der 28 Tage-Festigkeit derjenigen von Prüfkörpern auf Normzementbasis gleichen Wasserzementwerts zu erreichen, bei entsprechend hohem Zerkleinerungsaufwand z.B. zur Darstellung des gleichen Feinheitsgrades konventioneller Normzemente, jedoch auch deutlich mehr. Die Festigkeitsentwicklung des RC-Zements entspricht trotz des Fehlens des für Normzemente maßgeblichen Tricalciumsilikatgehalts in ihrem zeitlichen Verlauf praktisch demjenigen von CEM I- oder CEM II-Zementen. Charakteristisch für RC-Zement ist die ausgeprägte Mikroporosität der einzelnen Partikel, die einen höheren Wasseranspruch gegenüber konventionellen Zementen bewirkt und somit höhere Wasserzementwerte zur Gewährleistung der Verarbeitbarkeit erforderlich macht. Dieses Phänomen begrenzt angesichts der bekannten Abhängigkeit der Druckfestigkeit von zementgebundenen Baustoffen von diesem bedeutsamen betontechnologischen Kennwert das generelle Festigkeitsniveau. Wie die Untersuchungen jedoch gezeigt haben, ermöglicht die Zugabe von verflüssigend wirkenden, am Markt eingeführten Zusatzmitteln, wie Betonverflüssigern (BV) oder Fließmitteln (FM), auch beim RC-Zement eine deutliche Absenkung des zur Verarbeitung erforderlichen w/z-Werts mit der Folge, dass das mit moderaten w/z-Werten verbundene Festigkeitsniveau zielsicher erreicht wird. Damit konnte der Nachweis erbracht werden, dass RC-Zement in zahlreichen Anwendungen als Ersatz für herkömmliche Zemente eingesetzt werden kann.

Im zweiten Teil der Untersuchungen an praxisentlehntem Betonbrechsand bestätigten die vorstehend für das Modellsystem „reiner Zementstein“ beschriebenen Sachverhalte, so dass die Formulierung marktgängiger Produkte mit Recyclingzementen aus Betonbrechsanden möglich geworden ist.

Mittels vergleichender Gegenüberstellung der Kennwerte zum Rohstoffbedarf sowie zur Energieeffizienz und CO₂-Emission von RC-Bindemitteln und konventionellen Zementen konnte gezeigt werden, dass sich die Recyclingtechnologie bzw. die neuen Bindemittel durch ihre äußerst positive Umweltbilanz auszeichnen. Durch den ausschließlichen Einsatz von Abfällen kann auf die Verwendung natürlicher Rohstoffe vollständig verzichtet werden. Darüber hinaus entfällt durch die bei moderaten Temperaturen thermisch initiierte Rückgewinnung der hydraulisch wirksamen Phasen im hydratisierten Zementstein die für die Zementherstellung zwingend erforderliche Kalzinierung des Kalksteins. Insbesondere der Verzicht auf die Kalzinierung bei gleichzeitig niedrigem Temperaturniveau der thermischen Aufbereitung des Abfalls führt zur massiven Reduzierung der CO₂-Emissionen, die lediglich noch ca. 30 % derjenigen konventioneller Zemente betragen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass mit dem vorgestellten Recycling von Betonabfällen eine neue, äußerst umweltfreundliche und insbesondere CO₂-arme Technologie zur Aufbereitung von zementgebundenen Abfällen entwickelt wurde. Die neuen Recyclingbindemittel zeichnen sich zudem sowohl durch gezielt steuerbare Verarbeitungseigenschaften sowie durch eine Festigkeitsentwicklung auf dem Niveau konventioneller Zemente aus, mithin können sie sowohl als hochwertige und umweltschonende Klinkerersatzstoffe als auch als Zementersatzstoffe verwendet werden. Die neue Technologie ist daher als wesentlicher Beitrag zur Dekarbonisierung der Zementindustrie durch die Herstellung alternativer Bindemittel für den nationalen und internationalen Klimaschutz zu bewerten.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Insgesamt stellt die neue Technologie des Upcyclings von Betonabfällen zu Recyclingzementen eine äußerst umweltfreundliche Alternative zur konventionellen Zementproduktion dar. Die ausgeprägten Vorteile der Ökobilanz und die gleichzeitig sowohl national als auch international stetig steigenden Anforderungen an den Umwelt- und insbesondere Klimaschutz lassen ein hohes Marktinteresse an der neuen Technologie erwarten. Es ist daher vorgesehen, die Ergebnisse mittels Publikationen in Fachzeitschriften und Beiträgen zu Kolloquien und Fachveranstaltungen insbesondere in den Bereichen Zement-/Baustoffproduktion sowie Recycling- und Verfahrenstechnik vorzustellen. Auf Grund der zentralen ökologischen und ökonomischen Bedeutungen der neuen Technologie als Beitrag für den internationalen Klimaschutz sind zudem übergeordnete Beiträge, z.B. im Wirtschafts- und/oder Forschungsteil einschlägiger Wirtschaftszeitungen und -magazinen, geplant, um das Upcycling auch einem breiteren Publikum vorzustellen. Darüber hinaus werden die Projektergebnisse zur Akquisition von institutionellen und strategischen Projektpartnern aus der Zement- und/oder Recyclingindustrie sowie der Verfahrenstechnik genutzt, um somit die Voraussetzungen für die nunmehr anstehende gemeinsame Markteinführung der Technologie umzusetzen und zu finanzieren.

Fazit

Mit dem vorliegenden Projekt ist es gelungen, dass Projekt zur Entwicklung einer völlig neuen Technologie zum Recycling von Beton- und Zementabfällen erfolgreich abzuschließen. Basierend auf der in ihren Grundzügen bereits entwickelten Verfahrenstechnik konnten zwingend erforderliche Werkstoffkenntnisse über die neuen Recyclingbindemittel erarbeitet werden, die die Markteinführung des Abfallrecyclings ermöglichen. Neben den anwendungstechnischen Eigenschaften wie Verarbeitbarkeit und Festigkeitsentwicklung konnten vor allem die massiven umwelttechnischen Vorteile der neuen Technologie gegenüber der konventionellen Zementproduktion dargestellt werden. Wegen der hohen und umweltfreundlichen Wertschöpfung des Abfalls wird die Technologie zukünftig mit der Bezeichnung „Upcycling für den Umweltschutz“ in den Markt eingeführt.

Inhaltsverzeichnis

Teil 1: Laboruntersuchungen zum Upcycling von Betonabfällen

1.	Projektbeschreibung	12
2.	Arbeitspakete	12
3.	Stand der Technik	13
3.1	Benchmarking: Produkte und Referenzwerte	13
3.2	Auswertung vorangegangener Versuchsprogramme	14
4.	Modellsysteme	17
4.1	Modellsystem Serie 1: RC-Zement auf Basis CEM I 52,5 N	17
4.1.1	Aufbereitung und Präparation	18
4.2	Modellsystem Serie 2: Betonbruch 0 – 16 mm	20
4.2.1	Aufbereitung und Präparation	20
5.	Serie 1: RC CEM	20
5.1	Bestimmung der elementarchemischen Zusammensetzung	20
5.2	Mahlfeinheit	21
5.3	Qualitative und quantitative Mikrostrukturanalysen	22
5.4	Thermogravimetrie	31
5.5	Bestimmung der Porengrößenverteilung	33
5.6	Prüfung der Anwendungseigenschaften	34
5.6.1	Prüfung des Erstarrungsverhaltens	34
5.6.2	Verarbeitungseigenschaften und Hydratationswärmeentwicklung	35
5.6.3	Festigkeitskennwerte und Festigkeitsentwicklung	36
6.	Serie 2: RC-BS	38
6.0	Vorbemerkung	38
6.1	Bestimmung der elementarchemischen Zusammensetzung	39
6.2	Qualitative und quantitative Mikrostrukturanalysen	39
6.3	Prüfung der Anwendungseigenschaften	40
6.3.1	Bindemittelbestimmung	40
6.3.2	Prüfung von Festigkeitskennwerten und Festigkeitsentwicklung	41
6.3.3	Bestimmung der Korngrößenverteilung und Fraktionierung	41
6.4	Untersuchungen zur Verbesserung der Anwendungseigenschaften	43
6.4.1	Bindemittelanreicherung mittels Kugelsiebung	43
6.4.2	Bindemittelanreicherung mittels autogenem Mahlverfahren	44
7.	Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse und Einordnung	46
8.	Literaturverzeichnis	48
	Anhang	49

Teil 2: Ökobilanz der Recyclingbaustoffe aus dem Upcycling von Betonabfällen

1.	Ausgangssituation, Zielsetzung und Aufgabenstellung	52
2.	Spezifikation der Materialien und Prozesstechnik	52
2.1	Ausgangsmaterial	52
2.2	Prozesstechnik	53
2.3	Endprodukte (RC-Baustoffe)	54
3.	Ressourcenschutz	54
3.1	Recyclingzement	54
3.2	Recyclinggesteinskörnungen	56
4.	Energieeffizienz	56
4.1	Thermischer Energiebedarf zur Herstellung von RC-CEM	56
4.2	Thermischer Energieeinsatz bei der Zementproduktion	59
4.3	Elektrischer Energiebedarf zur Herstellung von RC-CEM	60
4.4	Elektrischer Energiebedarf zur Herstellung von Zement	61
5.	CO ₂ -Emissionen	63
6.	Zusammenfassung	64
7.	Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabenergebnisse	65
	Literaturverzeichnis	66

Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Teil 1: Laboruntersuchungen zum Upcycling von Betonabfällen

<u>Abb. 4.1.1</u>	<i>XRD-Spektren des 3-stufigen Herstellungsverfahrens des Modellsystems</i>	17
<u>Abb. 4.1.1.1</u>	<i>Backenbrechermühle Retsch BB 100</i>	19
<u>Abb.4.1.1.2</u>	<i>Hochtemperaturofen von Nabertherm.</i>	19
<u>Abb.4.1.1.3</u>	<i>Scheibenschwingmühle RS von Retsch</i>	20
<u>Abb. 5.2.1</u>	<i>Gegenüberstellung der Partikelgrößenverteilung von Probe T1 (links) sowie T3.4 (rechts)</i>	22
<u>Abb. 5.3.1</u>	<i>Quantitativer Nachweis von Ternesit im RC-Zement bei erhöhter Umwandlungstemperatur (900°C; 3 h) mittels Rietveldanalyse</i>	27
<u>Abb.5.3.2</u>	<i>Röntgendiffraktogramme zu den Phasenumwandlungen bzw. –neubildungen im Temperaturbereich 700 bis 900</i>	27
<u>Abb. 5.3.3</u>	<i>Änderung der Phasenzusammensetzung in Abhängigkeit von der Temperatur im Bereich von 700 bis 900 °C quantitativ in Form eines gestapelten Balkendiagramms</i>	27
<u>Abb.5.3.4</u>	<i>Diagramm der Temperaturentwicklung in den ersten 8,5 h der Hydratation</i>	29
<u>Abb.5.3.5</u>	<i>XRD-Spektrum der Probe T3.4-a zur Darstellung der Mineralphase Reinhardbraunsit</i>	31
<u>Abb.5.4.1</u>	<i>Thermogramm (Thermogravimetrie, oben, zugehörige Differentialthermogravimetrie darunter) des hydratisierten Ausgangszementes CEM I 52,5 N; Heizrate: 10 K/ min; Haltetemperatur: 700 °C</i>	32
<u>Abb.5.4.2</u>	<i>Thermogramm (Thermogravimetrie, oben, zugehörige Differentialthermogravimetrie darunter) des hydratisierten Ausgangszementes CEM I 52,5 N; Heizrate: 10 K/ min; Haltetemperatur: 650 °C</i>	33
<u>Abb. 5.5.1</u>	<i>Kumuliertes Porenvolumen und Porenradienverteilung der Probe 3.4 RC-CEM</i>	33

<u>Abb.5.6.1</u>	<i>Die Rezyklatprobe T3.4-0 gelierte bereits während des Mischvorganges.</i>	35
<u>Abb.5.6.2</u>	<i>Der Zustand der Rezyklatprobe T3.4-M (Mischungsverhältnis 1:3:0,8)</i>	35
<u>Abb.5.6.3.1</u>	<i>Gegenüberstellung der Festigkeitsentwicklung der Referenzzemente sowie der Rezyklat-proben über den Prüfzeitraum von 28 Tagen.</i>	37
<u>Abb.6.3.3.1</u>	<i>Kornverteilungen der Brechsandfraktion 0-2 mm und des Pflasterfugenmörtels.</i>	42
<u>Abb.6.4.1.1</u>	<i>verwendete Analysensiebmaschine HAVER EML 200</i>	43
<u>Abb.6.4.2.1</u>	<i>Mahlgarnitur der SSM ohne mittig sitzende Mahlscheibe</i>	44
<u>Abb. 6.4.2.2</u>	<i>Gegenüberstellung der Partikelgrößenverteilung von Probe T51.1 (links) sowie T5.2 (rechts)</i>	44
<u>Abb. 6.4.2.3</u>	<i>Gegenüberstellung der Festigkeitsentwicklungskurven Serie 2</i>	45
<u>Tabelle 2.1</u>	<i>Arbeitsplanung und Meilensteine</i>	13
<u>Tabelle 3.1.1</u>	<i>Ergebnisse der Phasenanalysen an Referenzzementen und Benchmarkprodukten</i>	14
<u>Tabelle 3.2.1</u>	<i>Übersicht der Herstellungsparameter und Partikelgrößenverteilung</i>	15
<u>Tabelle 3.2.2</u>	<i>Zusammenstellung der Festigkeitskennwerte aus RC-Projekten</i>	15
<u>Tabelle 3.2.3</u>	<i>Ergebnisse der Phasenanalysen an Proben aus diversen Untersuchungsreihen</i>	16
<u>Tabelle 4.1.1</u>	<i>Ergebnisse der quantitativen Phasenanalyse für Modellsysteme RC-CEM 2.0</i>	18
<u>Tabelle 5.1.1</u>	<i>Elementarchemische Zusammensetzung von Ausgangszement CEM I 52,5 N sowie von Rezyklat RC-CEM und Referenzzement CEM II B/L 32,5 R</i>	21
<u>Tabelle 5.3.1</u>	<i>Geräteparameter der XRD-Messungen</i>	23
<u>Tabelle 5.3.2</u>	<i>XRD-Analyse zur Bestimmung des Einflusses von Lagerung/Konditionierung auf Phasenzusammensetzung</i>	24
<u>Tabelle 5.3.3</u>	<i>Phasenanalyse zur Bestimmung des Einflusses des Temperaturregimes der thermischen Behandlung auf die Phasenzusammensetzung</i>	25
<u>Tabelle 5.3.4:</u>	<i>Phasenanalyse zur Bestimmung des Einflusses des Temperatur- und Zeitregimes der thermischen Behandlung auf die Phasenzusammensetzung</i>	26
<u>Tabelle 5.3.5</u>	<i>XRD-Analyse zur Bestimmung des Einflusses der Mühlentechnik auf die Phasenzusammensetzung</i>	28
<u>Tabelle 5.3.6</u>	<i>Berechnung der Wärmekapazität C (Einwaagen normiert)</i>	29
<u>Tabelle 5.3.7</u>	<i>Ergebnisse der quantitativen Phasenanalyse für Modellsystem RC-CEM 52,5 N</i>	31
<u>Tabelle 5.6.1</u>	<i>Prüfung des Erstarrungsverhaltens in Anlehnung an DIN EN 196-3:2017-03</i>	34
<u>Tabelle 5.6.2.1</u>	<i>Berechnung der Wärmekapazität C (Einwaagen normiert)</i>	36
<u>Tabelle 5.6.3.1</u>	<i>Zusammenstellung der Festigkeitskennwerte Serie 1 im Vergleich zu Prüfwerten der Referenzzementen</i>	37
<u>Tabelle 6.1.1</u>	<i>Elementarchemische Zusammensetzung von Referenzprodukt PFM (Ref. 8.1) sowie von Rezyklat RC-BS</i>	39
<u>Tabelle 6.2.1</u>	<i>Quantitative Phasenzusammensetzung</i>	40
<u>Tabelle 6.3.1.1</u>	<i>Bestimmung Bindemittelgehalt Ref.8.1 Pflasterfugenmörtel</i>	41
<u>Tabelle 6.3.1.2</u>	<i>Bestimmung Bindemittelgehalt T5 BS</i>	41
<u>Tabelle 6.3.1.3</u>	<i>Bestimmung Bindemittelgehalt T5.1 RC-BS</i>	41
<u>Tabelle 6.3.2.1</u>	<i>Zusammenstellung der Festigkeitskennwerte Serie 2</i>	41
<u>Tabelle 6.3.3.1</u>	<i>Vergleich Siebdurchgänge T5.1 und Ref. 8.1</i>	42
<u>Tabelle 6.4.1.1</u>	<i>Positionierung der Mahlkugeln</i>	43
<u>Tabelle 6.4.1.2</u>	<i>Bindemittelanreicherung durch Kugelsiebung</i>	43
<u>Tabelle 6.4.1.3</u>	<i>Vergleich der Klinkerphasenanteile der Produkte RC-CEM und RC BE 2017 mit RC-BS < 0,125 mm</i>	43

<u>Tabelle 6.4.2.1</u>	<i>Bindemittelanreicherung durch autogenes Mahlen</i>	44
<u>Tabelle 6.4.2.3</u>	<i>Phasenanalysen zur Bestimmung der Bindemittelanreicherung nach Kugelsiebung sowie Autogenvermahlung mittels SSM (Serie 2)</i>	46
<u>Tabelle Anhang 1</u>	<i>Übersicht Probenbezeichnung und Versuchsschema</i>	49
<u>Tabelle Anhang 2</u>	<i>Ergebnisse der Korrelationsanalysen zum Einfluss der Mühlentechnik</i>	51
Teil 2:	Ökobilanz der Recyclingbaustoffe aus dem Upcycling von Betonabfällen	
<u>Abb. 1</u>	<i>Spezifikation des Brechsands [BT17-2]</i>	53
<u>Abb. 2</u>	<i>Prozessschritte zum Upcycling von Brechsanden (Einphasenverfahren)</i>	53
<u>Abb. 3</u>	<i>Spezifikation der RC-Baustoffe aus dem Upcycling des Brechsands</i>	54
<u>Abb. 4</u>	<i>Bedarf an natürlichen Rohstoffen (Primärrohstoffe) bei der Herstellung von Zement (CEM) und Recyclingzement (RC-CEM)</i>	55
<u>Abb. 5</u>	<i>Thermogramm (TG und DSC) zur Bestimmung der erforderlichen Trocknungsenergie und Reaktionsenthalpien des Brechsands</i>	57
<u>Abb. 6</u>	<i>Thermogramm zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität c_p des Brechsands</i>	57
<u>Abb. 7</u>	<i>thermischer Energieaufwand zur Herstellung von Zementen und Recyclingzementen</i>	60
<u>Abb. 8</u>	<i>elektrischer Energieaufwand zur Herstellung von Zementen und Recyclingzementen</i>	62
<u>Abb. 9</u>	<i>Gesamtenergiebedarf der Zemente und Recyclingzemente</i>	63
<u>Abb. 10</u>	<i>CO₂-Emissionen der Recyclingzemente bezogen auf die Emissionen der Zementproduktion</i>	64
<u>Abb. 11</u>	<i>Umweltentlastungspotential der Zementproduktion durch die Herstellung von Recyclingzementen</i>	65
<u>Tabelle 1</u>	<i>Einsparung von Primärrohstoffen der Zementproduktion durch Verwendung von Recyclingzement</i>	56
<u>Tabelle 2</u>	<i>Ermittlung des thermischen Energiebedarfs zum Upcycling von Brechsand bzw. Betonabfall</i>	59
<u>Tabelle 3</u>	<i>Ermittlung des elektrischen Energiebedarfs zum Upcycling von Brechsand bzw. Betonabfall</i>	61
<u>Tabelle 4</u>	<i>CO₂-Emissionen bei der Zementproduktion und beim Upcycling</i>	64

Verzeichnis von Begriffen und Abkürzungen

Teil 1: Laboruntersuchungen zum Upcycling von Betonabfällen

<i>RC-Zement, RC-CEM</i>	<i>Mittels Recyclingverfahren zurückgewonnene hydraulische Bindemittel</i>
<i>RC-BS</i>	<i>Rezyklierter Betonbrechsand</i>
<i>RC-BS beh.</i>	<i>Rezyklierter Betonbrechsand, thermisch behandelt</i>
<i>HD-FM</i>	<i>Produkt für das Hochdruckdüsenstrahlinjektionsverfahren</i>
<i>PFM</i>	<i>Pflasterfügenmörtel</i>
<i>C3S</i>	<i>Tricalciumsilikat $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$</i>
<i>C2S</i>	<i>Dicalciumsilikat $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$</i>
<i>C3A</i>	<i>Tricalciumaluminat $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$</i>
<i>C4AF</i>	<i>Tetracalciumaluminatferrit $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$</i>
<i>AZ-REC</i>	<i>Untersuchungen zum Recycling von Asbestzement</i>
<i>RC-Zement I</i>	<i>Projekt zur Aufbereitung von Betonabfällen</i>
<i>RC BE 2017</i>	<i>Bachelorarbeit zum Selektiven Mahlen zwecks Bindemittelrückgewinnung</i>

Teil 2: Ökobilanz der Recyclingbaustoffe aus dem Upcycling von Betonabfällen

<i>BMG</i>	<i>Bindemittelgehalt</i>
<i>c_p</i>	<i>spezifische Wärmekapazität</i>
<i>RC-Baustoffe</i>	<i>Recyclingzemente und Recyclinggesteinskörnungen aus dem Upcycling</i>
<i>RC-CEM</i>	<i>Recyclingzement aus dem Upcycling</i>
<i>RC-CEM ex BA</i>	<i>Recyclingzement aus dem Upcycling von Betonabfällen</i>
<i>RC-CEM ex BS</i>	<i>Recyclingzement aus dem Upcycling von Brechsanden</i>
<i>RC-GSK</i>	<i>Recyclinggesteinskörnungen aus dem Upcycling</i>
<i>RC-GSK (fein)</i>	<i>RC-Gesteinskörnungen mit Größtkorn 2 mm</i>
<i>RC-GSK (grob)</i>	<i>RC-Gesteinskörnungen mit Größtkorn 8 mm</i>
<i>Upcycling</i>	<i>Herstellung von Recyclingzementen und Recyclinggesteinskörnungen aus Abfällen</i>
<i>V-CEM</i>	<i>Vergleichszement mit reduziertem Klinkergehalt</i>
<i>η</i>	<i>Wirkungsgrad</i>

Erarbeitung werkstofftechnischer Kenntnisse zur Struktur neuer Recycling(RC-)zemente und labormaßstäbliche Entwicklung umweltfreundlicher RC-Bauprodukten für Einsatzbereiche im Hoch- und Tiefbau

Zusammenfassung

Teil 1: Laboruntersuchungen zum Upcycling von Betonabfällen

Im Rahmen dieses Projekts wurden im ersten Teil des laborexperimentellen Versuchsprogramms Untersuchungen zu den Charakteristiken von Recyclingbindemitteln aus Zementstein als Modell der Bindephase von (Alt-)Betonen durchgeführt sowie Maßnahmen zur Anpassung dieser an die Erfordernisse der praktischen Anwendung im Bauwesen. Hierbei fanden auch die Untersuchungsergebnisse früherer eigener Versuchsreihen Beachtung. Die Untersuchungen wurden vergleichend mit normgemäßen, marktüblichen Zementen vorgenommen.

Dabei hat sich gezeigt, dass dem Grad der mechanischen Aufbereitung, der Mahlfineinheit, wie sie in Abhängigkeit von den gewählten Zerkleinerungsaggregaten und deren Betriebsweise zu erzielen ist, maßgebliche Bedeutung zukommt. Routinemäßig sind etwa zwei Drittel der 28 Tage-Festigkeit derjenigen von Prüfkörpern auf Normzementbasis gleichen Wasserzementwerts zu erreichen, bei entsprechend hohem Zerkleinerungsaufwand z.B. zur Darstellung des gleichen Feinheitsgrades konventioneller Normzemente jedoch auch deutlich mehr. Die Festigkeitsentwicklung des RC-Zements entspricht trotz des Fehlens des für Normzemente maßgeblichen Tricalciumsilikatgehalts in ihrem zeitlichen Verlauf praktisch demjenigen von CEM I- oder CEM II-Zementen.

Charakteristisch für RC-Zement ist die ausgeprägte Mikroporosität der einzelnen Partikel, die einen höheren Wasseranspruch gegenüber konventionellen Zementen bewirkt und somit höhere Wasserzementwerte zur Gewährleistung der Verarbeitbarkeit erforderlich macht. Dieses Phänomen begrenzt angesichts der bekannten Abhängigkeit der Druckfestigkeit von zementgebundenen Baustoffen von diesem bedeutsamen betontechnologischen Kennwert das generelle Festigkeitsniveau. Wie die Untersuchungen jedoch gezeigt haben, ermöglicht die Zugabe von verflüssigend wirkenden, am Markt eingeführten Zusatzmitteln, wie Betonverflüssigern (BV) oder Fließmitteln (FM), auch beim RC-Zement eine deutliche Absenkung des zur Verarbeitung erforderlichen w/z-Werts mit der Folge, dass das mit moderaten w/z-Werten verbundene Festigkeitsniveau zielsicher erreicht wird. Damit konnte der Nachweis erbracht werden, dass RC-Zement als signifikant nachhaltigeres hydraulisches Bindemittel, als es die eingeführten Normzemente auf Portlandzementklinkerbasis sind, in zahlreichen Anwendungen als Ersatz für herkömmliche Zemente eingesetzt werden kann.

Im zweiten Teil der Untersuchungen wurde ein praxisentlehnter Betonbrechsand aus dem Rückbau von Spannbetonschwellen als Verfahrensinput der Gewinnung eines Recyclingbindemittels genutzt, das verfahrensbedingt neben hydraulisch aktiven auch maßgeblich inerte Bestandteilen aus der ursprünglichen Gesteinskörnung (Zuschlag) enthielt. Dabei wurden diverse Anreicherungstechniken zur Erhöhung des hydraulisch aktiven Anteils angewendet. Mit einem Anstieg des Gehalts an hydraulischen Phasen auf 35 % erwies sich dabei insbesondere eine Kugelsiebung zur Trennung der Bindemittelphasen von den Zuschlagbestandteilen als geeignet. Die vorstehend für das Modellsystem „reiner Zementstein“ beschriebenen Sachverhalte hinsichtlich Verarbeitbarkeit, Festigkeit, und Festigkeitsentwicklung haben sich dabei weitestgehend bestätigt, so dass hiermit die Formulierung marktgängiger Produkte mit Recyclingzementen aus Brechsanden möglich geworden ist.

Teil 2: Ökobilanz der Recyclingbaustoffe aus dem Upcycling von Betonabfällen

Die Ökobilanz des Upcyclings von Betonabfällen zur Herstellung von Recyclingzementen und Recyclinggesteinskörnungen zeichnet sich - bezogen auf die Umweltdaten der Zementproduktion - hinsichtlich des Schutzes natürlicher Rohstoffressourcen, des Energieeinsatzes sowie der CO₂-Emissionen durch Vorteile aus. Ist die Produktion von Zementen mit 1,26 t Primärrohstoffen je Tonne Zement als besondere Rohstoff-intensiv zu bewerten, werden Recyclingzemente dagegen ausschließlich aus Betonabfällen hergestellt und erlauben somit die Schonung der sich zunehmend verknappenden natürlichen Rohstoffressourcen. Aufgrund des völlig neuen Ansatzes zur Darstellung hydraulisch erhärtenden Recyclingbindemittels durch die Rückgewinnung der hydraulisch wirksamen Phasen im bindemittelhaltigen Zementstein im Niedrigtemperaturbereich ist der Energieaufwand zur thermischen Behandlung des Abfalls deutlich geringer als bei der Klinkerherstellung zur Produktion konventioneller Zemente. Zudem entfallen die

massiven rohstoffbedingten CO₂-Emissionen infolge der Calcinierung des natürlichen Rohstoffs bei der konventionellen Zementproduktion. Durch die Reduzierung der Rohstoff- und Energie-bedingten CO₂-Emissionen um ca. 70 % können im Falle alle der Aufbereitung des gesamten Betonabfalls allein in Deutschland jährlich ca. 6,6 Mio. t Recyclingzement hergestellt und die CO₂-Emissionen um 2,6 Mio. t CO₂/a reduziert werden. Das Reduktionspotential der neuen Technologie beträgt somit ca. 13,5 % der CO₂-Emissionen der deutschen Zementproduktion.

Erarbeitung werkstofftechnischer Kenntnisse zur Struktur neuer Recycling(RC-)zemente und labormaßstäbliche Entwicklung umweltfreundlicher RC-Bauprodukten für Einsatzbereiche im Hoch- und Tiefbau

Teil 1: Laboruntersuchungen zum Upcycling von Betonabfällen

1. Projektbeschreibung

In der Bau- und Recyclingpraxis wird Beton aus Rückbaumaßnahmen oder Restmassen dem Stand der Technik entsprechend durch Brechen und Sieben aufbereitet und der so gewonnene Betonbruch – oftmals als RC-Körnung, RC-Zuschlag oder Betonsplitt bzw. -granulat bezeichnet – überwiegend für untergeordnete Anwendungen, z.B. als Schottersatz im Tiefbau, eingesetzt. Darüber hinaus wird ein nur geringer Teil dieses Materials als Ersatz natürlicher Gesteinskörnungen für Baumaßnahmen im Hochbau verwendet. Allerdings sind hier die Anwendungsbereiche des gebrochenen Materials auf Grund der typischen Eigenschaften der RC-Körnung eng begrenzt [DAf10]. Das Ausschöpfen des technischen und wirtschaftlichen Potentials von Altbeton als neue Rohstoffquelle für innovative Recyclingbaustoffe (RC-Baustoffe) bleibt bei diesem Downcycling ebenso ungenutzt wie das hohe Umweltentlastungspotential der neuen Recyclingtechnik mit Blick auf Energieeffizienz und CO₂-Einsparung.

Im Zuge des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Förderprogramms „KMU-innovativ“ geförderten F&E-Verbundprojektes „RC-Zement - Herstellung von neuen Zementen aus Abbruchbeton Recyclingzement (RC-Zement)“, Az: 033RK015, wurde eine Prozesstechnik zum Upcycling von Betonrestmassen entwickelt, welche die Herstellung von hochwertigen Recyclingbaustoffen (RC-Baustoffen) aus Abbruchbeton erlaubt. Somit kann das bisher übliche Downcycling des Abbruchbetons durch ein sowohl ökologisch als auch ökonomisch attraktives Upcycling im Sinne der wirtschaftlichen Abfallverwertung gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz [Kre20] ersetzt werden. Diese neue, über den bisherigen Stand der Technik hinausgehende Technologie folgt primär dem Ansatz der gezielten Schwächung der festigkeitsbestimmenden Verbundzone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung und der anschließenden Zerlegung des Altbetons in seine Bestandteile Bindemittel und Gesteinskörnung. Dabei kann sowohl der oben beschriebene Brechsand als auch der gesamte Altbeton als Verfahrensinput verwendet werden.

Erste Anwendungsmöglichkeiten des neuen Recyclingbindemittels als ggf. vollständiger oder teilweiser Zementersatz bei der Herstellung von Betonwaren wurden bereits erfolgreich nachgewiesen. Es hatte sich jedoch gezeigt, dass insbesondere die ausgeprägte Reaktivität des Recyclingzements weiterer Materialuntersuchungen und abgestimmter Pilotentwicklungen bedurfte, bevor der angestrebte Schritt in die breite Vermarktung der neuen Technologie und Recyclingbaustoffe definitiv getätigt werden kann.

2. Arbeitspakete

Gegenstand des vorliegenden Berichts ist die abschließende Darstellung der im Rahmen des Forschungsvorhabens gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse. Die Bewilligung des Verbundprojektes erfolgte gemäß dem Datum des Zuwendungsbescheids vom 19.12.2018. Aus hochschulorganisatorischen Gründen datiert der operative Beginn der Projektarbeiten mit der Aufnahme der Projektaktivitäten durch Frau Dr.-Ing. Agata Wygocka-Domagala im Januar 2019. Frau M.Eng. Doreen Dwars übernahm mit dem 01.06.2019 die Aufgaben der Vorgenannten und bearbeitete das Forschungsvorhaben bis zum Projektende. Für die Arbeitspakete der Hochschule Wismar ergibt sich demnach eine zeitliche Verzögerung von knapp 4 Monaten gegenüber dem nachstehenden ursprünglichen Arbeitsplan. Der inhaltliche Projektablauf als solcher blieb davon unberührt. Im Zuge einer kostenneutralen Laufzeitverlängerung endete das Projekt mit dem 31.08.2020.

Tabelle 2.1: Arbeitsplanung und Meilensteine

Abchnitt	Abchnitt 1			Abchnitt 2				Abchnitt 3				Abchnitt 4			Abchnitt 5			Nachprojektphase	
	Vorarbeiten			Herstellung und Spezifikationen der Ausgangs- und Zwischenmaterialien, Entwicklung von Lösungsansätzen				Entwicklung und Herstellung von optimierten RC-Zementen				Produktentwicklungen und Eignungsnachweise für RC-Zemente für ausgewählte Anwendungen im Bauwesen			Projektabschluss				
Projektmonat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	> 18 Monate
Arbeitspakete	1			2				3				4			5			-	
Inhalt	1. Projektmeeting (kick-off-meeting), Vorbereitung Labor, Herstellung der Prüfkörper aus konventionellen Zementen und Feinzuschlägen			Konditionierung und Aufbereitung der Prüfkörper zur Herstellung von Rezyklaten, analytische Untersuchungen zur Dokumentation der Eigenschaften der Ausgangsmaterialien und Zwischenprodukte, Entwicklung von Lösungsansätzen zur Aussteuerung von RC-Zementen				Themische Behandlung und mech. Aufbereitung des Rezyklats zur Herstellung von Recyclingzementen, Formulierung von Recyclingzementen mit optimierten Verarbeitungseigenschaften				Spezifikation und Eignungsnachweise von Recyclingzementen für Anwendungen in Wasser-Zement-Gemischen im Hoch- und Tiefbau			Nacharbeiten zur Vervollständigung, zusammenfassende Bewertung und Dokumentation der Projektergebnisse, Abschlussbericht,			Markteinführung der RC-Zemente und RC-Gesetzinschränkungen für ausgewählte Anwendung im Bauwesen	
Meilensteine	1. Bereitstellung von Ausgangsmaterialien und erprobten Laboreinrichtungen			2. Spezifikation des Ausgangsmaterials und Entwicklung von Ansätzen zur Materialoptimierung				3. Bereitstellung von RC-Zementen mit optimierten Verarbeitungseigenschaften				4. Spezifikation von RC-Zementen für Anwendungen in Wasser-Zement-Gemischen im Bauwesen			5. Abschlussbericht				
Beteiligte	BAU+TEC / Hochschule Wismar																		
Projektphase				Entwicklung von Lösungsansätzen				Herstellung optimierter RC-Zemente				Produktentwicklungen und Eignungsnachweise			Projektabschluss			Nachprojektphase	
	Monat	Okt. 18		Dez. 18	Jan. 19			Apr. 19	Mal. 19			Aug. 19	Sep. 19			Dez. 19	Jan. 20		
Jahr	2018			2019												2020			ab Mai 2020

3. Stand der Technik

3.1 Benchmarking: Produkte und Referenzwerte

Als Referenzzement und Ausgangsprodukt für die Herstellung des Rezyklats „RC-Zement“ (kurz: „RC-CEM“) als Modell für die in Beton als Bindemittel fungierenden Zemente wurde ein handelsüblicher Portlandzement CEM I der Festigkeitsklasse 52,5 N gewählt. Zemente unterschiedlicher Festigkeitsklasse aber gleicher Provenienz unterscheiden sich typischerweise nicht in ihrer stofflichen Zusammensetzung sondern allein in der Mahlfineheit; Zemente höherer Festigkeitsklasse werden feiner aufgemahlen. Portlandzemente sind unter der aktuellen europäischen Normbezeichnung CEM I seit 1878 in Deutschland genormt und enthalten als Hauptbestandteil ausschließlich Portlandzementklinker. Darüber hinaus darf dieser Zement, wie auch die anderen Normzemente, gemäß DIN EN 197 höchstens 5 M.-% Nebenbestandteile enthalten [DIN11].

Portlandkalksteinzement (CEM II-L oder -LL) ist ein Portlandkompositzement, der neben Portlandzementklinker als weiteren Hauptbestandteil gemahlene Kalkstein, Kurzzeichen L für englisch „Lime“, enthält. Die Massenanteile an Kalkstein dürfen dabei gemäß der vorstehend genannten Norm zwischen 6 und 20 % (Kurzzeichen A) bzw. 21 und 35 % (Kurzzeichen B) betragen [DIN11].

Das zu gewinnende Rezyklat soll vorrangig als Zementersatzstoff in Wasser-Bindemittel-Gemischen, beispielsweise zur Herstellung von Spezialbaustoffen im Tiefbau (Verfüllmassen, Injektionsbindemittel etc.) sowie im Hochbau (Mörtel, Putze etc.) eingesetzt werden. Als Referenzprodukte (Benchmarkprodukte) wurden folgende handelsüblichen Erzeugnisse gewählt:

Fertigmischung für das Hochdruck-Düsenstrahlverfahren („HD-FM“)

Ein derartiges Produkt empfiehlt sich für das Injizieren von Suspensionen im Boden bei hohen Anforderungen an die Endfestigkeit, z. B. bei tiefliegenden Dichtsohlen.

Hydraulisch abbindender Füllstoff („Füller“)

Dieser ist als mineralisches Fertigprodukt für den Einsatz im Spezialtiefbau zum Verfüllen, Abdichten und Verfestigen von Hohlräumen, Bohrlöchern sowie Rohrgäben, etc. spezifiziert [?].

Die Verwendungsmöglichkeit des nachfolgend als RC-BS bezeichneten Rezyklats im Garten- und Landschaftsbau, z.B. als Pflasterfugenmörtel, ist durch Benchmarking mit folgendem Produkt eruiert worden:

Fugenmörtel für Pflasterungen („PFM“)

Der ausgewählte nicht drainfähige Zementmörtel kann zum Verfugen von Pflastersteinen und Platten aus Natur- und Betonwerkstein eingesetzt werden.

Die Vorstellung der Ergebnisse aus den umfassenden Laborprüfungen und –analysen an den o.g. Benchmarkprodukten erfolgt im Weiteren jeweils im Kontext mit den zugehörigen Rezyklatproben. Referenzmaterialien der (Versuchs-) **Serie 1: RC-CEM** sind die Normzemente CEM I 52,5 N (T1) und CEM II/B-L 32,5R (Ref. 5) sowie die vorstehend angesprochenen Spezialbaustoffe *Fertigmischung für das Hochdruck-Düsenstrahlverfahren* (Ref. 6) und *hydraulisch abbinder Füllstoff* (Ref. 7). Der *Fugenmörtel für Pflasterungen* (Ref.8) wurde als Benchmarkprodukt der **Serie 2 RC-BS** gewählt.

Tabelle 3.1.1 listet die ermittelten, als relevant angesehenen charakteristischen Merkmale des Ausgangszements CEM I 52,5 N sowie der Referenz- bzw. Benchmarkergebnisse auf. Auf die Untersuchungsmethodiken wird in Abschnitt 5 eingegangen.

	T1	CEM I 52,5 N	Ref.5	Ref.6	Ref.7	Ref.8.1
	CEM I 52,5 N	Herstellerangaben	CEM II B/L 32,5 R	HDFM	Füller	PFM 0-2 mm
spez. Oberfläche [cm ² /g]	11181,670	—	11247,000	35.698,00	32.137,00	—
d10 [µm]	0,830	—	2,276	n.b.	n.b.	—
d50 [µm]	8,510	—	8,762	9,480	8,536	—
d90 [µm]	27,560	—	22,775	29,108	53,556	—
Rwp	4,99	—	5,11	6,56	6,476	8,438
ΣZuschlag [M-%]	1,31	0,90	2,77	0,94	10,05	39,79
ΣC3S [M-%]	56,48	54,20	57,02	58,21	13,54	9,84
Σβ-C2S [M-%]	19,98	21,40	11,38	11,69	4,67	4,14
Σα'-C2S [M-%]	0,52	0,00	2,05	3,24	1,04	0,09
α'-/β-C2S	0,03	0,00	0,18	0,28	0,22	0,02
ΣC3A [M-%]	0,87	1,00	1,43	1,16	0,32	0,25
ΣC4AF [M-%]	10,33	12,20	8,39	6,51	1,95	1,33
ΣAluminate [M-%]	11,20	13,20	9,82	7,68	2,27	1,58
ΣKlinkerphasen [M-%]	88,18	88,80	80,27	80,81	21,52	15,64
CaCO ₃ [M-%]	4,33	3,70	13,95	13,80	64,08	24,61
ΣCa(OH) ₂ [M-%]	1,53	0,00	0,39	0,23	2,48	3,79
CaO [M-%]	0,01	1,10	0,36	0,28	0,02	0,13
ΣSulfatträger [M-%]	4,00	4,50	1,85	2,92	1,86	1,09
ΣNebenphasen [M-%]	0,94	0,60	0,42	1,03	2,84	0,35
Σkristallin (ΣkPh) [M-%]	100,30	99,60	100,00	99,99	102,84	100,35
amorpher Anteil (aPh) [M-%]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
aPh/ΣkPh						

3.2 Serie 3: Auswertung vorangegangener Versuchsprogramme

Die Entwicklung neuartiger, hydraulischer Bindemittel auf Basis von Baurestmassen, primär Betone aus Rückbaumaßnahmen, stellt einen Forschungsschwerpunkt der Arbeitsgruppe des Projektleiters dar. So wurden in den vergangenen 6 Jahren zwei Forschungsprojekte sowie u.a. eine Bachelorarbeit zu besagter Thematik abgeschlossen. Dabei wurden Möglichkeiten eruiert, inwieweit die entwickelte Recyclingtechnologie auch auf weitere hydraulisch gebundene Baustoffe übertragbar ist.

Die vorhandene Datenlage eigener Untersuchungsreihen zum Thema „Mineralische Recyclingbaustoffe“ wurde für dieses Forschungsvorhaben gesichtet, zusammengestellt und ausgewertet. Diese Zusammenfassung und Gegenüberstellung der Kenn- und Prüfwerte der jeweils leistungsstärksten Probematerialien bildet die Basis für eine interne Datenbank. Nachstehend findet sich unter den angegebenen Kurzbezeichnungen eine Zusammenstellung früherer Untersuchungsreihen des Fachgebiets Baustofftechnologie und Bauphysik.

AZ-Rec

Zielstellung war die Produktion eines neuen Recycling-Bindemittels (RC-Bindemittel) für die Geotechnik aus dem umweltgefährdenden Abfallstoff Asbestzement bei gleichzeitiger Umwandlung der Asbestfasern in gesundheitlich unbedenkliche, nichtfaserförmige Stoffe.

RC-Zement I

Projektgegenstand war die Entwicklung einer Prozesstechnik zur Aufbereitung von Betonabfällen, die die Herstellung von hochwertigen Recyclingbaustoffen (RC-Baustoffen) aus Abbruchbeton erlaubt.

RC BE 2017

Gegenstand dieser Bachelorarbeit waren laborexperimentelle Untersuchungen zur Rückgewinnung des Bindemittels und der Gesteinskörnung aus einem Betonbrechsand durch „selektives Mahlen“.

Tabelle 3.2.1 dokumentiert exemplarisch anhand definierter Proben die entscheidenden Parameter Temperatur und Zeitdauer der thermischen Behandlung zur Umwandlung der hydratisierten Bindemittelbestandteile des jeweiligen Aufgabeguts in hydraulisch erneut aktive Baustoffe sowie deren Partikelgrößenverteilung.

Tabelle 3.2.1: Übersicht der Herstellungsparameter und Partikelgrößenverteilung

Serie 3		Thermische Behandlung		Mühlentechnik				Partikelgrößenverteilung			
		Temperatur	Dauer	Mühlentyp	Mahldauer	Bemerkung	Mahlhilfsmittel	spez. OF	d50	d90	d _m
Projekt	Code	[°C]	[min]		[min]			[cm ² /cm ³]	[µm]	[µm]	[µm]
FaserZementRC	T6.1	700	120	SSM	6	1400 U/min		17984,0	22,562	101,00	33,872
FaserZementRC	T6.2	700	120	ESM	180	Vormahlung: 5 min; Stangen	Kugeln	35842,0	5,747	15,65	6,31
FaserZementRC	T6.3	700	120					n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
RC CEM	T6.4	700	90	RWM	—	Vorsiebung	Kugeln	11766,0	10,704	23,02	11,345
RC BE 2017	T6.5	700	90	RWM	10	400 U/min	Kugeln	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Tabelle 3.2.2 listet eine Reihe relevanter, an ausgewählten Proben ermittelter Baustoffkennwerte aus besagten Untersuchungsreihen auf. Dies sind neben der zugehörigen Rohdichte der Proben die zu definierten Zeitpunkten ermittelten Druckfestigkeitsmesswerte, welche die Festigkeitsentwicklung wiedergeben, wobei der 28 Tage-Wert üblicherweise kennzeichnend für die Baustoffkenngröße Druckfestigkeit ist.

Tabelle 3.2.2: Zusammenstellung der Festigkeitskennwerte aus div. RC-Projekten

Serie 3		Festigkeitbestimmung in Anlehnung an DIN EN 196-1									
		$\rho_{\phi 28d}$	w/z	δ_{2d}	δ_{7d}	δ_{14d}	δ_{28d}	δ_{2d}/δ_{28d}		δ_{28d} -analytisch	
Material	Bez.	[g/cm ³]			[N/mm ²]				r-Wert	Bewertung	s-Wert
Faserzement (700°C/120min)	T6.1	n.b.	0,8	0,63	0,85	3,03	7,20	0,09	sehr langsam	2,09	
Faserzement (700°C/120min)	T6.2	2,084	0,8	10,68	21,47	23,82	25,2	0,42	mittel	0,29	> 32,5N
Faserzement (700°C/120min)	T6.3	2,055	0,8	5,56	12,25	15,52	18,57	0,30	mittel	0,43	> 32,5N
RC-Zement 1 (700°C/90 min)	T6.4	1,86	1,2	2,1	4,78	7,31	9,56	0,22	mittel	0,62	>> 32,5N

Zur weiteren Charakterisierung und Klassifizierung der Festigkeitsentwicklung anhand von Einzahlkennwerten dienen die in Tabelle 3.2.2 neben den zeitabhängigen Druckfestigkeitsmesswerten aufgeführten Werte der beiden Parameter „r-Wert“ und „s-Wert“. Bei beiden handelt es sich um in der Betontechnologie eingeführte Größen. Während r speziell die Frühfestigkeit von Beton anhand des Verhältnisses der 2-Tage-Festigkeit zur 28-Tage-Festigkeit erfasst und diesbezügliche Vergleiche zwischen diversen Zementen erlaubt, gibt s den Wert der baustoffcharakterisierenden Konstante in dem nachstehenden bekannten analytischen Ansatz zur Beschreibung des Festigkeitsverlaufs von Betonen in Abhängigkeit der 28-Tage-Festigkeit wieder:

Einteilung der Betone gemäß ihrer Festigkeitsentwicklung nach DIN 1045-3 Tabelle 5.NA

Maßgeblich ist dabei das Verhältnis der 2-Tage-Druckfestigkeit zur 28-Tage-Druckfestigkeit.

$r = f_{cm2} / f_{cm28}$	schnell	mittel	langsam	sehr langsam
	r = 0,50	r = 0,30	r = 0,15	r < 0,15

Berechnung der Festigkeitsentwicklung gemäß analytischem Ansatz:

$$f_{cm}(t) = f_{cm}(28) \cdot \exp(s \cdot (1 - \sqrt{28/t}))$$

t in [d]

s = 0,38 für 32,5 N

s = 0,25 für 32,5 R; 42,5 N

s = 0,20 für 42,5 R; 52,5 N; 52,5 R

Ergänzend gibt Tabelle 3.2.3 die Kennwerte der lasergranulometrischen Analysen der Rezyklate aus diversen Untersuchungsreihen sowie die Phasengehalte aus den zugehörigen quantitativen Phasenanalysen mittels Rietveldmethode wieder. Die Analyseverfahren werden in Abschnitt 5 näher erläutert.

Tabelle 3.2.3: Ergebnisse der Phasenanalysen aus diversen Untersuchungsreihen

Serie 3	T6.1	T6.2	T6.4.1	T6.5
	Faser-Zement RC	Faser-Zement RC	RC CEM 1.0	RC BE 2017
spez. Oberfläche [cm ² /g]	17984,00	35842,00	11766,00	n.b.
d50 [µm]	22,56	5,75	10,70	n.b.
d90 [µm]	101,00	15,65	23,02	n.b.
Rwp	7,26	6,612	7,841	6,61
ΣZuschlag [M-%]	0,27	0,01	42,85	40,14
ΣC3S [M-%]	0,00	0,00	0,00	0,00
Σβ-C2S [M-%]	14,96	9,44	2,74	2,42
Σα'-C2S [M-%]	28,80	14,55	5,12	12,44
α'-/β-C2S	1,93	1,54	0,53	5,13
ΣC3A [M-%]	4,77	5,58	0,54	3,14
ΣC4AF [M-%]	9,57	4,73	1,61	1,51
ΣAluminate [M-%]	14,33	10,31	2,15	4,65
ΣKlinkerphasen [M-%]	58,09	34,29	10,01	19,50
CaCO ₃ [M-%]	5,89	12,74	0,12	0,55
ΣCa(OH) ₂ [M-%]	1,37	4,24	0,00	0,00
CaO [M-%]	0,13	0,00	0,42	1,51
ΣSulfatträger [M-%]	1,53	2,34	0,00	0,70
ΣNebenphasen [M-%]	0,28	1,84	0,71	0,62
Σkristallin (ΣkPh) [M-%]	67,56	55,47	54,11	63,02
amorpher Anteil (aPh) [M-%]	32,42	44,53	45,89	36,98
aPh/ΣkPh	0,48	0,80	0,85	0,59

4. Modellsysteme

4.1 Modellsystem Serie 1: RC-Zement auf Basis CEM I 52,5 N

Gegenstand der Untersuchungsreihe Serie 1 ist ein reines Zementsteinsystem auf Basis von Portlandzement CEM I der Festigkeitsklasse 52,5 N. Die Festigkeitsklasse 52,5 wurde mit Blick auf den gewünschten hohen Hydratationsgrad des Modellsystems gewählt, wie er für Jahrzehnte alte Betone kennzeichnend ist. Bekanntlich beruht die Benennung der Zementfestigkeitsklasse auf dem Wert der Druckfestigkeit von Prüfkörpern, der 28 Tage nach deren Herstellung ermittelt und normgemäß als festigkeitskennzeichnend betrachtet werden. Erfahrungsgemäß weisen Zemente niedrigerer Festigkeitsklasse ein höheres Nacherhärtungspotenzial als höherfeste auf, so dass sich die Druckfestigkeitsunterschiede in der Praxis im Laufe der Zeit angleichen. Als Modellsystem wurde reiner Zementstein anstelle eines Bindemittelrezyklats gewählt, welches durchweg mehr oder weniger große Anteile an Inertstoffen enthält, um präzise Aussagen zu Phasenumwandlungen, Festigkeitsentwicklung und Hydratationsverhalten treffen zu können, ohne den Einfluss von Bestandteilen eines Betonzuschlags wie Quarzsand, Feldspäte, Glimmer etc. berücksichtigen zu müssen.

Die nachstehende Abbildung 4.1.1 zeigt in Form einer XRD-Diagrammüberlagerung dreier Spektren jeweils das Röntgenbeugungsdiagramm des beschriebenen Ausgangszements, des hieraus erzeugten Hydratationsprodukts Zementstein als stoffliche Basis des hieraus zu gewinnenden Bindemittelrezyklats und exemplarisch eines aus diesem Zementstein erstellten Recyclingzements, abgekürzt hier auch als RC-Zement oder RC-CEM bezeichnet. Das Diagramm dient an dieser Stelle allein dazu, die Unterschiedlichkeit der Phasenzusammensetzung augenfällig zu machen.

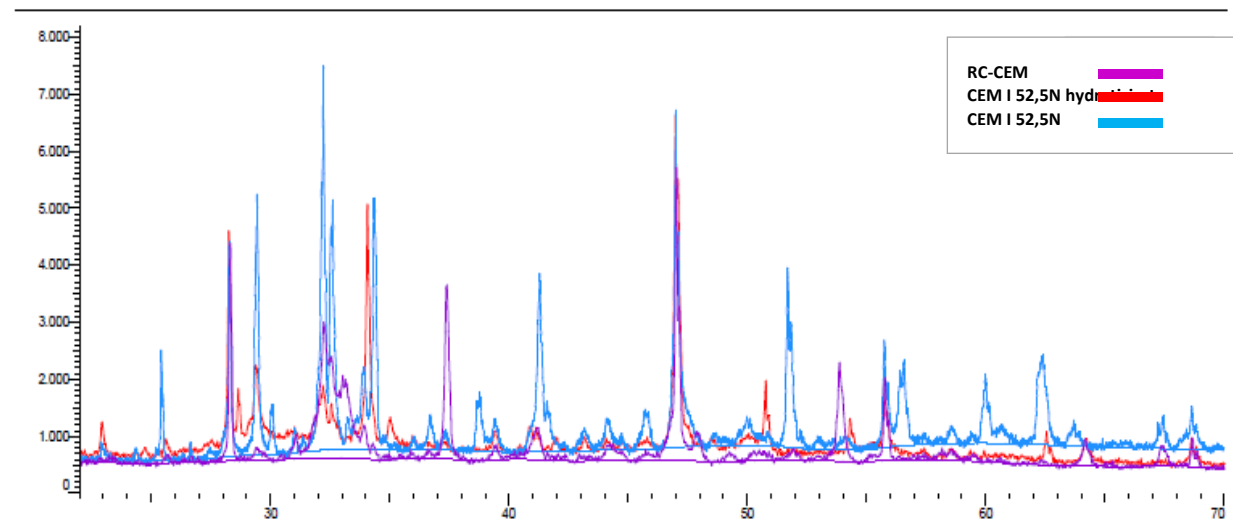


Abb. 4.1.1: XRD-Spektren des 3-stufigen Herstellungsverfahrens des Modellsystems

Die nachfolgende Tabelle 4.1.1 dokumentiert die Ergebnisse der quantitativen röntgenografischen Phasenanalyse. Auf das angewendete instrumentell-analytische Verfahren wird unter Abschnitt 5.3 näher eingegangen.

Modellsystem	T1	T2.1-a	T3.1-a	T2.2-a	T3.4-a
	CEM I 52,5 N	hydratisiert	dehydratisiert	hydratisiert	dehydratisiert
Rwp	4,99	6,39	8,21	5,38	7,53
Σ Zuschlag [M-%]	1,31	0,07	0,23	0,07	0,64
Σ C3S [M-%]	56,48	0,00	0,00	0,00	0,00
$\Sigma\beta$ -C2S [M-%]	19,98	13,69	16,72	14,71	24,80
$\Sigma\alpha'$ -C2S [M-%]	0,52	0,00	29,98	0,00	14,94
α' -/ β -C2S	0,03	0,00	1,79	0,00	0,60
Σ C3A [M-%]	0,87	0,00	4,57	0,00	3,98
Σ C4AF [M-%]	10,33	3,14	7,83	2,22	5,81
Σ Aluminate [M-%]	11,20	3,14	12,40	2,22	9,79
Σ Klinkerphasen [M-%]	88,18	16,83	59,09	16,93	49,53
CaCO ₃ [M-%]	4,33	7,18	0,55	5,74	0,00
Σ Ca(OH) ₂ [M-%]	1,53	13,77	0,00	22,86	0,53
CaO [M-%]	0,01	0,25	7,24	0,25	12,86
Σ Sulfatträger [M-%]	4,00	3,93	0,14	4,24	0,26
Σ SO ₃ -Äquivalent	3,23	2,59	0,12	2,74	0,21
Fremdphasen [M-%]	—	—	—	—	24,22
Σ Nebenphasen [M-%]	0,94	10,13	0,13	8,51	1,28
Σ kristallin [M-%]	100,30	52,16	67,38	58,59	89,31
amorpher Anteil [M-%]	0,00	48,09	32,75	41,67	10,69
α Ph/ Σ kPh	0,00	0,92	0,49	0,71	0,12

4.1.1 Aufbereitung und Präparation

Die Herstellung des Modell-RC-Bindemittels RC-CEM erfolgte in Anlehnung an die Vorgaben der Bindemittelprüfnorm DIN EN 196-1 [DIN16].

Zwecks Erreichen eines möglichst hohen Hydratationsgrads innerhalb vergleichsweise kurzer Zeit wurde eine moderate Wärmebehandlung gemäß Reifegradformel nach SAUL herangezogen (siehe Monographien zur Betontechnologie, beispielsweise [GS01]):

$$R_s = \sum \Delta t_i (T_i + 10) \quad \begin{array}{l} T_i = \text{mittlere Lagerungstemperatur in } ^\circ\text{C} \\ \Delta t_i = \text{Anzahl der Tage mit } T_i \end{array}$$

Ausgehend von dem aus der Betontechnologie bekannten Sachverhalt, dass Betone auf Basis schnell erhärtender Zemente, wie dem hier verwendeten CEM I 52,5 N, im Alter von 90 Tagen und im Unterschied beispielsweise zu Hochofenzementen (CEM III) nur noch eine geringe Nacherhärtung zeigen, wurde die Reifezahl R_s zu 3000 gewählt, einem Betonalter von 100 Tagen unter Normalbedingungen entsprechend, und Rezeptur sowie Lagerungsbedingungen entsprechend projektiert. Das Modellsystem RC-CEM basierte ausschließlich auf Portlandzementstein mit einem w/z-Wert von 0,45. Hergestellt wurden insgesamt 10 Prüfwürfel mit einer Kantenlänge von je 16 cm. Die Wärmebehandlung im 45 °C-temperierten Wasserbad startete am ersten Tag nach der Herstellung und lief über einen Zeitraum von 56 Tagen. Die anschließende Lagerung an Luft erfolgte im Laborklima. Für die ersten Testreihen diente demnach ein Zementstein, dessen Reifegrad dem des gleichen Zementsteins entspricht, wenn Letzterer zum Zeitpunkt der Prüfung ein Alter von mindestens 100 Tagen bei einer Lagerungstemperatur von 20 °C aufweist.

Vormahlung des hydratisierten Zementsteins

Für die Vorzerkleinerung des hydratisierten Zementsteins stand eine Backenbrechermühle BB100 Mangan der Firma Retsch (Abb. 4.1.1.1) zur Verfügung. Über den voreingestellten Abstand der Stahlbacken wurde eine Korngröße von 5 mm realisiert.



Abb. 4.1.1.1: Backenbrechermühle
Retsch BB 100

Thermische Dehydratisierung

Die thermische Behandlung – alternativ auch als „Aktivierung“ bezeichnet – des bereitgestellten Zementsteins als Modell einer (inertstoffarmen bzw. inertstofffreien) Betonbrechsandfeinfraktion erfolgte in flachen Edelmetalltiegeln im Muffelofen (Abb. 4.1.1.2). Standardmäßig wurde das Material bei 700°C für 120 Minuten dehydratisiert, wobei neben der Entwässerung eine Reihe von Feststoffreaktionen ablaufen, die zur Neubildung hydraulischer Phasen führen. Angesichts der gewählten Prozessführung und der normzementähnlichen Eigenschaften des hierdurch erhaltenen Produkts wird es als Recyclingzement (kurz: RC-CEM) bezeichnet. Abweichend wurden darüber hinaus auch spezielle Temperatur-/Zeitregime genutzt, um den Einfluss von Parametervariationen auf die Phasenum- und -neubildungen im Rezyklat spezifizieren zu können.

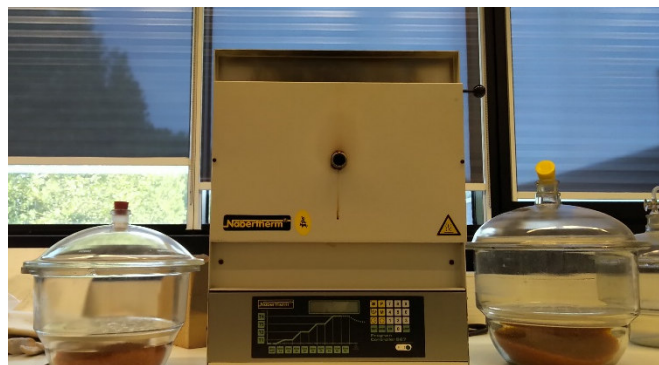


Abb.4.1.1.2.: Hochtemperaturofen von Nabertherm.
Standardmäßig wurden die Proben bei 700°C eingesetzt und nach 120 min von 700°C auf Raumtemperatur abgeschreckt.

Feinvermahlung nach Dehydratisierung

Die abschließende Feinvermahlung des Rezyklats erfolgte mittels einer Scheibenschwingmühle der Modellreihe RS der Fa. Retsch (Abb. 4.1.1.3). Das Mahlprinzip besteht in sich kreisend bewegenden Mahlelementen in Form von 2 Mahlringen und einer mittig gelegenen Mahlscheibe. Bei 1400U/min wurde das Rezyklat für 6 min aufgemahlen.



Abb.4.1.1.3: Scheibenschwingmühle
RS von Retsch

4.2 Modellsystem Serie 2: Betonbruch 0 – 8 mm

Ausgangsmaterial dieser Versuchsreihe war ein Abbruchbeton aus dem Rückbau von Spannbeton-Eisenbahnschwellen, wie er bereits im Zuge der Entwicklung der neuen Recyclingtechnologie genutzt worden war. Detaillierte Informationen über die Herkunft der verwendeten Rohstoffe und über das Herstellungsdatum bzw. Betonalter waren nicht zu ermitteln. Die vorliegenden Spezifikationen zum Rohstoff Bahnschwelle stammen aus Untersuchungen, die im Rahmen des Vorgängerprojektes (Probe: T6.4) bzw. der angesprochenen Bachelorarbeit (Probe: T6.5) durchgeführt wurden. Sowohl die o.g. Untersuchungen als auch das Berichtsprojekt zielen vorrangig auf die Rückgewinnung der Bindemittelkomponente ab, wobei die erstgenannten im Zuge der Anreicherung des Bindemittelanteils und der damit verbundenen weitgehenden Separierung in Bindemittel und Gesteinskörnung neben dem rezyklierten Bindemittel, welches hier im Mittelpunkt steht, auch Gesteinskörnung aus Betonrecyclingmaterial als solches wieder verfügbar macht. Die angesprochenen Arbeiten unterscheiden sich allerdings grundlegend in Vorgehensweise und Verfahrenstechnik von der hier betrachteten. Die erzielten Resultate sind insofern nicht unmittelbar übertragbar und werden nur für vergleichende qualitative Betrachtungen herangezogen.

4.2.1 Aufbereitung und Präparation

Das zur Verfügung stehende Betongranulat mit 8 mm Größtkorn wurde für die Wiederaufbereitung mittels Siebung in eine Feinfraktion 0 – 2 mm und eine gröbere Fraktion > 2 mm getrennt. Die Feinfraktion diente als Ausgangsmaterial für das Versuchsprogramm der Serie 2 RC-BS 0 – 2 mm. Die thermische Behandlung erfolgte analog zu den Versuchen der Serie 1.

5. Serie 1: RC-CEM

5.1 Bestimmung der elementarchemischen Zusammensetzung

Die Bestimmung der elementarchemischen Zusammensetzung des Probenmaterials erfolgte mittels wellenlängendispersiver Röntgenfluoreszenzspektrometrie (WDRFA). Die Anregung der Proben zur Emission charakteristischer Röntgenstrahlung wird durch polychromatische Röntgenstrahlung erzielt. Dabei werden kernnahe Elektronen aus den inneren Schalen der Atome herausgeschlagen. Elektronen aus höheren Energieniveaus nehmen deren Platz ein. Die bei diesen Übergängen freiwerdende Energie wird angesichts des Prinzips der Energieerhaltung in Form von elementspezifischer Fluoreszenzstrahlung der Energie $E = h \cdot \nu$ abgegeben und von einem Strahlungsdetektor erfasst. Angesichts der geringen Austrittstiefe der Röntgenphotonen und des integralen Charakters der RFA ist die Homogenität der Proben von entscheidender Bedeutung für die Analysengenauigkeit. Die elementarchemische Analyse erfolgte daher an Schmelztabletten. Zu deren Präparation wurden die pulverförmigen Proben im Massenverhältnis 8 : 1 Lithiumtetraborat ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) : Probe in Platin-Tiegeln bei ca. 1.000 °C in einem gasbetriebenen Schmelzaufschlussgerät aufgeschmolzen und anschließend mit Pressluft rasch abgekühlt, um insbesondere partielle, die Homogenität beeinträchtigende Auskristallisationen aus der glasartigen Schmelze im Temperaturbereich zwischen 1000 °C und 600 °C zu verhindern.

Serie 1	Methode	CaO [M.-%]	SiO ₂ [M.-%]	Al ₂ O ₃ [M.-%]	SO ₃ [M.-%]	MgO [M.-%]	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Sonstige < 0,5 M.-%	GV [M.-%]	Σ _{XRF} [M.-%]	
							[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]				
CEM I 52,5 N	T1	Schmelzaufschluss	63,449	21,969	4,563	3,065	1,544	0,563	3,702	0,104	0,3380	3,409	103,044
	Herstellangaben		63,690	21,190	4,220	2,920	1,340	0,460	3,860	0,110	0,070	2,300	100,160
RC-CEM	T3.4	Schmelzaufschluss	59,609	21,056	4,079	2,659	1,399	0,176	3,506	0,088	0,3480	6,736	100,004
	T3.4	Schmelzaufschluss	60,761	21,099	4,38	2,913	1,515	0,44	3,512	0,096	0,7640	7,019	102,852
CEM II B/L 32,5 R	Ref.5	Schmelzaufschluss	52,123	24,161	8,613	1,244	1,469	1,064	3,555	0,281	0,2680	7,207	100,492
	Ref.5	Schmelzaufschluss	52,969	24,518	8,748	1,177	1,477	1,076	3,532	0,29	0,2740	7,230	101,848

Die vorstehende Tabelle 5.1.1 dokumentiert die Ergebnisse der elementarchemischen, jeweils als Doppelbestimmung vorgenommenen quantitativen Analysen des als Ausgangszement gewählten CEM I 52,5 N sowie des zum Vergleich mit dem Rezyklat betrachteten Portlandkalksteinzements CEM II B/L 32,5 R. Ferner sind in dieser Tabelle auch die Konzentrationswerte des aus dem hydratisierten Ausgangszement erzeugten Rezyklats (RC-CEM) aufgeführt.

Naturgemäß müssen die Analysenwerte des Ausgangszements und des darauf basierenden Rezyklats nahezu identisch sein. Wie die Höhe des ermittelten Glühverlusts (GV) nahelegt, ist es im Zuge der Rezyklaterzeugung und des Probenhandlings zur Aufnahme von Feuchtigkeit gekommen, was die höheren Werte plausibel macht und insgesamt gesehen zu einer Verschiebung der Konzentrationswerte der in oxidischer Form gelisteten Elemente in Richtung niedrigerer Werte bewirkt.

Der für den Ausgangszement dokumentierte Glühverlust dürfte überwiegend auf den Zementnebenbestandteil Kalkstein zurückzuführen sein, wie ein Vergleich mit den phasenanalytischen Befunden nahelegt, da im Zuge der Glühverlustbestimmung CO₂ abgespalten wird. Der Stöchiometrie von Kalkstein CaCO₃ entsprechend beträgt der CO₂-Anteil nahezu 50 % der Kalksteinmasse. Der CEM II-Zement setzt angesichts seines zweiten Hauptbestandteils Kalkstein von vornherein im Zuge der Glühverlustbestimmung eine erhöhte Menge an CO₂ frei. Die vergleichsweise niedrige CaCO₃-Menge legt den Schluss nahe, dass dieser vom Hersteller als zur Kategorie B gehörig deklarierte Normzement eher in der A-Kategorie mit einem Maximalgehalt an Kalkstein von 20 % angesiedelt ist. Dies wird auch durch die Resultate der röntgenografischen Phasenanalyse nahegelegt, die u.a. den Gehalt an CaCO₃ dokumentiert. Generell ist zu beachten, dass der natürliche Rohstoff Kalkstein neben CaCO₃ und MgCO₃ bis zu 20 % Fremdbestandteile, wie Tonminerale, enthalten kann.

5.2 Mahlfineinheit

Die Bestimmung der Mahlfineinheit der Rezyklate, der Referenzemente sowie der Benchmark-Produkte erfolgte gemäß Euronorm EN 196-6: 2019-06 als lasergranulometrische Messung [DIN19].

Die Laserstreulichtspektrometrie nutzt die Streuung von Laserlicht an Partikeln, wobei der Streuwinkel charakteristisch für deren Größe ist. Die Partikel werden als kugelförmig angenommen. Durch die Analyse des Streulichtmusters über einen großen Winkelbereich lässt sich die Partikelgrößenverteilung ermitteln.

Als Charakterisierungsparameter wurden die spezifische Oberfläche und der jeweilige rechnerisch-theoretische Durchgang durch ein 90 µm-, 50 µm- sowie 10 µm-Sieb in Form des d₉₀-Werts, d₅₀-Werts bzw. des d₁₀-Werts herangezogen. Ziel der Auswertung war, die Unterschiede der verwendeten Mühlentypen und deren Mahleffekte aufzuzeigen. Die Reaktivität des Rezyklats korreliert mit der Mahlfineinheit; mit zunehmender spezifischer Oberfläche steigt die Reaktionsgeschwindigkeit an. Bei den Normzementen spiegelt sich dies in den Festigkeitsklassen der Zemente eines Herstellerwerks wider, die sich in der Regel nicht aus chemisch-mineralogischen Verschiedenheiten sondern aus der Mahlfineinheit ergeben.

Abbildung 5.2.1 dokumentiert links die Partikelgrößenverteilung des Ausgangszements CEM I 52,5 N – in der Abbildungsunterschrift als Referenzement bezeichnet – und rechts die Partikelgrößenverteilung des hieraus mittels Scheibenschwingmühle erzeugten Rezyklats RC-CEM.

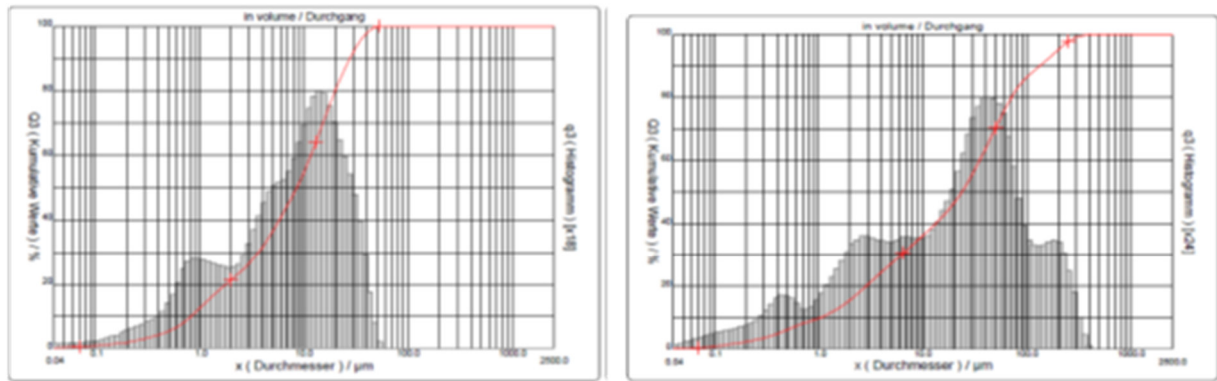


Abb. 5.2.1: Gegenüberstellung der Partikelgrößenverteilung von Probe T1 (links) sowie T3.4 (rechts). Die lasergranulometrischen Messungen ergaben für den Referenzzement CEM I 52,5 N den d90-Wert von 27,56 µm. Für das Rezyklat RC-CEM wurde ein d90-Wert von 129,88 µm ermittelt.

5.3 Qualitative und quantitative Mikrostrukturanalysen

Grundlage der Bestimmung der Phasenzusammensetzung einschließlich der Bestimmung des Gehaltes an amorphen Phasen bildet die Röntgendiffraktometrie (XRD) anhand der aufgezeichneten Beugungsdiagramme. Die Methode basiert auf der Beugung von monochromatischer Röntgenstrahlung an den diversen Netzebenen kristalliner Substanzen. Die gebeugten Strahlen weisen einen Gangunterschied auf und interferieren angesichts ihrer Wellennatur unter den Einfallswinkeln, für die die Bragg'sche Gleichung erfüllt ist:

$$2d \cdot \sin \Theta = n \cdot \lambda$$

d : Netzebenenabstand [Å]

Θ : Beugungswinkel einfallende Strahlung [°]

λ : Wellenlänge der Röntgenstrahlung [Å]

n : Beugungsordnung (setze $n=1$)

Die Winkel, unter denen konstruktive Interferenz auftritt, stehen in direktem Zusammenhang zu den Gitterparametern und somit zur Kristallstruktur der analysierten Mineralphasen. Die Lage der Peaks im Beugungsdiagramm ist für kristalline Stoffe charakteristisch und ermöglicht die Identifizierung der einzelnen Phasen. Allerdings können sich bei vielphasigen, linienreichen Gemischen Überlagerungen der zahlreichen Peaks („Röntgenreflexe“) ergeben, welche die eindeutige Identifizierung sämtlicher kristalliner Bestandteile erheblich erschweren. Grundsätzlich ist aus den Peaklagen der Bestand kristalliner Phasen in der Analysenprobe qualitativ zu bestimmen. Die Peakintensität ist dagegen ein Maß für die Konzentration der jeweiligen Phase. Die Quantifizierung erfolgte mit der Rietveld-Methode, bei der ein aus den Kristallstrukturdaten der identifizierten Phasen im Zuge eines nichtlinearen iterativen Berechnungsprogramms erzeugtes Diffraktogramm an das gemessene Diffraktogramm bestmöglich angepasst („angefittet“) wird. Schwach kristalline und/oder amorphe Probenbestandteile dokumentieren sich als breit verschmierte Erhebung im ansonsten glatten Untergrundverlauf als sogenannter „amorpher Halo“. Zur quantitativen Erfassung röntgenamorpher Anteile wurde den Pulverpräparaten Calciumfluorid (CaF₂) in definierter Konzentration (10 % bzw. 9,1 % bezogen auf die Gesamtmasse inkl. CaF₂) als innerer Standard zugefügt.

Für die Untersuchungen stand ein modernes Röntgendiffraktometer D8 Discover, Fa. Bruker AXS, Karlsruhe, mit ortsempfindlichem Detektor („LynxEye“) für die schnelle Diffraktometrie zur Verfügung. Es wurde in Bragg-Brentano-Geometrie mit Cu-Strahlung gemessen. Die Messparameter sind Tabelle 5.3.1 zu entnehmen.

Tabelle 5.3.1: Geräteparameter der XRD-Messungen

		Übersichtsmessung	Detailmessung
Generator	[KV/mA]	40/40	
Winkelbereich (2θ)	[°]	5 - 70	22 - 70
Schrittweite	[°/step]	0,01	0,01

Qualitativ wurden die Diffraktogramme mittels der Bruker-Visualisierungs- und Auswertesoftware *DIFFRAC.EVA* unter Nutzung der Datenbank PDF2 des *International Centre for Diffraction Data (ICDD)* analysiert. Die quantitative Bestimmung der Phasenzusammensetzung nach der Rietveld-Methode erfolgte mit dem Programm *TOPAS 5*. Hierzu wurden Strukturdaten der *Crystallography Open Database (COD)* sowie der *American Mineralogist Crystal Structure Database (AMCSD)* genutzt.

Die im Zuge der Projektbearbeitung durchgeführten XRD-Analysen dienen neben der Identifizierung der mineralischen Zusammensetzung der Rezyklatproben vor allem der Erfassung und Bewertung von signifikanten Einflussfaktoren auf das Gesamtsystem bzw. auf einzelne Phasen.

Hierzu zählen:

- Einfluss der thermischen Prozessführung auf Kristallisationsgrad sowie Phasenzusammensetzung (Schlagworte: Behandlungstemperatur, Verweilzeit, etc.),
- Einfluss des Mahlprozesses (Schlagworte: Amorphisierung, tribomechanische Effekte etc.),
- Recyclingfähigkeit von RC-Zementen im Sinne deren Dehydratation und Rehydratation (im Zuge der Nutzung als neues Bindemittel) und erneuter Dehydratation (im Zuge der Wiederaufbereitung und somit Realisierung eines geschlossenen Kreislaufs für mineralische Bindemittel).

Die nachfolgend in Tabellenform wiedergegebenen chemisch-mineralogischen Daten präsentieren die Ergebnisse der als Rietveld-Analysen vorgenommenen quantitativen röntgenografischen Phasenanalysen. Erläuternd ist anzumerken, dass das vielfach auftretende Summenzeichen Σ darauf hinweist, dass hier 2 Kristallmodifikationen der benannten Phase zur Analyse Verwendung fanden. Als Beispiel sei das in technischen Klinkern auftretende C_3S aufgeführt, das zur Unterscheidung vom synthetisch reinen Tricalciumsilikat durch die noch aus dem 19. Jahrhundert stammende Bezeichnung „Alit“ gekennzeichnet ist. Letzteres tritt überwiegend in 2 strukturell geringfügig verschiedenen, als „M1“ und „M3“ bezeichneten monoklinen Modifikationen auf. Vergleichbares gilt auch für die übrigen 3 Hauptklinkerphasen C_2S , C_3A und C_4AF .

Die Ergebnisse der quantitativen Phasenanalyse der gemäß Tabellenkopfzeile unterschiedlich konditionierten Proben in Tabelle 5.3.2 zeigen unter anderem, dass der Gehalt an Freikalk signifikant davon abhängt, wie zügig die XRD-Messung nach der thermischen Behandlung erfolgte. Probe T3.1 wurde bereits vor der thermischen Behandlung gemahlen und mit dem inneren Standard Calciumfluorid vermischt. Der Anteil an CaO entspricht demnach dem realen Freikalkgehalt des Rezyklates, welcher sich nach 120 Minuten bei einer Ofentemperatur von 700°C einstellt. Routinemäßig hergestellter RC-Zement würde erst nach der thermischen Behandlung feinvermahlen werden. Bei der dann möglichen Feuchtigkeitsaufnahme aus der Umgebungsluft sinkt der reaktive CaO-Anteil zugunsten eines steigenden Portlanditgehaltes ($Ca(OH)_2$).

Tabelle 5.3.2: XRD-Analyse zur Bestimmung des Einflusses von Lagerung / Konditierung auf die Phasenzusammensetzung

	T3.1	T3.2	T3.3	T3.4
	XRD unverzgl. n. 700°C/120 min	Abkühlung und Lagerung Laborklima	Streupräparat	Abkühlung und Lagerung Exsikkator
Rwp	8,21	8,517	7,091	7,251
ΣZuschlag [M-%]	0,23	0,00	0,13	0,13
ΣC3S [M-%]	0,00	0,00	0,00	0,00
Σβ-C2S [M-%]	16,72	10,41	30,96	17,18
Σα'-C2S [M-%]	29,98	36,40	35,93	30,08
α'-/β-C2S	1,79	3,50	1,16	1,75
ΣC3A [M-%]	4,57	7,20	4,93	3,46
ΣC4AF [M-%]	7,83	5,13	8,23	5,37
ΣAluminate [M-%]	12,40	12,33	13,16	8,83
ΣKlinkerphasen [M-%]	59,09	59,14	80,05	56,10
CaCO3 [M-%]	0,55	3,49	1,01	4,53
ΣCa(OH)2 [M-%]	0,00	5,72	1,40	1,54
CaO [M-%]	7,24	2,72	9,11	5,97
ΣSulfatträger [M-%]	0,14	0,00	0,11	0,06
Fremdphasen [M-%]	0,00	0,00	0,00	0,00
ΣNebenphasen [M-%]	0,13	0,00	0,27	0,12
Σkristallin (ΣkPh) [M-%]	67,38	71,08	92,07	68,45
amorpher Anteil (aPh) [M-%]	32,75	28,93	8,06	31,68
aPh/ΣkPh	0,49	0,41	0,09	0,46

Generell ist für RC-Zement zum einen das Fehlen der im Portlandzementklinker und somit auch im Portlandzement CEM I mengenmäßig dominierenden Phase C₃S charakteristisch, die darüber hinaus primär die technischen Eigenschaften des CEM I (und auch des CEM II) bestimmt. Die Bildung von C₃S erfordert ein Temperaturniveau, das mit mindestens 1250°C weitab des im Niedertemperatur/ Niederenergieverfahren erzeugten RC-Zements liegt.

Zum anderen ist die Bildung von α'-C₂S im Zuge der RC-Zementherstellung von entscheidender Bedeutung. Im Portlandzementklinker findet sich praktisch ausschließlich die β-Phase des Dicalciumsilikats wieder; die α'-Phase tritt nicht oder nur in sehr geringer Konzentration auf. Bezeichnend ist, dass α'-C₂S zu den wesentlich reaktiveren Hochtemperaturmodifikationen des Dicalciumsilikats gehört als die im technischen Klinker bei Umgebungstemperatur vorliegende β-Modifikation.

Bekanntlich sorgt das im Portlandzement vorhandene β-C₂S für die langzeitige Nacherhärtung des Zementsteins bzw. Betons. Für die Anfangserhärtung spielt es dagegen kaum eine Rolle, zumal auch seine Konzentration im Zementklinker deutlich niedriger ist als die des oben angesprochenen C₃S.

Demnach ist für Recyclingzement, wie er bei relativ niedrigen Temperaturen (ca. 700°C) erzeugt wird, das Vorliegen wesentlich reaktiverer Dicalciumsilikatphasen maßgebend, als es die auch als Belit bezeichnete C₂S-Phase im konventionellen Zementklinker ist.

Tabelle 5.3.3: Phasenanalyse zur Bestimmung des Einflusses des Temperaturregimes der thermischen Behandlung auf die Phasenzusammensetzung

	T4.1.2	T4.3.1	T4.3.2	T4.3.3
Thermische Behandlung [min]	120	120	120	120
Haltetemperatur [°C]	700,0	750,0	800,0	850,0
Einstelltemperatur [°C]	22,0	22,0	22,0	22,0
Entnahmetemperatur [°C]	22,0	22,0	22,0	22,0
Rwp	7,81	8,243	8,425	6,912
ΣZuschlag [M-%]	0,13	0,10	0,13	0,13
ΣC3S [M-%]	0,00	0,00	0,00	0,00
Σβ-C2S [M-%]	19,82	20,56	19,68	53,06
Σα'-C2S [M-%]	34,04	38,05	49,54	17,68
α'-/β- C2S	1,72	1,85	2,52	0,33
ΣC3A [M-%]	5,79	6,70	4,63	1,56
ΣC4AF [M-%]	9,26	10,23	12,06	12,63
ΣAluminate [M-%]	15,05	16,93	16,69	14,19
ΣKlinkerphasen [M-%]	68,92	75,54	85,91	84,93
CaCO3 [M-%]	2,85	0,95	1,05	0,54
ΣCa(OH)2 [M-%]	3,21	1,83	0,63	0,94
CaO [M-%]	7,30	8,57	10,13	12,18
ΣSulfatträger [M-%]	0,21	0,13	0,00	0,00
Fremdphasen [M-%]	0,00	0,00	0,00	0,00
ΣNebenphasen [M-%]	0,26	0,13	0,00	0,55
Σkristallin (ΣkPh) [M-%]	82,87	87,26	97,85	99,28
amorpher Anteil (aPh) [M-%]	17,26	13,61	2,29	0,86
aPh/ΣkPh	0,21	0,16	0,02	0,01

Wie die vorstehenden beiden Tabellen 5.3.2 und 5.3.3 dokumentieren, ist das Auftreten signifikanter Gehalte an der α'-Phase des Dicalciumsilikats somit kennzeichnend für RC-Zement. Die Ergebnisse der quantitativen Phasenanalyse an RC-Zement in Tabelle 5.3.3, der bei Temperaturen zwischen 700°C und 850°C erzeugt wurde, belegen, dass der Umschlagpunkt der reaktiveren α'-Phase in die β-Phase bei ca. 800 °C liegt. In hochreinen Calciumoxid-Siliziumoxid-Systemen tritt α'-C₂S als Hochtemperaturmodifikation auf, die auf der Temperaturskala oberhalb der β-Phase angesiedelt ist [Tay03]. Fremdionen, die offenkundig im Zuge des klassischen Zementklinkerbrandes nicht in das Belit genannte Dicalciumsilikat eingebaut werden, stabilisieren im entsprechenden Rezyklat des hydratisierten Zements dagegen die betrachtete Hochtemperaturphase bis herunter zu üblichen Umgebungstemperaturen. Die genannte höhere Brenntemperatur, hier 850 °C, bewirkt allem Anschein nach eine „Aufreinigung“ der α'-Phase, die diese in die thermodynamisch stabilere β-Modifikation umschlagen lässt.

Gemäß [Loc00] liegt nämlich die Löslichkeit von Fremdionen in Letzterer unterhalb derer von α'-C₂S. Erwartungsgemäß nimmt mit der Temperatur darüber hinaus der Grad der Kristallinität – das Verhältnis der kristallinen Phasen zur Summe aus kristallinen und amorphen Phasen – zu, was sich anhand der Abnahme des amorphen Anteils dokumentiert und des Weiteren in den zugehörigen Röntgendiffraktogrammen in der Abnahme der Peakhalbwertsbreite der relevanten Phasen. War somit bei 700 °C noch ein amorpher Gehalt von 17,26 % (Probe T4.2.1) zu ermitteln, so sank dieser auf weniger als 1 % (Probe T4.2.4) bei 850 °C, wie aus Tabelle 5.3.3 ersichtlich.

Tabelle 5.3.4: Phasenanalyse zur Bestimmung des Einflusses des Temperatur- und Zeitregimes der thermischen Behandlung auf die Phasenzusammensetzung

	T3.4.1	T4.2.1	T4.3.4	T4.2.2
Thermische Behandlung [min]	120	360	120	360
Haltetemperatur [°C]	700,0	700,0	900,0	900,0
Rwp	7,25	6,876	8,98	8,87
ΣZuschlag [M-%]	0,13	0,13	0,70	0,86
ΣC3S [M-%]	0,00	0,00	0,00	0,00
Σβ-C2S [M-%]	17,18	19,22	49,75	49,69
Σα-C2S [M-%]	30,08	44,16	14,11	13,27
α / β C2S	1,75	2,30	0,28	0,27
ΣC3A [M-%]	3,46	2,05	0,00	1,26
ΣC4AF [M-%]	5,37	8,68	13,42	11,77
ΣAluminate [M-%]	8,83	10,73	13,42	13,03
ΣKlinkerphasen [M-%]	56,10	74,11	77,28	75,99
CaCO₃ [M-%]	4,53	2,61	0,39	0,44
ΣCa(OH)₂ [M-%]	1,54	5,43	3,03	2,07
CaO [M-%]	5,97	2,26	6,09	7,87
ΣSulfatträger [M-%]	0,06	0,04	0,00	0,00
Ternesite [M-%]	0,00	0,00	8,95	12,23
ΣNebenphasen [M-%]	0,12	0,09	0,13	0,13
Σkristallin (ΣkPh) [M-%]	68,45	84,68	96,57	99,59
amorpher Anteil (aPh) [M-%]	31,68	15,46	3,56	0,55
aPh/ΣkPh	0,46	0,18	0,04	0,01

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse der quantitativen Phasenanalysen gemäß Tabelle 5.3.3 und Tabelle 5.3.4 ergab, dass sich zwischen 850°C und 900°C mit Ternesit C_5S_2s eine neue Phase im Material bildet (s. Abb. 5.3.1). Ternesit wird in der Zementtechnologie meist als Sulfospurrit bezeichnet und stellt in Verbindung mit Aluminiumionen in der Porenwasserlösung eine reaktive Klinkerphase dar. Er ist Bestandteil von in Entwicklung befindlichen neuen Zementen [Sch17]. Diese Erkenntnis ist hier jedoch nur von untergeordnetem Interesse, da dessen Bildung Temperaturen erfordert, die deutlich oberhalb des für die RC-Zementerzeugung als günstig ermittelten Temperaturbereichs liegen. Die Existenz dieser kristallinen, Sulfat bindenden Phase deutet jedoch auf den grundsätzlich möglichen Einbau von Sulfat in die übrigen Klinkerphasen, speziell die Silikate, im Bereich unterhalb von 1.000°C ein.

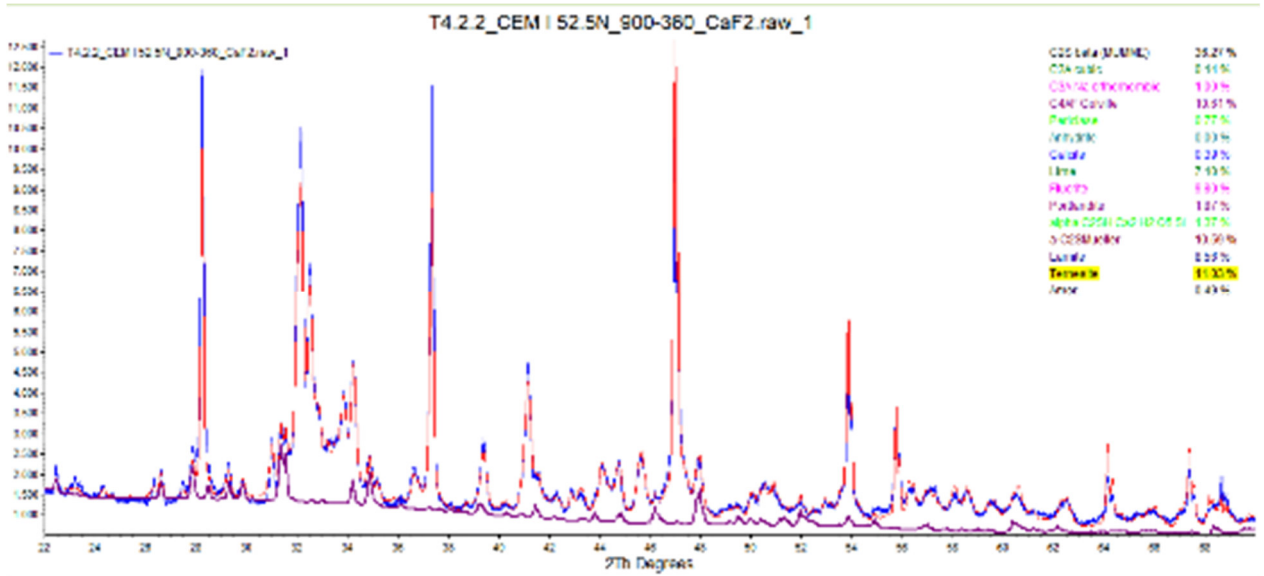


Abb. 5.3.1: Quantitativer Nachweis von Ternesit im RC-Zement bei erhöhter Umwandlungs-temperatur (900°C; 3 h) mittels Rietveldanalyse

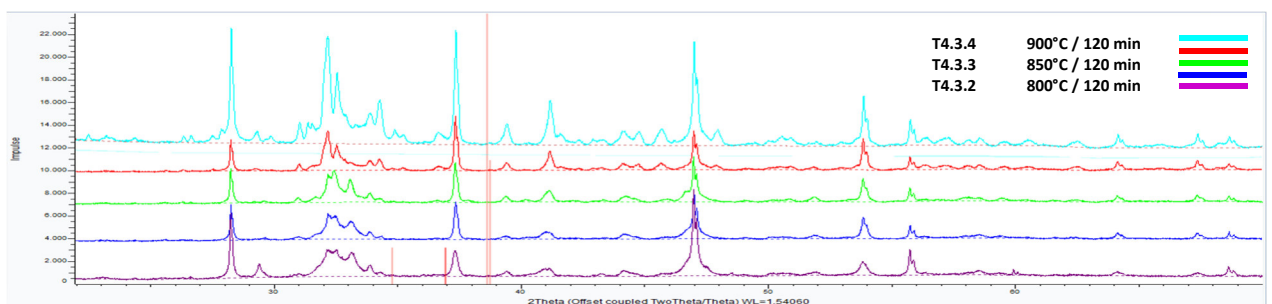


Abb.5.3.2 Röntgendiffraktogramme zu den Phasenumwandlungen bzw. –neubildungen im Temperaturbereich 700 bis 900°C

Die vorstehende Abbildung 5.3.2 veranschaulicht anhand der Überlagerung der Diffraktogramme der Proben T4.1.2 sowie T4.3.1 bis T4.3.4 (s. Legende im Diagramm und Tabellen 5.3.3 und 5.3.4) die Veränderungen in der Phasenzusammensetzung mit der Temperatur bei konstant gehaltener Behandlungszeit (120 min). Dies zeigt sich speziell an der Peakgruppe im Bereich von 31° – 35° (2θ).

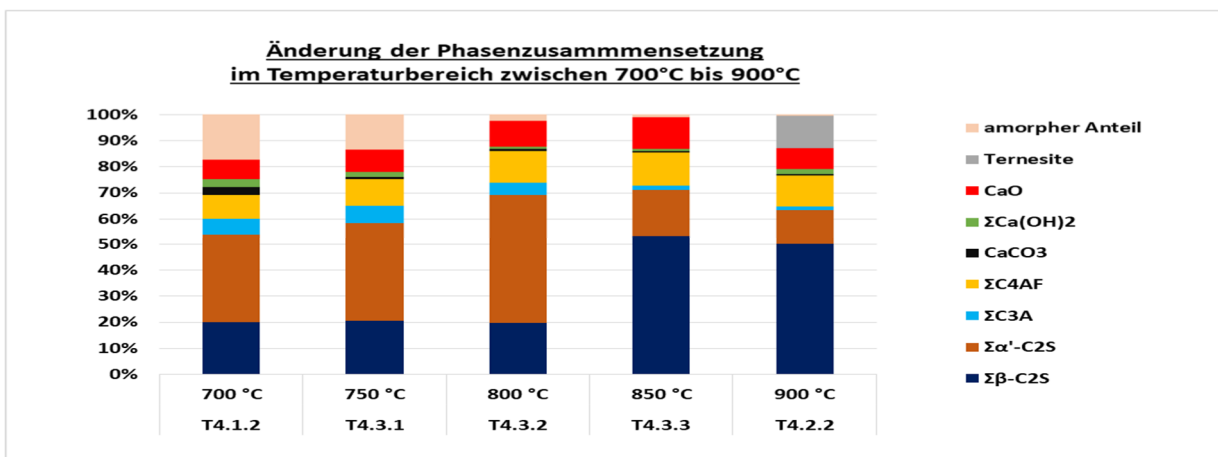


Abbildung 5.3.3: Änderung der Phasenzusammensetzung in Abhängigkeit von der Temperatur im Bereich von 700 bis 900 °C quantitativ in Form eines gestapelten Balkendiagramms.

Untersuchung der Hydratationswärmeentwicklung in Abhängigkeit von der Mahlfeinheit

Ziel dieser Untersuchungsreihe war es, die durch Verwendung unterschiedlicher Mahlaggregate und Mahlgarnituren erzielbaren Effekte hinsichtlich der Reaktivität des Aufgabeguts aufzuzeigen. Hierzu dokumentieren die bereits im Abschnitt 5.2 in Abbildung 5.2.1 wiedergegebenen Messprotokolle der lasergranulometrischen Messung in einer Gegenüberstellung die Partikelgrößenverteilung des Ausgangszements (Probe T1) und einer RC-Zementprobe (T3.4), die entsprechend der gewählten Standardmethodik mittels Scheibenschwingmühle aufgemahlen wurde.

Die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen nimmt bekanntlich mit zunehmender spezifischer Oberfläche bzw. abnehmendem d90-Wert, also mit der Mahlfeinheit, zu. Für Normzemente ist dies Allgemeinut. Diesbezüglich dokumentiert die nachstehende Tabelle 5.3.5 neben den Kennwerten der Lasergranulometrie ergänzend die Resultate der phasenanalytischen Untersuchungen, wie sie sich speziell als Ergebnisse des Einsatzes einer Hochleistungskugelmühle vom Typ Emax der Fa. Retsch ergeben haben. Die deutliche Feinung durch deren Einsatz ist anhand des d50- und des d90-Werts offenkundig. Wie diese Tabelle weiterhin belegt, bewirkt die Verwendung einer Wolframcarbid- anstelle einer Zirkonoxid-Mahlgarnitur (Mahlgefäß + Mahlkugeln) in Verbindung mit dieser Mühle nicht nur eine etwas engere Korngrößenverteilung. Es fällt insbesondere auf, dass der Einsatz von Kugeln gleichen Durchmessers aber nahezu verdreifachter Rohdichte ($\rho_{WC} = 15,63 \text{ g/cm}^3$; $\rho_{ZrO_2} = 5,68 \text{ g/cm}^3$) zu einer erheblichen Zunahme des röntgenamorphen Anteils (amorphe Phasen aPh) im Mahlgut führt.

Tabelle 5.3.5: XRD-Analyse zur Bestimmung des Einflusses der Mühlentechnik auf die Phasenzusammensetzung

	T4.4	T3.4	T4.6	T4.5
Mühlentyp	Backenbrecher	Scheibenschwingmühle	Hochleistungskugelmühle	Hochleistungskugelmühle
Mahlgarnitur	Edelstahl	Edelstahl	Zirkoniumoxid	Wolframcarbid
Intensität [U/min]	—	1400	1500	1500
Mahldauer [min]		6	30	30
spez. Oberfläche [cm²/g]	16779,00	9559,31	n.b.	n.b.
d10 [µm]	3,03	1,04	3,77	4,78
d50 [µm]	30,20	23,58	9,42	9,97
d90 [µm]	186,63	132,16	29,91	21,35
Rwp	6,601	7,251	6,088	5,15
ΣZuschlag [M-%]	0,17	0,13	0,13	0,13
ΣC3S [M-%]	0,00	0,00	0,00	0,00
Σβ-C2S [M-%]	23,65	17,18	15,14	13,56
Σα'-C2S [M-%]	21,44	30,08	17,76	8,85
α'-/β-C2S	0,91	1,75	1,17	0,65
ΣC3A [M-%]	6,17	3,46	3,61	2,16
ΣC4AF [M-%]	6,27	5,37	3,92	2,67
ΣAluminate [M-%]	12,43	8,83	7,53	4,83
ΣKlinkerphasen [M-%]	57,52	56,10	40,43	27,24
CaCO₃ [M-%]	1,39	4,53	11,04	5,34
ΣCa(OH)₂ [M-%]	6,91	1,54	6,94	3,04
CaO [M-%]	0,00	5,97	0,03	2,62
ΣSulfatträger [M-%]	0,00	0,06	0,27	0,00
Fremdphasen [M-%]	0,00	0,00	0,00	0,00
ΣNebenphasen [M-%]	0,14	0,12	0,17	0,08
Σkristallin (ΣkPh) [M-%]	66,13	68,45	59,01	38,45
amorpher Anteil (aPh) [M-%]	34,03	31,68	41,13	61,68
aPh/ΣkPh	0,51	0,46	0,70	1,60

Zur kalorimetrischen Messung der hydraulischen Aktivität derart verschiedener RC-Zementproben wurde in Anlehnung an die Norm DIN EN 196-9 [DIN10] ein spezielles Prüfverfahren angewendet. Das erzeugte Probenmaterial wurde hierfür in Probenbehälter gefüllt, die in einen Isolierblock aus Hochleistungsdämmstoff ($\lambda = 0,02 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) platziert wurden. Das jeweilige Thermoelement zur Erfassung

der Hydratationswärmeentwicklung wurde durch den Behälterdeckel in definierte Höhe eingelassen. Die Messung erfolgte rechnergestützt. Anwendung fand hierzu das Vielstellenmessgerät NI SCXI-1000 von National Instruments, welches die gleichzeitige Verwendung von 8 Thermoelementen ermöglicht. Die Anwendung zur Aufnahme der Temperaturkurven wurde mit Hilfe der Systementwicklungssoftware Lab View, ebenfalls von National Instruments stammend, programmiert. Das nachstehende Diagramm in Abbildung 5.3.5 zeigt den Temperaturverlauf bei der Hydratation des Ausgangszements CEM 51,5 N (T1) in Gegenüberstellung zu den entsprechenden Verläufen der beiden mittels der Kugelmühle aufgemahlene Proben (T4.5 und T4.6) sowie des mittels Backenbrechers zerkleinertem Probenmaterials (T4.4).

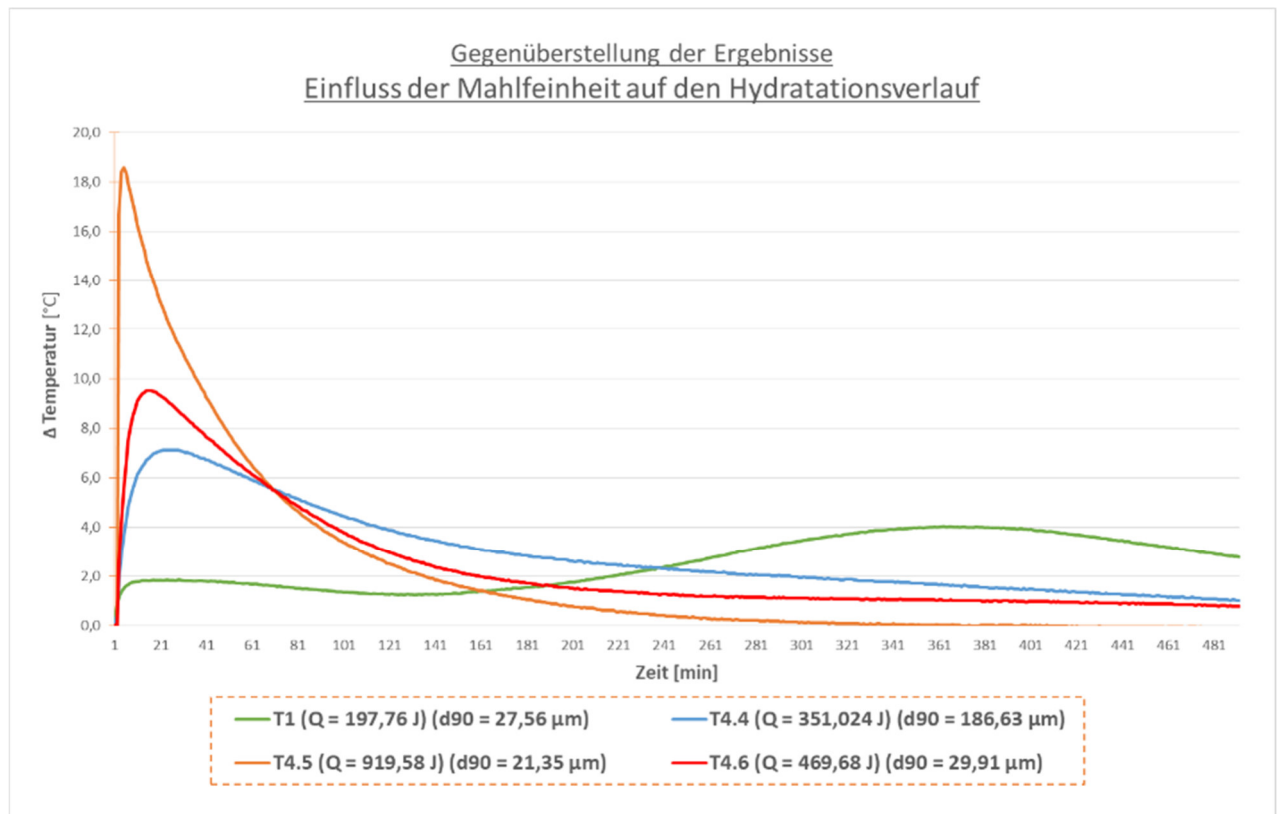


Abb.5.3.4: Diagramm der Temperaturentwicklung in den ersten 8,5 h der Hydratation.

Die jeweils bis zum Zeitpunkt des Temperaturmaximums freigesetzte Wärmemenge – in Tabelle 5.3.6 in Absolutwerten angegeben – wurde aus der Temperaturerhöhung und der theoretisch berechneten Gesamtwärmekapazität der jeweiligen Proben bestimmt. Aus Abbildung 5.3.4 wie auch aus dieser Tabelle ist der Effekt der Probenfeinung, insbesondere aber der Amorphisierung auf die Reaktionsgeschwindigkeit wie auch des Wertes der freigesetzten Wärmemenge augenfällig.

Tabelle 5.3.6: Berechnung der Wärmekapazität C (Einwaagen normiert)

Rohstoffe	materialspezifische Wärmekapazität	T1	T4.4	T4.6	T4.5
[g]	[J/(g*K)]	CEM I 52,5 N (d90 = 27,56 μm)	Backenbrecher (d90 = 186,63 μm)	Zirkondioxid (d90 = 29,91 μm)	Wolframcarbide (d90 = 21,35 μm)
Zement/Rezyclat	0,754	10,00	10,00	10,00	10,00
Wasser	4,190	10,00	10,00	10,00	10,00
ΣWärmekapazität C [J/K]		49,44	49,44	49,44	49,44
Zeit Δt_(T_{max} - t0) [min]		344	26	18	10
Temperaturdifferenz ΔT_(T_{max} - t0) [°C]		4,00	7,10	9,50	18,60
freigesetzte Wärmemenge Q [J]		197,76	351,02	469,68	919,58

Die Auswertung der Hydrationswärmemessungen im teiladiabatischen System führt schlagwortartig formuliert auf nachstehende Schlussfolgerungen:

- je höher der kristalline Phasengehalt, desto stärker verzögert verläuft die chemische Reaktion hinsichtlich Wärmefreisetzung und Temperaturmaximum;
- die freigesetzte Wärmemenge verdreifachte sich bei Verdopplung des amorphen Gehaltes (Vergleich T4.4 und T4.6);
- in den Diffraktogrammen der Proben T4.4 sowie T4.6 zeigten sich keine CaO-spezifischen Peaks; dennoch war auch hier eine starke Wärmeentwicklung während der ersten halben Stunde des Hydrationsprozesses messbar, die auf die Hydratation der Calciumaluminatkomponente im Rezyklat zurückgeführt werden muss;
- unter Annahme, dass der ermittelte $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalt das Ergebnis eines präparativen Fehlers infolge von CaO-Hydratation während der Probenvorbereitung oder der XRD-Messung handelt, ergäbe sich für alle 3 Proben ein Freikalk -Gehalt zwischen 5,66 und 6,94 M.-%.

Recyclingfähigkeit von RC-Zementen (“hydra-dehydra“)

Ein maßgeblicher Aspekt bezüglich des hier im Mittelpunkt stehenden Recyclings von Betonrückbaumaterial ist die Absicht, das gewonnene Rezyklat nach Möglichkeit ohne bzw. mit nur sehr geringen Qualitätseinbußen in einem Stoffkreislauf zu halten. Es sollte seinerseits rezyklierbar sein. Um die hiermit verbundene Annahme zu bestätigen, wurde die Versuchsreihe „hydra-dehydra“ durchgeführt, bei welcher RC-Zement hydratisiert und anschließend einer erneuten thermischen Behandlung unterzogen wurde. Die durch quantitative Rietveldanalyse erhaltenen Ergebnisse des im Modellversuch praktizierten Recyclingprozesses sind Tabelle 5.3.7 zu entnehmen.

Sie demonstrieren überraschenderweise, dass sich während der thermischen Wiederaufbereitung von hydratisiertem Rezyklat eine bisher nicht beobachtete Fremdphase in Form von Reinhardbraunsit im System entwickelt hat (s. Abb. 5.3.5).

In der Literatur wird *Reinhardbraunsit* (Calcium-Chondroit $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})_2$) als natürlicher Klinker beschrieben [Len13]. Inwieweit dieser Einfluss auf die Reaktivität und den damit verbundenen Wertstoffkreislauf nimmt, ist derzeit unklar und müsste ggf. in weiterführenden Untersuchungen abgeklärt werden. Es erscheint allerdings plausibel, dass diese Phase – in der zementchemischen Kurzschreibweise als $\text{C}_5\text{S}_2\text{H}$ bezeichnet – im Zuge der thermischen Behandlung als (Zwischen-) Produkt im Zuge der Entwässerung der Calciumsilikathydratphasen bei unvollständiger Dehydratation gebildet wurde. Es wäre dann u.U. angezeigt, die Haltezeit entsprechend zu verlängern.

Tabelle 5.3.7: Ergebnisse der quantitativen Phasenanalyse für Modellsystem RC CEM 52,5N

Modellsystem	T3.1-a dehydratisiert	T2.2-a hydratisiert	T3.4-a dehydratisiert
Rwp	8,21	5,38	7,53
Σ Zuschlag [M-%]	0,23	0,07	0,64
Σ C3S [M-%]	0,00	0,00	0,00
$\Sigma\beta$ -C2S [M-%]	16,72	14,71	24,80
$\Sigma\alpha$ -C2S [M-%]	29,98	0,00	14,94
α' - / β -C2S	1,79	0,00	0,60
Σ C3A [M-%]	4,57	0,00	3,98
Σ C4AF [M-%]	7,83	2,22	5,81
Σ Aluminate [M-%]	12,40	2,22	9,79
Σ Klinkerphasen [M-%]	59,09	16,93	49,53
CaCO ₃ [M-%]	0,55	5,74	0,00
Σ Ca(OH) ₂ [M-%]	0,00	22,86	0,53
CaO [M-%]	7,24	0,25	12,86
Σ Sulfatträger [M-%]	0,14	4,24	0,26
Σ SO ₃ -äquivalät	0,12	2,74	0,21
Reinhardbraunsite [M-%]	0,00	0,00	24,22
Σ Nebenphasen [M-%]	0,13	8,51	1,28
Σ kristallin [M-%]	67,38	58,59	89,31
amorpher Anteil [M-%]	32,75	41,67	10,69
α Ph/ Σ kPh	0,49	0,71	0,12

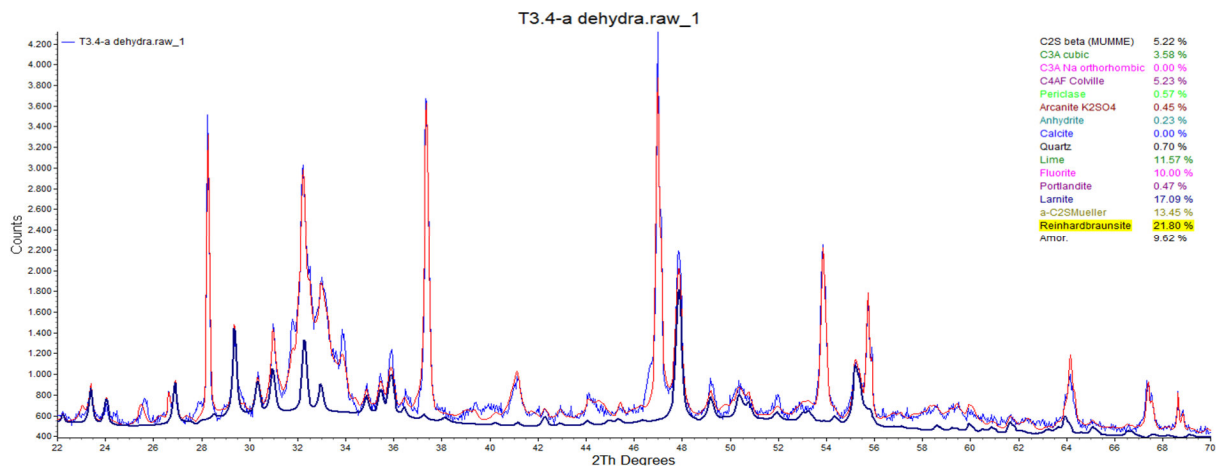


Abb.5.3.5: XRD-Spektrum der Probe T3.4-a zur Darstellung der Mineralphase Reinhardbraunsite, die sich bei der Wiederaufbereitung des Rezyklates bildete.

5.4 Thermogravimetrie

Die Thermogravimetrie (TG) bzw. die Differentialthermogravimetrie (DTG) ist ein analytisches Verfahren, welches werkstoffcharakterisierende Masseänderungen in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit in Diagrammform aufzeigt. Hierzu wird das Probenmaterial einem Temperaturprogramm unterworfen, im Zuge dessen die Probe unter Einhaltung einer vorgewählten konstanten Aufheizrate in Kelvin pro Minute (K/min) bis zur gewünschten Maximaltemperatur aufgeheizt und ggf. anschließend auf dem erreichten Temperaturniveau für eine festgelegte Zeitdauer gehalten wird.

Das nachstehende Thermogramm demonstriert in seinem oberen Teil zum einen den absoluten Masseverlust des auf Basis CEM I 52,5 N hydratisierten Zementsteins während des gesamten Beanspruchungszeitraums von 8 h (480 min) und dokumentiert anschaulich den Zeitpunkt, ab dem Massekonstanz erreicht ist. Zum anderen zeigt es die charakteristischen Stufen im zeitlichen Verlauf der Masseabgabe, die beim hier vorliegenden Material praktisch ausschließlich auf der Abgabe von physikalisch und chemisch gebundenem Wasser beruhen.

Angesichts der gewählten Aufheizrate von 10 K/min und des Starts bei Raumtemperatur wird die programmierte Haltetemperatur von 700°C nach knapp 70 min erreicht (siehe die nach unten gerichtete Pfeilspitze auf der Zeitachse). Nach weiteren ca. 20 min ist Massekonstanz erreicht. Dieses Thermogramm belegt, dass die gewählten Parameter der im Rahmen der Bindemittelrückgewinnung angewendeten thermischen Behandlung (700 °C; 2 h) die vollständige Dehydratisierung des aufgegebenen, zuvor hydratisierten Materials als Teil des Umwandlungsprozesses sicher gewährleisten.

Zu Vergleichszwecken wurde mit gleicher Aufheizrate ein ergänzender Versuch mit der niedrigeren Haltetemperatur von 650 °C gefahren. Dabei zeigte sich, dass unter den Bedingungen des thermoanalytischen Messprogramms hier nach 120 min Massekonstanz noch keinesfalls erreicht war, sondern dass sich die Feuchtigkeitsabgabe stattdessen über einen Zeitraum von vielen Stunden hinzog. Dies steht im Einklang mit Literaturbefunden, wonach es eines Temperaturniveaus in der Höhe von 700 °C bedarf, um vollständige Entwässerung der Calciumsilikathydrate zu bewirken. Im Unterschied zum 700 °C-Versuch, bei dem der Gesamtmassenverlust laut Diagramm 27,2782 % betrug, waren es beim 650 °C-Versuch gemäß den im Diagramm festgehaltenen Daten etwas weniger, nämlich 25,4251 %.

Das jeweilige untere Diagramm stellt den gleichen Sachverhalt dar wie das darüber befindliche. Es demonstriert anhand des differenzierten Signals, der Masseänderung pro Zeiteinheit, in visuell günstigerer Weise, nämlich hier anhand von 2 „Peaks“, bei welchen Temperaturen bzw. nach welchen Zeiten charakteristische Masseverluste auftreten. Der knapp oberhalb 100 °C liegende erste Peak beruht primär auf der Abgabe physikalisch gebundenen („verdampfbaren“) Wassers, der zweite bei 500 °C auf der Entwässerung von Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zu Calciumoxid CaO . Der letztgenannte Prozess stellt die Umkehr des „Kalklöschens“ dar. Ergänzend sei an dieser Stelle angemerkt, dass die genaue Peaklage auf der Temperaturskala, die angesichts der konstanten Aufheizrate fest mit der Zeitskala verknüpft ist, von der Höhe der Aufheizrate abhängt: Da keine Gleichgewichtsprozesse sondern dynamische Vorgänge abgebildet werden, werden wohldefinierte Umwandlungspunkte, wie hier die Freisetzung von Wasser aus Calciumhydroxid, in Abhängigkeit von der Aufheizrate um ein gewisses Maß „überfahren“.

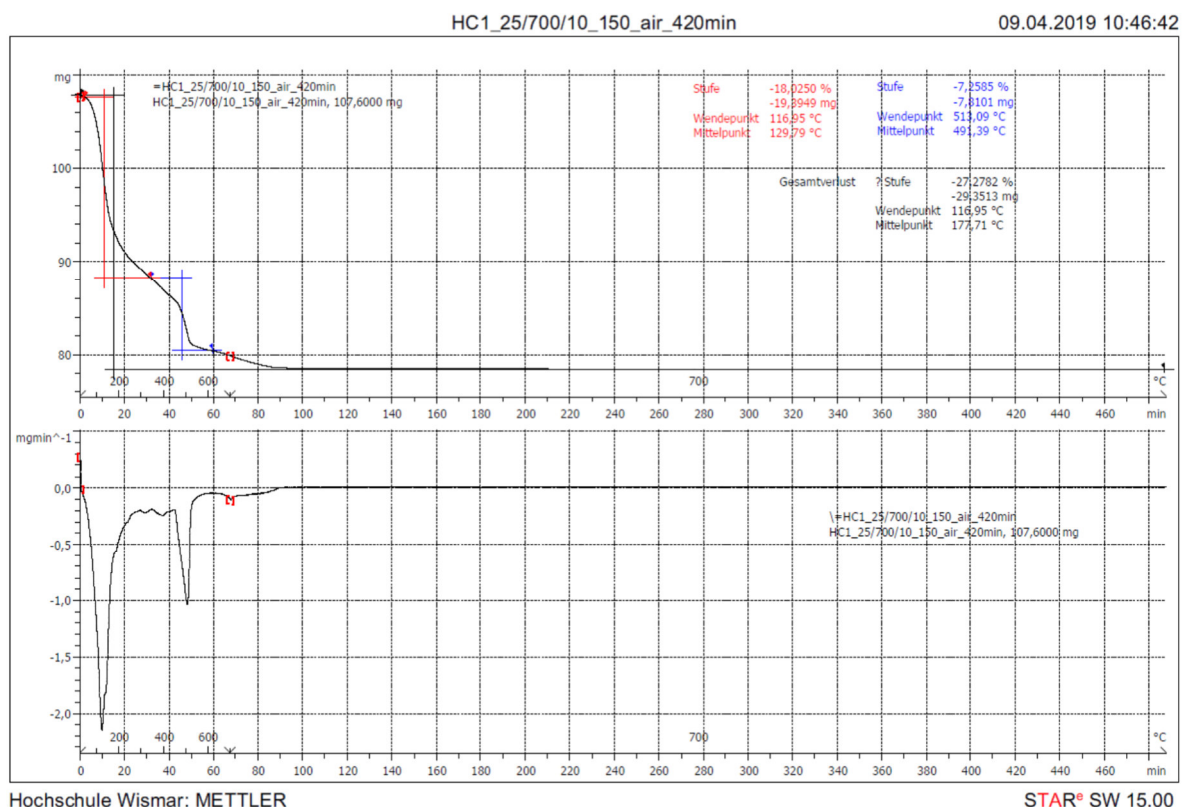


Abb.5.4.1: Thermogramm (Thermogravimetrie, oben, zugehörige Differentialthermogravimetrie darunter) des hydratisierten Ausgangszementes CEM I 52,5 N; Heizrate: 10 K/ min; Haltetemperatur: 700 °C

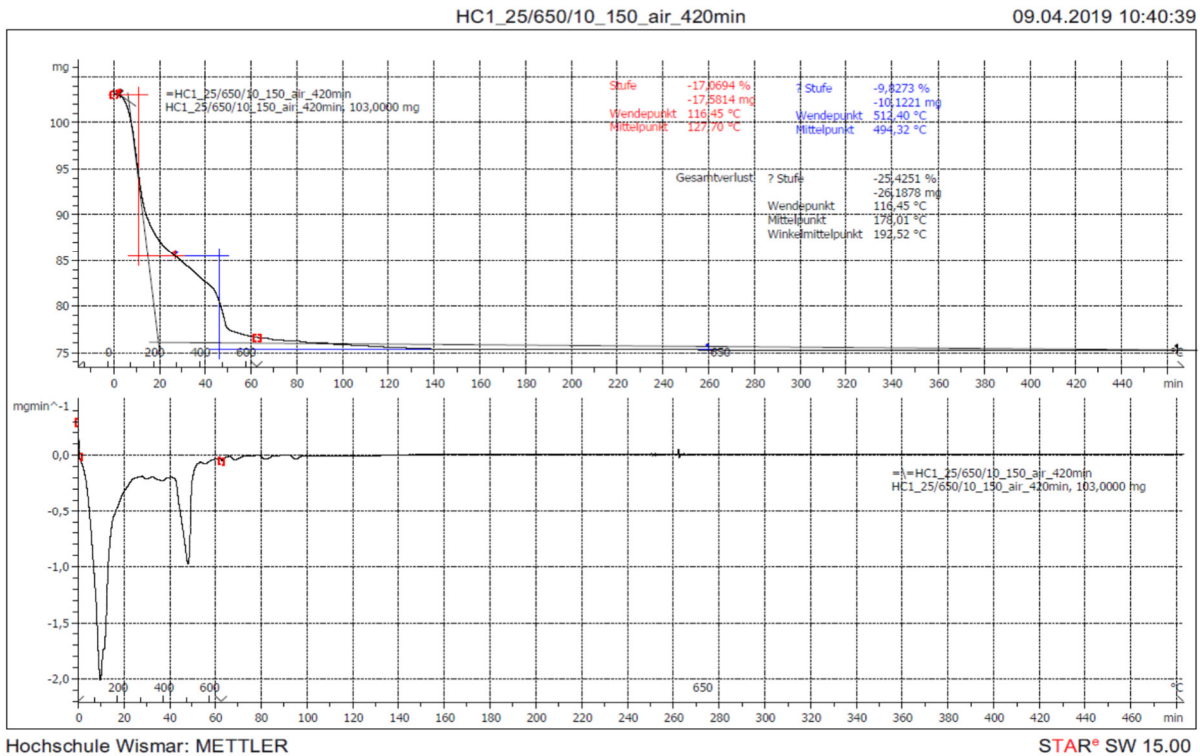


Abb.5.4.2: Thermogramm (Thermogravimetrie, oben, zugehörige Differentialthermogravimetrie darunter) des hydratisierten Ausgangszementes CEM I 52,5 N; Heizrate: 10 K/ min; Haltetemperatur: 650 °C

5.5 Bestimmung der Porengrößenverteilung

Bei der Quecksilberdruckporosimetrie wird Quecksilber als nicht benetzende Flüssigkeit unter Registrierung des schrittweise gesteigerten Intrusionsdrucks in die entgaste Probe gepresst und parallel die intrudierte Quecksilbermenge auf jeder Druckstufe erfasst. Aus dem gemessenen Zusammenhang zwischen Druck und eingepresster Quecksilbermenge lässt sich – auf Basis eines Porenmodells, üblicherweise werden Zylinderporen zur Berechnung angenommen – neben dem Gesamtporenvolumen, die Porenradienverteilung sowie die Größen der inneren Oberfläche und die Dichte der Proben ermitteln.

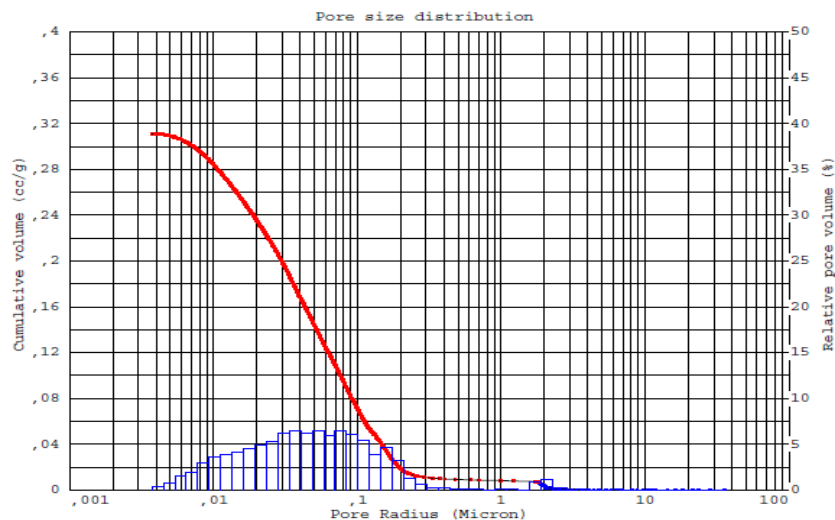


Abb. 5.5.1: Kumuliertes Porenvolumen und Porenradienverteilung der Probe 3.4 RC-CEM

Das Diagramm in Abbildung 5.5.1 dokumentiert das ausgeprägte, breite Porenradialmaximum der RC-Zementprobe im Bereich 0,03 bis 0,1 µm. Es unterstreicht die empirische Feststellung des deutlich erhöhten Wasseranspruchs des Rezyklats, der sich zur Erzielung vergleichbarer Verarbeitbarkeit mit Normzementen in einem höheren Wasserzementwert manifestiert. Demnach ist die bei der Prüfkörperherstellung zutage tretende vergleichsweise hohe Wasserbindung und der daraus resultierende erhöhte Wasseranspruch, wie vermutet, auf das Vorhandensein von Poren im aufgezeigten Größenbereich zurückzuführen. Gemäß der auf dem Gebiet der Porositätsuntersuchungen üblichen IUPAC-Klassifizierung wird dieser zum Makroporenbereich (> 0,05 µm Durchmesser) gezählt.

5.6 Prüfung der Anwendungseigenschaften

5.6.1 Prüfung des Erstarrungsverhaltens

Mit Blick auf die angestrebten Einsatzmöglichkeiten als Zementersatz erfolgte die gezielte Prüfung der Anwendungs- und Verarbeitungseigenschaften des Rezyklates.

Die Reaktionsmechanismen sowie die daraus resultierenden Eigenschaften von Zement während der Hydratation wurden in den vergangenen Jahrzehnten detailliert analysiert und beschrieben sowie normativ geregelte Anforderungen definiert.

Unmittelbar nach Wasserzugabe beginnt die erste Phase der hydraulischen Erhärtung in Form von Hydrolyse- und Hydratationsreaktionen, die ein anfangs sehr geringes, nach einiger Zeit verstärktes Ansteifen des Zementleims zur Folge haben. Abhängig von der Zementart setzt diese zweite Hydratationsphase ein bis drei Stunden nach dem Anmischen ein. Diese zeitlich anschließende, weitere Verfestigung des Zementleims wird als Erstarren, die danach fortschreitende Verfestigung als Erhärten bezeichnet [DIN17].

Die Prüfung des Ansteif- und Erstarrungsverhaltens des Rezyklats erfolgte in Anlehnung an DIN EN 196-3 *Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit* unter Verwendung eines Vicatnadel-Gerätes [DIN17].

Als Erstarrungszeit gilt dabei der Zeitraum, nach dem die Vicat-Nadel bis zu einer bestimmten Tiefe in einen Zementleim von Normsteife eingedrungen ist. Die Nadel wird normgemäß so weit herabzulassen, bis sie die Oberfläche des Zementleims berührt. Wörtlich führt die Prüfnorm weiter aus: „Die Nadel muss 1 s bis 2 s in dieser Stellung angehalten werden, um eine Anfangsgeschwindigkeit oder eine zusätzliche Beschleunigung der beweglichen Teile zu vermeiden. Anschließend sind die beweglichen Teile schnell loszulassen, so dass die Nadel senkrecht in den Zementleim eindringt. Auf der Skala wird die Eindringtiefe abgelesen, sobald die Nadel nicht mehr tiefer in den Zementleim eindringt, spätestens jedoch 30 s nach Loslassen der Nadel. Der abgelesene Wert, der den Abstand zwischen dem Nadelende und der Grundplatte angibt, ist zusammen mit der Zeit“, die seit der Zementzugabe in den Mischer vergangen ist („Nullzeit“), anzugeben. Die Zeitspanne zwischen Nullzeit und dem Zeitpunkt an dem der Abstand zwischen Nadel und Grundplatte (6 ± 3) mm beträgt, gilt als Erstarrungsbeginn [13].

Für die Prüfung des Erstarrungsverhaltens des RC-Zements wurde der Wasserzementwert auf 0,8 festgelegt. Diese Abweichung von der gültigen Norm begründet sich durch den im Verhältnis zu Normzementen höheren Wasseranspruch des Rezyklats. Eine Verarbeitung mit geringeren w/z-Werten konnte im Zuge der Untersuchungen nur mit Betonzusatzmitteln realisiert werden.

Tabelle 5.6.1: Prüfung des Erstarrungsverhaltens in Anlehnung an DIN EN 196-3:2017-03

Bez.	Einwaage				Abstand Vicatnadel von Grundplatte				
	Recyclat [%]	Normsand [%]	Wasser [%]	Zusatzmittel [%]	10 min [mm]	20min [mm]	30 min [mm]	40 min [mm]	> 8h [mm]
T3.4-0	100,00	-	80,00	-	geliert sofort nach Abguss; Erstarrungsbeginn > 8h; Erhärtung n. 24h				
T3.4-M	100,00	300,00	80,00	-	geliert sofort nach Abguss; Erstarrungsbeginn > 8h; Erhärtung n. 24h				
T3.4-M/BV 0,6	100,00	300,00	60,00	4,00		6	3	3	
T3.4-M/FM 0,7	100,00	525,30	70,00	2,50		5			

Die Ergebnisse zeigen eine im Vergleich zu Normzementen deutlich abweichende Entwicklung der Frühfestigkeit des Rezyklats. Aus der Zementchemie ist ein ähnliches Phänomen unter dem Begriff des „Löffelbinders“ bekannt.

Bekanntlich wird der Hydratationsablauf von Zementen durch die Zugabe eines Sulfatträgers als Erstarrungsregler gesteuert. Ohne Sulfatträgerzusatz erstarrt der frisch angemachte Zementleim sofort. Die Menge des wasserlöslichen Sulfatangebotes ist bei Hydratationsbeginn so optimiert, dass die Zementklinkerkörner von einer Hülle aus Ettringit (Tricalciumaluminatrisulfathydrat) überzogen werden, welche den Fortgang der Hydratation unterbinden, bevor mit Aufplatzen dieser Hülle und einer Rekristallisation des Ettringits der Hydratationsprozess wieder anläuft. Ist die Sulfatmenge zu gering bemessen, bilden sich anstelle des genannten Trisulfats Monosulfatkristalle, während ein Überangebot zur Bildung von Sekundärgips führt. In beiden Fällen führt die Phasenreuebildung zum vorzeitigen Erstarren des Zementleims [SW00].

Ein vorzeitiges, messbares Erstarren konnte bei den untersuchten Rezyklatproben nicht festgestellt werden. Stattdessen setzt eine Reaktion unmittelbar nach der Wasserzugabe zum RC-Bindemittel bzw. zur Trockenmörtelmischung ein, die als Gelieren der Masse zu beschreiben ist. Das gelierte Material ist bereits wenige Minuten nach dem Abguss formstabil, wie die nachfolgenden Abbildungen 5.6.1 sowie 5.6.2 belegen. Trotzdem konnte auch 8 Stunden nach Abguss kein normgemäßes Erstarren festgestellt werden. 24 h nach Hydratationsbeginn waren die Proben T3.4-0 sowie T3.4-M erhärtet.

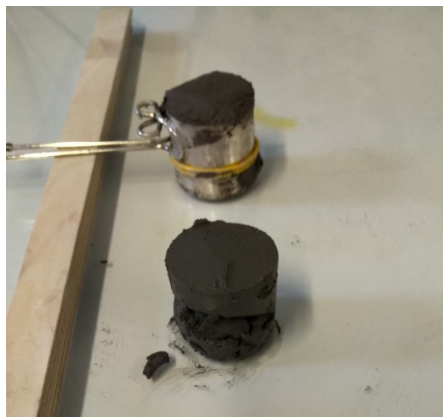


Abb.5.6.1: Die Rezyklatprobe T3.4-0 gelierte bereits während des Mischvorganges. Die Abbildung zeigt den Zustand des Materials eine



Abb.5.6.2: Der Zustand der Rezyklatprobe T3.4-M (Mischungsverhältnis 1:3:0,8)

Überraschenderweise konnte jedoch durch die Zugabe von Betonzusatzmitteln wie Verflüssiger (BV) oder Fließmittel (FM) nicht nur der Wasserzementwert um bis zu 25 M.-% reduziert werden: Als Zeitpunkt für den Erstarrungsbeginn nach DIN 196-3 wurden sowohl für die Probe T3.4-M/BV 0,6 als auch für Probe T3.4-M/FM zwanzig Minuten nach Abguss ermittelt. Gemäß DIN EN 197 erstarren Normalzemente frühestens nach 45 Minuten (52,5 L bis 52,5 R), Zemente mit frühem Erstarren („FE-Zement“) nach frühestens 15 min.

5.6.2 Verarbeitungseigenschaften und Hydratationswärmeentwicklung

Die Verarbeitungseigenschaften des Rezyklats sind neben den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Sachverhalten vor allem dadurch gekennzeichnet, dass unmittelbar nach der Vermischung von Wasser und Bindemittel eine starke Wärmeentwicklung auftritt.

Diese exotherme Reaktion dürfte eine stark beschleunigende Wirkung auf die Phasenum- und -neubildung im Anfangsstadium der Rezyklathydratation haben.

Zur gleichzeitigen Ermittlung der durch die exotherme Reaktion freiwerdenden Wärmemenge und der Prüfung hinsichtlich deren Einfluss auf die Frühfestigkeitsentwicklung wurde eine Prüfmethode entwickelt, welche den Aufbau des Vicatnadel-Tests mit der rechnergestützten Messung der Proben temperatur

verknüpft. Das hierzu verwendete Vielstellenmessgerät NI SCXI-1000 von National Instruments fand bereits Anwendung bei den Hydratationswärmemessungen und ist im Kapitel 5.3 (S. 25) näher beschrieben.

Tabelle 5.6.2.1: Berechnung der Wärmekapazität C (Einwaagen normiert)

Rohstoffe [g]	spezifische Wärmekapazität [J/(g·K)}	T3.4-0: 1 : 0,8	T3.4-M/0,8: 1 : 3 : 0,8	T3.4/0,6 BV 4,0 M.-% BV	T3.4/0,7 FM 2,5 M.-% FM
Zement/Rezyklat	0,754	10,00	5,00	10,00	10,00
Wasser	4,190	8,00	4,00	6,00	7,00
Zuschlag	0,835	0,00	15,00	0,00	0,00
Σ Wärmekapazität C [J/K]		41,06	33,06	32,68	36,87
Zeit $\Delta t_{(t_{max} - t_0)}$ [min]		6	4	15	10
Temperaturdifferenz $\Delta T_{(T_{max} - T_0)}$ [°C]		10,00	5,30	7,60	6,00
freigesetzte Wärmemenge Q [J]		410,60	175,22	248,37	221,22

Wie der vorstehenden Tabelle 5.6.2.1 zu entnehmen ist, sinkt die aus der spezifischen Wärmekapazität c_p der Komponenten der jeweiligen Mischung aus Rezyklat, Wasser und Gesteinskörnung („Zuschlag“) ermittelte Gesamtwärmekapazität und der teiladiabatisch bis zum registrierten Temperaturmaximum rechnerisch ermittelten, freigesetzten Wärmemengen erheblich, wenn anstelle reinen Bindemittelleims eine Mörtelmischung zum Einsatz kommt oder Betonzusatzmittel, wie der hier verwendete Betonverflüssiger oder ein Fließmittel. Es ist bekannt, dass derartige Zusatzmittel reaktionsverzögernde Wirkung ausüben können.

5.6.3 Festigkeitskennwerte und Festigkeitsentwicklung

Die Bestimmung der Druckfestigkeit erfolgte in Anlehnung an die DIN EN 196-1, *Prüfverfahren für Zement Teil 1: Bestimmung der Festigkeit* [6].

Die Herstellung von Mörtelmischungen plastischer Konsistenz mit dem in der Zementprüfung anzusetzenden Wasserzementwert von 0,5 war aufgrund des höheren Wasseranspruchs der Rezyklate nicht realisierbar. Vortests hatten einen w/z-Wert von 0,8 als Minimalwert zur Gewährleistung der Verarbeitbarkeit der Rezyklate ergeben. Dieser Wert wurde als Basiswert für die Herstellung und Prüfung der Rezyklat- sowie der Referenzzementproben festgelegt. Durch Zusatz eines Betonverflüssigers (BV) bzw. eines Fließmittels (FM) konnte der Wasserzementwert auf niedrigere Werte abgesenkt werden (S.Tabelle 5.6.3.1).

Die Massenanteile der Feststoffe entsprechen mit dem Verhältnis 1 : 3 (Zement : CEN-Normsand) den Vorgaben der Zementprüfnorm. 24 h nach Herstellung wurden die Prüfwürfel mit den Maßen 40 mm × 40 mm × 40 mm entschalt und bis zum Prüftermin (2 Tage, 7 Tage, 14 Tage sowie 28 Tage nach Herstellung) bei (20 ± 1,0) °C im Wasserbad gelagert.

Wie Tabelle 5.6.3.1 und das Diagramm Abb. 5.6.3.1 verdeutlichen, kommen 28 Tage-Festigkeit und Festigkeitsentwicklung der erstellten Prüfkörper auf Recyclingzementbasis bei Berücksichtigung des jeweils in Ansatz gebrachten Wasserzementwerts denjenigen der Vergleichszemente bzw. Benchmarkprodukte sehr nahe oder entsprechen diesen. Die Tabelle enthält neben den ermittelten Messwerten der Druckfestigkeit ergänzend den r- wie auch den s- Wert als jeweilige Einzahlwerte zur Klassifizierung der Festigkeitsentwicklung.

Tabelle 5.6.3.1: Zusammenstellung der Festigkeitskennwerte Serie 1 im Vergleich zu Prüferten der Referenzzemente

Serie 1		Festigkeitsbestimmung in Anlehnung an DIN EN 196-1									
Material	Bez.	$\rho_{\phi 28d}$ [g/cm ³]	w/z	δ_{2d}	δ_{7d}	δ_{14d}	δ_{28d}	δ_{2d}/δ_{28d}		δ_{28d} -analytisch	
				[N/mm ²]				r-Wert	Bewertung	s-Wert	Vergleich
CEM I 52,5 N - 0,8	T1	2,12	0,8	7,55	9,00	14,45	15,80	0,48	mittel	0,32	< 32,5 N
CEM II/B-LL 32,5 R	Ref.5_0,8	2,01	0,8	6,90	13,49	15,01	16,90	0,41	mittel	0,31	< 32,5N
CEM II/B-LL 32,5 R	Ref.5_0,6	2,04	0,6	8,42	11,38	14,52	16,02	0,53	schnell	0,25	32,5R; 42,5N
Füller	Ref.6		0,8	0,40	1,60		3,30	0,12	langsam	0,74	>> 32,5N
HDI FM	Ref.7		0,7	3,60	13,70		17,40	0,21	mittel	0,45	> 32,5N
Serie 1	T3.2.1-M/1,0	1,96	1	3,35	5,24	5,31	7,46	0,45	mittel	0,28	< 32,5N
	T3.4-M/0,8	2,04	0,8	5,61	9,00	10,90	12,70	0,44	mittel	0,3	< 32,5N
	T3.4-M/FM 0,7	2,03	0,7	5,77	7,90	12,91	14,66	0,39	mittel	0,4	> 32,5N
	T3.4-M/BV 0,7	1,977	0,7	3,78	10,83	13,51	15,75	0,24	mittel	0,47	> 32,5N
	T3.4-M/BV 0,6	2,054	0,6	8,18	11,52	17,74	18,09	0,45	mittel	0,33	< 32,5N

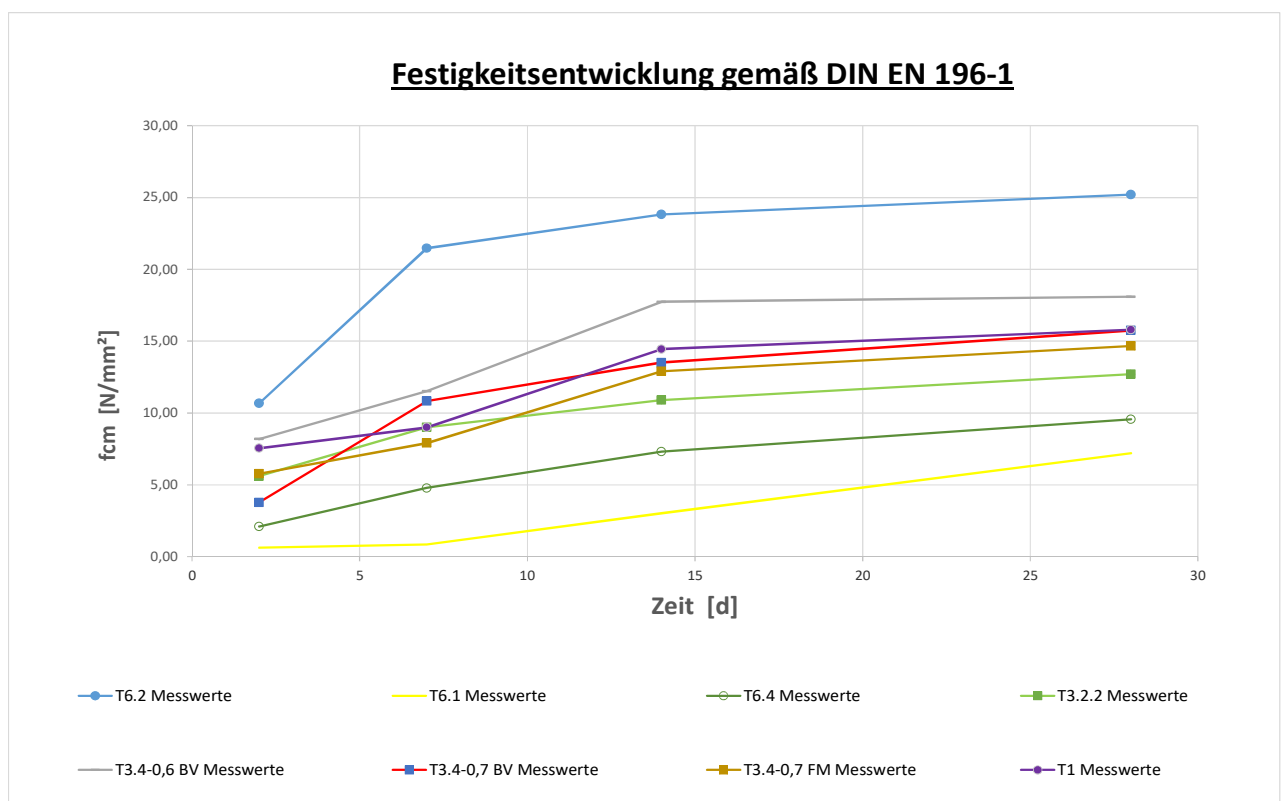


Abb.5.6.3.1: Gegenüberstellung der Festigkeitsentwicklung der Referenzzemente sowie der Rezyklatproben über den Prüfzeitraum von 28 Tagen.

5.7 Zusammenstellung der Daten für RC-CEM

Die nachfolgende Aufstellung listet eine Reihe an die Herstellung und die Eigenschaften des als RC-CEM bezeichneten Recyclingzements kennzeichnenden Daten wieder, die zur Spezifikation und damit zum Vergleich mit anderen hydraulischen normgemäßen oder nicht genormten Bindemitteln dienen können.

Herstellungsparameter

Mühlentyp:	Scheibenschwingmühle
Mahlgarnitur:	Edelstahl
Intensität:	1400 U/min
Mahldauer:	6 min
Rezyklateigenschaften	
spezifische Oberfläche:	9559,31 m ² /m ³ (Lasergrenulometrie)
d10 - Wert:	1,04 µm
d50 - Wert:	23,58 µm
d90 - Wert:	132,16 µm
gesamte spez. Oberfläche:	23,41 m ² /g (Hg-Druckporosimetrie)
durchschnittlicher Porenradius:	0,053079 µm
Gesamtporosität:	52,5804 %
Rohdichte:	1,68994 g/cm ³
Reindichte:	3,56381 g/cm ³

Rezyklatzusammensetzung

reaktive Klinkerphasen:	56 – 59 M-%
Freikalk:	5 – 10 M-%
ΣSO ₃ - äquivalent:	< 1 M-%

Verarbeitbarkeit

Erstarrungsbeginn:	sofort nach Zugabe H ₂ O
Entwicklung Eigenfestigkeit	> 8 Stunden

mechanische Eigenschaften

Mischungsverhältnis	1 : 3 : 0,8
2d-Druckfestigkeit	5,7 N/mm ²
28d-Druckfestigkeit	12,7 N/mm ²

Verzögerung des Erstarrungsverhaltes durch Einsatz von organischen Zusatzmitteln

Zusatzmittel Betonverflüssiger:	4 M.-% (bez. auf BM)
Erstarrungsbeginn:	20 min (n. Zugabe H ₂ O)

mechanische Kennwerte

Mischungsverhältnis	1 : 3 : 0,6 (RC : Zuschlag : Wasser)
2d-Druckfestigkeit	8,1 N/mm ²
28d-Druckfestigkeit	18,09 N/mm ²

Zusatzmittel Fließmittel: 2,5 M.-% (bez. auf BM)

Erstarrungsbeginn:	20 min (n. Zugabe H ₂ O)
--------------------	-------------------------------------

mechanische Kennwerte

Mischungsverhältnis	1 : 3 : 0,7 (RC : Zuschlag : Wasser)
2d-Druckfestigkeit	5,7 N/mm ²
28d-Druckfestigkeit	14,6 N/mm ²

6. Serie 2: RC-BS

6.0 Vorbemerkung

Ursprünglich war vorgesehen, Untersuchungen an einem weiteren System vorzunehmen, das als Modell eines typischen Betonbrechsands zur thermisch-mechanischen Aufbereitung aus einem Mörtel auf Basis des im Rahmen der Serie 1 verwendeten Zements CEM I 52,5 N und Quarzsand 0 - 2 mm als Rezyklat hergestellt werden sollte. Gemäß eigener Erfahrungen finden im vergleichsweise niedrigen Temperaturbereich um ca. 700 °C keine Reaktionen zwischen den calciumhaltigen Komponenten eines derartigen Mörtels und dem darin in Form von Quarzsand enthaltenem kristallinen SiO₂ statt, so dass dieser Zuschlag als Inertstoff anzusehen ist, welcher die Reaktionsprozesse innerhalb des hydraulisch gebundenen Systems Zementstein bei der thermischen Behandlung nicht grundlegend ändert. Erst im Bereich höherer Temperaturen, z.B. bei 900 °C, treten Mineralphasen auf, die beim reinen Zementsteinsystem nicht zu registrieren sind. So verschiebt sich das System CaO — SiO₂, wie es bei üblichen Zementen vorliegt, in Gegenwart von Kieselsäure auf die SiO₂-reichere Seite mit der Folge, das Monocalciumsilikatphasen wie Wollastonit CaSiO₃ gebildet werden können.

Stattdessen wurde daher als praxisnäheres Ausgangsmaterial für die als Serie 2 bezeichnete Versuchsreihe ein Abbruchbeton aus dem Rückbau von Spannbeton-Eisenbahnschwellen eingesetzt, die in großem Umfang im Streckennetz der Bahn AG verlegt worden waren.

Mit Blick auf das mögliche Anwendungsgebiet und die hierauf abgestimmte, nachfolgend beschriebene Materialaufbereitung zur Rezyklatgewinnung fand als Referenz- bzw. Benchmarkprodukt für diese Versuchsreihe ein handelsüblicher Pflasterfugenmörtel (PFM) Verwendung. Für die Wiederaufbereitung wurde aus dem vorgelegten Betongranulat mit 8 mm Größtkorn die Feinfraktion 0 – 2 mm mittels Siebung abgetrennt. Diese diente als Ausgangsmaterial für das Versuchsprogramm „RC-BS 0-2 mm“. Die thermische Behandlung erfolgte analog zu den Versuchen der Serie 1.

Es erscheint plausibel und war aus zahlreichen Voruntersuchungen bekannt, dass die feineren Siebfractionen von Betonbrechsanden bzw. Betongranulaten in aller Regel deutlich höhere Bindemittelgehalte aufweisen als die größeren, als RC-Gesteinskörnungen vermarktbareren Fraktionen. Es wurde daher zunächst bewusst auf Aufbereitungsmaßnahmen zur Anreicherung der aktivierbaren Bestandteile verzichtet, sondern stattdessen die abgesiebte 0 – 2 mm-Fraktion in Gänze dem beschriebenen thermischen Behandlungsprozess unterzogen und geprüft.

6.1 Bestimmung der elementarchemischen Analyse

Die Bestimmung der elementarchemischen Zusammensetzung erfolgte wie unter Abschnitt 5.1 beschrieben an Schmelztabletten auf Basis Lithiumtetraborat. Tabelle 6.1.1 listet die Analysenergebnisse des Benchmarkprodukts (PFM) und des Rezyklats RC-BS nach Durchführung der thermischen Behandlung in oxidischer Form auf. An beiden Materialien wurde ergänzend der Glühverlust bestimmt. Da das Schmelzaufschlussverfahren im Zuge der Probenpräparation für die Röntgenfluoreszenzanalyse (abgekürzt: RFA, englisch: XRF) bei vergleichbarer Temperaturhöhe wie die Glühverlustbestimmung erfolgt, waren die RFA-Messergebnisse um die jeweilige Höhe des Glühverlusts zu korrigieren (siehe vergleichend $\Sigma_{cal.}$ und Σ_{XRF}).

Der vergleichsweise hohe Glühverlust des Rezyklats erklärt sich primär aus der Abgabe physikalisch und chemisch gebundenen Wassers in den Hydraten, daneben auch aus der CO₂-Freisetzung carbonatisierter Komponenten. Berücksichtigt man, dass das erhaltene Rezyklat weitestgehend von diesen Bestandteilen befreit ist, die im Zuge des Glühens ausgetrieben wurden, so zeigt sich, dass die entscheidenden Gehalte an CaO und SiO₂ im Referenzmaterial und im Rezyklat auf vergleichbarer Höhe liegen.

Tabelle 6.1.1: elementarchemische Zusammensetzung von Referenzprodukt PFM (Ref.8.1) sowie von Rezyklat RC BS

Serie 2		Methode	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Sonstige	GV	Σ_{XRF}
			[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	< 0,5 M.-%	[M.-%]	[M.-%]
PFM	Ref.8.1	Schmelzaufschluss	17,995	70,088	3,054	0,626	0,553	0,823	1,075	0,27	0,196	6,609	101,435
RC BS beh.	T5.1	Schmelzaufschluss	12,957	50,501	5,8127	0,785	0,596	1,647	2,46	0,496	0,907	28,2733	104,435

6.2 Qualitative und quantitative Mikrostrukturanalysen

Tabelle 6.2.1 gibt die Resultate der röntgenographischen quantitativen Phasenanalyse mittels Rietveld-Verfahren an dem erhaltenen, thermisch behandelten Rezyklat (Probe T5.1) in Gegenüberstellung zu dem als Referenzmaterial verwendeten Pflasterfugenmörtel (Probe Ref.8.1) wieder. Für das Rezyklat, welches gemäß der beschriebenen Aufbereitung Sand- und Brechsandbestandteile aus dem Betonzuschlag enthielt, sind ergänzend die Messergebnisse der Lasergranulometrie angegeben sowie der Gesamtgehalt an inerter Gesteinskörnung (Zuschlag).

Tabelle 6.2.1: Quantitative Phasenzusammensetzung		
Serie 2	T5.1	Ref.8 .1
	0 - 2 mm	0 - 2 mm
Fraktion [mm]	< 4	—
spez. Oberfläche [cm ² /g]	7955,30	n.b.
d10 [µm]	27,68	n.b.
d50 [µm]	157,04	n.b.
d90 [µm]	915,06	n.b.
Rwp	6,80	8,438
ΣZuschlag [M-%]	20,51	39,79
ΣC3S [M-%]		9,84
Σβ-C2S [M-%]	5,85	4,14
Σα'-C2S [M-%]	9,18	0,09
α'-/β-C2S	1,57	0,02
ΣC3A [M-%]	0,34	0,25
ΣC4AF [M-%]	0,13	1,33
ΣAluminate [M-%]	0,47	1,58
ΣKlinkerphasen [M-%]	15,49	15,64
CaCO ₃ [M-%]	1,65	24,61
ΣCa(OH) ₂ [M-%]	0,79	3,79
CaO [M-%]	0,64	0,13
ΣSulfatträger [M-%]	0,33	1,09
ΣNebenphasen [M-%]	0,17	0,35
Σkristallin (ΣkPh) [M-%]	39,59	100,35
amorpher Anteil (aPh) [M-%]	60,41	0,00

6.3 Prüfung der Anwendungseigenschaften

6.3.1 Bindemittelbestimmung

Die Bestimmung der Zusammensetzung erfolgte gemäß den Vorgaben der DIN 52170-2:1980-03. Im ersten Schritt erfolgt die Ermittlung des Glühverlustes durch die Temperaturbehandlung bei 1.000 °C an einer darrtrockenen, repräsentativen Probenteilmenge. Der glühbeständige Anteil A der Probe wurde normgemäß mittels der Formel: $A = m_{A\ 1000^{\circ}\text{C}} / m_{E\ 105^{\circ}\text{C}} \times 100\ %$ berechnet. Das geglühte Probenmaterial diente anschließend zur Bestimmung des HCl-löslichen Anteils (Ca-haltige Komponenten) bzw. des unlöslichen Rückstands (Silikat-Komponenten) [DIN80].

Die nachfolgenden Tabellen 6.3.1.1, 6.3.1.2 und 6.3.1.3 listen den Glühverlust und den diesen berücksichtigenden Bindemittelgehalt sowie den HCl-löslichen Anteil des als Referenzmaterials dienenden Pflasterfugenmörtels, des Betonbrechsandes und des daraus erzeugten Recyclingmaterials, als RC-BS bezeichnet, auf. Demgemäß liegen die Gehalte an der Gesteinskörnung sowohl beim Ausgangsmaterial als auch beim thermisch behandelten Rezyklat und dem als Pflasterfugenmörtel herangezogenen Benchmarkprodukt über 75 %.

Tabelle 6.3.1.1: Bestimmung Bindemittelgehalt Ref.8.1 Pflasterfugenmörtel

Probe	Einwaage [g]	Auswaage [g]	Glühverlust [M.-%]	HCl löslich [M.-%]	Bindemittel- gehalt [M.-%]
Ref.8.1 P1	1,02	0,72	6,15	29,208	23,061
Ref.8.1 P2	1,07	0,76	6,36	28,852	22,494
Mittelwert			6,25	29,030	22,778

Tabelle 6.3.1.2: Bestimmung Bindemittelgehalt T5 BS

Probe	Einwaage [g]	Auswaage [g]	Glühverlust [M.-%]	HCl löslich [M.-%]	Bindemittel- gehalt [M.-%]
T5 P1	1,81	1,17	12,33	35,414	23,084
T5 P2	1,63	1,02	12,33	37,082	24,752
Mittelwert			12,33	36,248	23,918

Tabelle 6.3.1.3: Bestimmung Bindemittelgehalt T5.1 RC-BS

Probe	Einwaage [g]	Auswaage [g]	Glühverlust [M.-%]	HCl löslich [M.-%]	Bindemittel- gehalt [M.-%]
T5.1 P1	7,84	5,91	2,11	24,626	22,518
T5.1 P2	7,45	5,51	2,17	26,085	23,918
Mittelwert			2,14	25,356	23,218

6.3.2 Prüfung von Festigkeitskennwerten und Festigkeitsentwicklung

Wie die aus Tabelle 6.3.2.1 ersichtlichen Festigkeitswerte des nach der thermischen Behandlung dieses zuschlagreichen Gemischs erhaltenen rehydratisierten Produkts in Gegenüberstellung zum Referenzmaterial verdeutlichen, war dieses praktisch unbrauchbar. Maßgeblich hierfür durfte neben dem sehr hoch zu wählenden Wasserzementwert die zu grobe Körnung der nur ohne weitere mechanische Aufbereitung durch die Siebtrennung bei 2 mm gewonnenen Fraktion gewesen sein. Im Nachfolgenden wurde daher der Versuch unternommen, durch mechanische Aufbereitungsschritte ein Rezyklat praktischer Verwendbarkeit zu erhalten.

Tabelle 6.3.2.1: Zusammenstellung der Festigkeitskennwerte Serie 2

Serie 2		Festigkeitsbestimmung in Anlehnung an DIN EN 196-1									
Material	Bez.	$\rho_{\phi 28d}$ [g/cm ³]	w/z	δ_{2d}	δ_{7d} δ_{14d} δ_{28d}			δ_{2d}/δ_{28d}		δ_{28d} -analytisch	
					[N/mm ²]			r-Wert	Bewertung	s-Wert	Vergleich
PFM 0 - 2 mm	Ref.8.1	2,03	0,5	9,22	17,22	25,28	28,57	0,32	mittel	0,44	> 32,5N
RC BS 0 - 2 mm	T5.1	1,35	1,72	0,00	0,38	0,53	Abbruch				

6.3.3 Bestimmung der Korngrößenverteilung und Fraktionierung

Die DIN EN 933-1:1997-10 beschreibt ein Siebverfahren zur Ermittlung der Korngrößenverteilung von Gesteinskörnungen. Es wurde im nachfolgend Beschriebenen angewendet.

Die Siebung der Proben erfolgte als Trockensiebung. Für die Durchführung der Siebanalyse wurde die zu analysierende Probe auf das größte Prüfsieb aufgegeben und für eine vorgegebene Zeit einer definierten

Bewegung ausgesetzt. Durch das Auswiegen der Rückstände auf den einzelnen Prüfsieben wurde anschließend die Korngrößenverteilung der Probe ermittelt [14].

Für die Analyse des Brechsandzyklats wurden Prüfsiebe der Maschenweite 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125 und 0,063 (mm) verwendet.

Das o.g. Verfahren und der beschriebene Aufbau des Siebturmes fand neben der Charakterisierung der Korngrößenverteilung auch bei der Fraktionierung der Proben Anwendung.

Abb.6.3.3.1: Kornverteilungen der Brechsandfraktion 0-2 mm und des Pflasterfugenmörtels

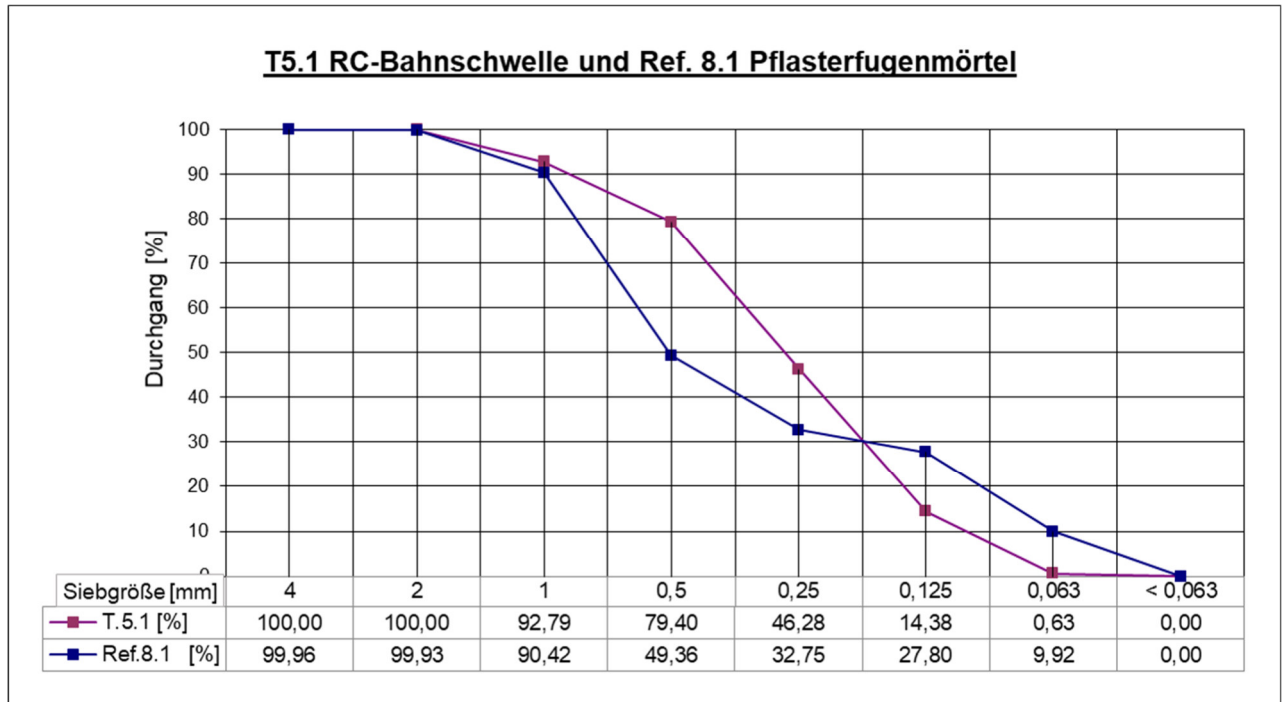


Tabelle 6.3.3.1: Vergleich Siebdurchgänge T5.1 und Ref.8.1

Siebgröße [mm]	Durchgang		Differenz [%]
	T.5.1 [%]	Ref.8.1 [%]	
4	100,00	99,96	
2	100,00	99,93	0,1%
1	92,79	90,42	2,6%
0,5	79,40	49,36	60,9%
0,25	46,28	32,75	41,3%
0,125	14,38	27,80	-48,3%
0,063	0,63	9,92	-93,7%
< 0,063	0,00	0,00	

Das Diagramm in Abbildung 6.3.3.1 und Tabelle 6.3.3.1 dokumentieren den Grad der Ähnlichkeit der Betonbrechsandfraktion 0 – 2 mm und des Benchmarkprodukts Pflasterfugenmörtel hinsichtlich der Körnungslinie beider Materialien.

6.4 Untersuchungen zur Verbesserung der Anwendungseigenschaften

6.4.1 Bindemittelanreicherung mittels Kugelsiebung

Das unter 3.3 beschriebene Verfahren wurde auch für die Versuche zur Bindemittelanreicherung mittels Kugelsiebung angewendet. Ziel dieser Versuchsreihe war eine möglichst sortenreine Trennung von Zuschlag und dehydratisiertem, porösen Zementstein durch die Nutzung der Aufprallenergie der ZrO_2 -Mahlkugeln während der Siebung. Eine als ungünstig zu wertende Erhöhung des Mehlkornanteils (inertler Zuschlaganteil $< 0,125$ mm) im Bindemittelzyklat infolge von Aufmahlung des Zuschlags war aufgrund der Härteunterschiede nicht zu erwarten. Variiert wurden u.a. die Position der Kugeln im Siebturm, die Intensität, das Intervall sowie die Laufzeit der Siebung. Nach jedem Durchlauf wurde der Durchgang $0,063$ mm entnommen, gewogen und für weitergehende Analysen zurückgestellt.

Tabelle 6.4.1.1: Positionierung der Mahl­kugeln

T5.1	ZrO ₂ - Mahl­kugeln		
	Durchmesser [mm ²]	Anzahl [-]	Position [mm]
M 1	15	60	0,5
	12	49	0,25
	10	137	0,125
	5	200	0,063
M 2	15	60	1
	12	49	0,5
	10	137	0,25
	5	200	0,125
M 3	15	60	1
	12	49	0,5
	10	137	0,25
	5	200	0,063



Abb.6.4.1.1: verwendete Analysensiebmaschine HAVER EML 200

Tabelle 6.4.1.2: Bindemittelanreicherung durch Kugelsiebung

T 5.3	Feinanteil			Parameter Kugelsiebung
	0,063 [M.-%]	< 0,063 [M.-%]	< 0,125 [M.-%]	
M 0	0,13	0,00	0,13	Stufe: 6; Intervall 3; Dauer: 5 min
M 1	2,45	0,23	2,68	Stufe: 6; Intervall 3; Dauer: 5 min
M 2	6,21	0,13	6,35	Stufe: 9; Intervall 9; Dauer: 10 min
M 3	6,36	0,15	6,52	Stufe: 9; Intervall 9; Dauer: 5 min
Anreicherung	15,02	0,52	15,54	

Tabelle 6.4.1.3: Vergleich der Klinkerphasenanteile der Produkte RC CEM und RC BE 2017 mit RC BS $< 0,125$ mm

	T5.3.1	T5.2	T6.4.1	T6.5
Trennverfahren	Kugelsiebung	Scheibenschwingmühle	Rührwerksmühle	Rührwerksmühle
ΣKlinkerphasen [M-%]	34,77	25,92	18,51	30,95
ΣMehlkorn [M-%]	65,14	74,09	81,49	69,06
Σkristallin [M-%]	99,90	100,01	100,00	100,00

6.4.2 Bindemittelanreicherung mittels autogenem Mahlverfahren

Die Scheibenschwingmühle (SSM) wurde in Serie 1 zur Zerkleinerung des dehydrierten, vorgebrochenen Probenmaterials RC-CEM eingesetzt. Die Mahlgarnitur bestand dabei aus Stahl und umfasst einen Mahlbecher, eine Mahlscheibe sowie zwei Mahlringe. Die im Becher befindlichen Mahlkörper üben durch die Schwingungsbewegungen des Antriebs extreme Druck-, Stoß- und Reibwirkungen auf das Mahlgut aus. Im Zuge der Versuchsreihe Serie 2 wurde, wie angesprochen, nach Möglichkeiten gesucht, Zuschlag und dehydrierten porösen Zementstein sortenrein zu trennen, d.h. die Energieeinwirkung auf das Betonrezyklat RC-BS während des Trenn- und Zerkleinerungs-verfahrens sollte günstigerweise nur die poröse Rezyklatmatrix, das Bindemittel, aufbrechen.

Die Rietveld-Auswertung der Proben aus dem Vorversuch ergab, dass bereits die Entnahme der mittig sitzenden Mahlscheibe zur Erhöhung des Siebdurchganges durch das 0,125 mm-Sieb, nicht aber zu einer signifikanten Steigerung des Quarzsandgehalts als Indikator für die Überführung größerer Bestandteile in die 0,125 mm-Feinfraktion der Betonbrechsandproben führte. Analog zur Rezyklat-gewinnung der Serie 1 wurden für den Mahlvorgang die Betriebsparameter zu 6 Minuten und 1400 U/min gewählt.

Tabelle 6.4.2.1: Bindemittelanreicherung durch autogenes Mahlen

T 5.2	Feinanteil		
	0,063 [M.-%]	< 0,063 [M.-%]	< 0,125 [M.-%]
SSM 0	1,13	0,31	1,44
SSM 1	4,87	0,36	5,23
SSM 2	7,63	0,13	7,76
Anreicherung	13,63	0,80	12,98



Abb.6.4.2.1: Mahlgarnitur der SSM ohne mittig sitzende Mahlscheibe

Im Anschluss an den Mahlvorgang wurde das Probenmaterial mittels Siebung in die Fraktionen < 0,125 mm sowie > 0,125 mm getrennt. Herstellung und Lagerung der Prüfkörper erfolgten in Anlehnung an die Vorgaben der DIN EN 196-1 [6].

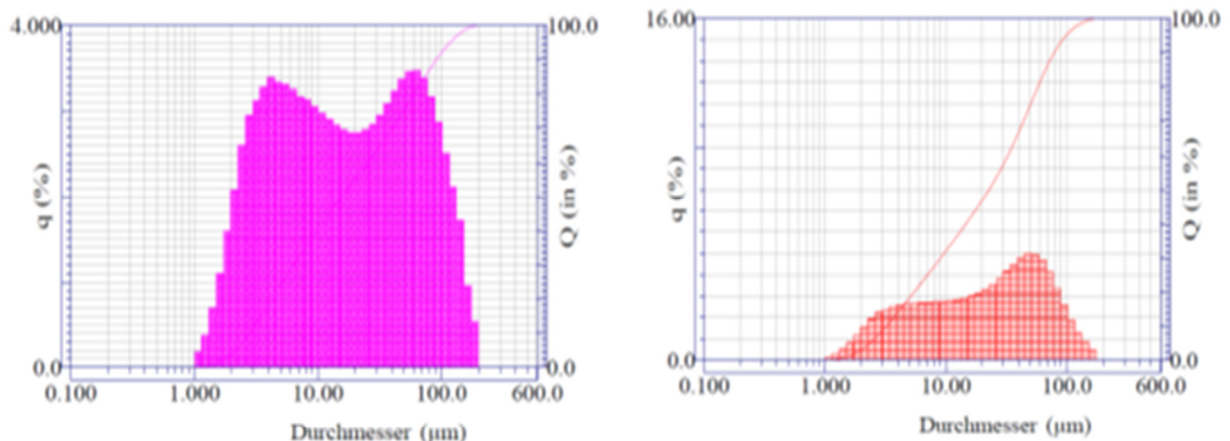


Abb.6.4.2.2: Gegenüberstellung der Partikelgrößenverteilung von Probe T5.1 (links) sowie T5.2 (rechts). Die lasergranulometrischen Messungen ergaben für T5.1 einen d90-Wert von 91,51 µm. Das Material T5.2 ist durch autogenes Mahlen mittels Scheibenschwingmühle aufbereitet worden und auf die Korngrößen < 0,125 mm beschränkt. Der d90-Wert ist mit 78,79 µm angegeben.

Die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen sind in Tabelle 6.4.2.2 sowie in dem Diagramm in Abbildung 6.4.2.3 dargestellt. Darüber hinaus sind der Tabelle 6.4.2.3 die lasergranulometrischen Kennwerte der diversen Aufbereitungsschritte des Brechsandzyklats und in Gegenüberstellung zum Benchmarkprodukt PFM (Probe Ref.8.2) die Ergebnisse der Rietveld-Phasenanalyse zu entnehmen: Der Technologie des Recyclingprozesses entsprechend tritt im RC-Zement kein Tricalciumsilikat C_3S („Alit“) auf. Das Benchmarkprodukt enthält dagegen Normzement als eine Komponente und weist daher dementsprechende C_3S -Gehalte auf.

Die Druckfestigkeit der Probe T5.2 entspricht etwa 60 % der Druckfestigkeit des Benchmarkprodukts Ref.8.2 der gleichen Korngrößenfraktion $< 0,125$ mm. Auf Basis der unter der Bezeichnung Walz-Diagramme bekannten Zusammenhänge zwischen Wasserzementwert und Festigkeit lässt sich abschätzen, dass mit dem Absenken des Wasserzementwerts auf 1,15 anstelle 1,75 ein Anstieg der 28-Tagefestigkeit vom Messwert $9,05$ N/mm^2 auf ca. $12,5$ N/mm^2 zu erwarten ist. Sofern eine weitere w/z-Vertabsenkung, z.B. auf 0,8, ermöglicht werden kann, dürfte daraus eine Druckfestigkeit von etwa 21 N/mm^2 resultieren. Zielführend wären hier entsprechende Versuche unter Verwendung von Betonzusatzmitteln wie Betonverflüssigern oder Fließmitteln, die im Rahmen der Arbeiten dieses Abschnitts nicht mehr durchzuführen waren.

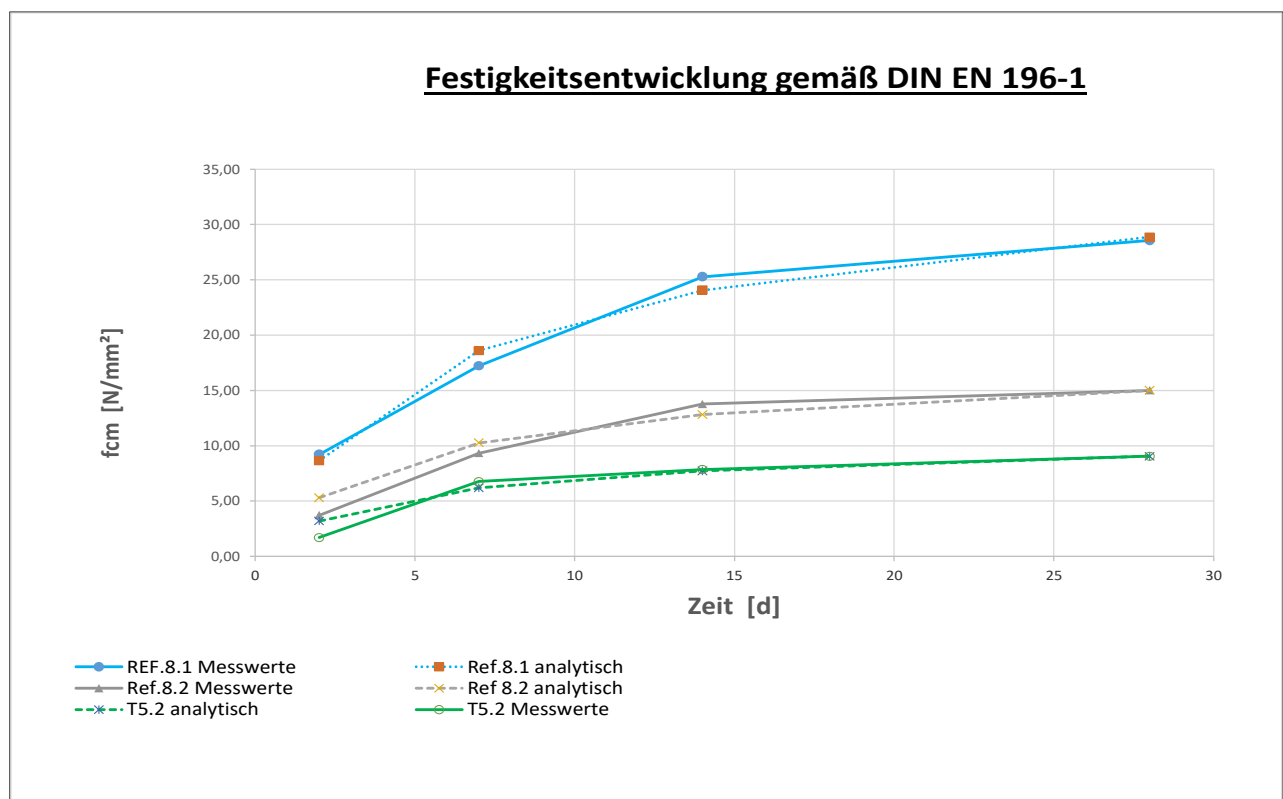


Abb. 6.4.2.3: Gegenüberstellung der Festigkeitsentwicklungskurven Serie 2. Berechnung der als analytisch gekennzeichneten Werte mittels analytischer Funktion $f_{cm}(t) = f_{cm}(28) \cdot \exp(s \cdot (1 - \sqrt{28/t}))$

Tabelle 6.4.2.3: Phasenanalyse zur Bestimmung der Bindemittelanreicherung durch Kugelsiebung sowie Autogenvermahlungs mittels SSM (Serie 2)

	T5.3.1	T5.3.2	T5.2	Ref.8.2
Trennverfahren	Kugel-siebung	Kugel-siebung	Scheiben-schwingmüh-le	Siebung
Fraktion [mm]	< 0,125	> 1	< 0,125	< 0,125
spez. Oberfläche [cm²/g]	6456,60	n.b.	6573,00	n.b.
d10 [µm]	34,82	n.b.	32,21	n.b.
d50 [µm]	197,15	n.b.	227,59	n.b.
d90 [µm]	765,55	n.b.	787,90	n.b.
Rwp	6,025	10,514	10,326	4,268
ΣZuschlag [M-%]	44,16	80,10	51,65	1,68
ΣC3S [M-%]	0,00	0,00	0,00	25,57
Σβ-C2S [M-%]	8,00	2,53	3,95	7,55
Σα'-C2S [M-%]	25,32	6,39	11,79	5,57
α'-/β-C2S	3,17	2,53	2,98	0,74
ΣC3A [M-%]	0,81	0,22	2,69	0,20
ΣC4AF [M-%]	0,65	0,00	0,58	5,08
ΣAluminate [M-%]	1,46	0,22	3,27	5,29
ΣKlinkerphasen [M-%]	34,77	9,13	19,01	43,97
CaCO₃ [M-%]	19,22	8,78	0,08	51,29
ΣCa(OH)₂ [M-%]	0,00	0,44	2,11	0,34
CaO [M-%]	0,00	0,09	0,00	0,05
ΣSulfatträger [M-%]	1,37	1,40	0,00	2,51
ΣNebenphasen [M-%]	0,39	0,06	0,51	0,00
Σkristallin (ΣkPh) [M-%]	99,90	100,00	73,36	99,85
amorpher Anteil (aPh) [M-%]	0,00	0,00	26,65	0,15

7. Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse und Einordnung

Im Rahmen dieses Projekts wurden im ersten Teil des laborexperimentellen Versuchsprogramms Untersuchungen zu den Charakteristiken von Recyclingbindemitteln aus Zementstein als Modell der Bindephase von (Alt-)Betonen durchgeführt sowie Maßnahmen zur Anpassung dieser an die Erfordernisse der praktischen Anwendung im Bauwesen. Hierbei fanden auch die Untersuchungsergebnisse früherer eigener Versuchsreihen Beachtung. Die Untersuchungen wurden vergleichend mit normgemäßen, marktüblichen Zementen vorgenommen.

Dabei hat sich gezeigt, dass dem Grad der mechanischen Aufbereitung, der Mahlfineinheit, wie sie in Abhängigkeit von den gewählten Zerkleinerungsaggregaten und deren Betriebsweise zu erzielen ist, maßgebliche Bedeutung zukommt. Routinemäßig sind etwa zwei Drittel der 28 Tage-Festigkeit derjenigen von Prüfkörpern auf Normzementbasis gleichen Wasserzementwerts zu erreichen, bei entsprechend hohem Zerkleinerungsaufwand z.B. zur Darstellung des gleichen Feinheitsgrades konventioneller Normzemente, jedoch auch deutlich mehr. Die Festigkeitsentwicklung des RC-Zements entspricht trotz des Fehlens des für Normzemente maßgeblichen Tricalciumsilikatgehalts in ihrem zeitlichen Verlauf praktisch demjenigen von CEM I- oder CEM II-Zementen.

Charakteristisch für RC-Zement ist die ausgeprägte Mikroporosität der einzelnen Partikel, die einen höheren Wasseranspruch gegenüber konventionellen Zementen bewirkt und somit höhere Wassermenge zur Gewährleistung der Verarbeitbarkeit erforderlich macht. Dieses Phänomen begrenzt angesichts der bekannten Abhängigkeit der Druckfestigkeit von zementgebundenen Baustoffen von diesem bedeutsamen betontechnologischen Kennwert das generelle Festigkeitsniveau. Wie die Untersuchungen jedoch gezeigt haben, ermöglicht die Zugabe von verflüssigend wirkenden, am Markt eingeführten Zusatzmitteln, wie Betonverflüssigern (BV) oder Fließmitteln (FM), auch beim RC-Zement eine deutliche Absenkung des zur Verarbeitung erforderlichen w/z-Werts mit der Folge, dass das mit moderaten w/z-Werten verbundene Festigkeitsniveau zielsicher erreicht wird. Damit konnte der Nachweis erbracht werden, dass RC-Zement als signifikant nachhaltigeres hydraulisches Bindemittel, als es die eingeführten Normzemente auf Portlandzementklinkerbasis sind, in zahlreichen Anwendungen als Ersatz für herkömmliche Zemente eingesetzt werden kann.

Im zweiten Teil der Untersuchungen diente ein praxisentlehnter Betonbrechsand aus dem Rückbau von Spannbetonschwellen als Basis für die Gewinnung eines Recyclingbindemittels, das verfahrensbedingt neben hydraulisch aktiven maßgeblich auch inerte Bestandteile aus der ursprünglichen Gesteinskörnung (Zuschlag) enthält. Dabei wurden diverse Anreicherungstechniken zur Erhöhung des hydraulisch aktiven Anteils angewendet, wobei sich die Kugelsiebung als günstigste erwiesen hat. Die vorstehend für das Modellsystem „reiner Zementstein“ beschriebenen Sachverhalte haben sich dabei weitestgehend bestätigt, so dass die Formulierung marktgängiger Produkte mit Recyclingzementen aus Betonbrechsanden möglich geworden ist.

8. Literaturverzeichnis Teil I

- [DAf10] DAfStb-Richtlinie: *Beton nach DIN EN206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620*. Beuth, Ausgabe September 2010.
- [Kre20] Kreislaufwirtschaftsgesetz. Letzte Änderung 23.Oktober 2020 (BGBl I S. 2232).
- [SW00] Stark, J.; Wicht, B.: *Zement und Kalk. Der Baustoff als Werkstoff*. Birkhäuser Verlag. Basel, 2000.
- [Loc00] Locher, F.W.: *Zement: Grundlagen der Herstellung und Verwendung*. Verlag Bau+Technik. Düsseldorf, 2000.
- [DIN11] DIN EN 197-1:2011-11: *Zement – Teil 1: Zusammensetzung. Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement*. Beuth-Verlag. Berlin, 2011.
- [DIN16] DIN EN 196-1:2016-11: *Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit*. Beuth Verlag. Berlin, 2016.
- [GS01] Grübl, P.; Weigler, H. ; Sieghart, K.: *Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften*. 2. Auflage. Berlin. Ernst und Sohn, 2001.
- [DIN19] DIN EN 196-1:2019-06: *Prüfverfahren für Zement – Teil 6: Bestimmung der Mahlfineinheit*. Beuth Verlag. Berlin, 2019.
- [Tay03] Taylor, H.F.W.: *Cement Chemistry*. 2nd ed. Telford Publishers. London, 2003.
- [Sch17] Scholten, Tilman: *Reaktionskinetik von sulfatischen Klinkerphasen in Zementen mit verminderter CO₂-Last*. Diss. TU Clausthal, 2017.
- [DIN10] DIN EN 196-9:2010-07: *Prüfverfahren für Zement – Teil 9: Hydratationswärme – Teiladiabatisches Verfahren*. Beuth-Verlag. Berlin, 2010.
- [Len13] Lengauer C.L.: *Mechanische Werkstoffe II/ Zemente: Schulungsunterlagen*; Universität Wien; Wien, 2013.
- [DIN17] DIN EN 196-3:2017-03: *Prüfverfahren für Zement – Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit*. Beuth Verlag. Berlin, 2017.
- [DIN80] DIN 52170-2:1980-02: *Bestimmung der Zusammensetzung von erhärtetem Beton; Salzsäureunlöslicher und kalkstein- und/oder dolomithaltiger Zuschlag, Ausgangsstoffe nicht verfügbar*. Beuth Verlag. Berlin, 1980.

Erklärung: Alle Tabellen, Diagramme und Abbildungen wurden im Rahmen des Projektes von den Bearbeitern erstellt.

Tabelle Anhang 1: Übersicht Probenbezeichnung und Versuchs-schema

Projekt	Serie	Code	interne Bezeichnung	Beschreibung	LSG	f _{ck}	DTA	RFA	XRD		
RC 2.0	Serie 1	T1.1	CEM I 52,5 N	CEM I 52,5 N	Ausgangsmaterial: Dyckerhoff Portlandzement CEM I 52,5N	X	X	X	X		
		T2.1 a + b	CEM I 52,5N_Hydra-Rehydra	hydratisiert; Alter: 28d; a: Zementstein (1:0,8); b: Mörtel (1:3:0,8)						X	
		T2.2 a + b	RC CEM I 52,5 N_Hydra-Rehydra	hydratisiert; Alter: 28d; a: RC-Stein (1:0,8); b: Mörtel (1:3:0,8); Bestimmung CaO-Gehalt; unverzüglich XRD-Messung nach tb							X
		T3.1	RC CEM I 52,5N_700-120_XRD CaO	SSM; Standard-H; Abkühlung sowie Lagerung Laborklima							X
		T3.2	RC CEM I 52,5N_700-120_Air	SSM; Standard; Streupräparat; Exxs							X
		T3.3	RC CEM I 52,5N_700-120_großflächig	Standard-H; Exxs, SSM							X
		T3.4.1 - T3.4.10	RC CEM I 52,5N_700-120_ Ex	Mörtelmischung; w/z = 1,0		X		X	X	X	
		T3.4-M 1,0	RC CEM I 52,5N_1,0	Mörtelmischung; w/z = 0,8							
		T3.4-M 0,8	RC CEM I 52,5N_0,8	Prüfmörtel mit Betonverflüssiger (4 M.-% auf BM); w/z = 0,6							
		T3.4-M/0,6+BV	RC CEM I 52,5N_BV 0,6	Prüfmörtel mit Betonverflüssiger (4 M.-% auf BM); w/z = 0,7							
		T3.4-M/0,7+BV	RC CEM I 52,5N_BV 0,7	Prüfmörtel mit Fließmittel (2,5 M.-% auf BM); w/z = 0,7							
		T3.4-M/0,7+FM	RC CEM I 52,5N_FM 0,7	OVEN: SSM; StartTemp = 700 °C; Standard-H; EndTemp = 25 °C; Exxs							X
		T4.1.1	RC CEM I 52,5N_700-200_AKR	OVEN: SSM; StartTemp = 25 °C; Standard-H; EndTemp = 25 °C; Exxs							X
		T4.1.2 - T4.1.3	RC CEM I 52,5N_700-120_AHR-AKR	TIME: SSM; 700-360-H; Exxs							X
		T4.2.1	RC CEM I 52,5N_700-360	TIME: SSM; 900-360-H; Exxs							X
T4.2.2	RC CEM I 52,5N_900-360	TEMP: SSM; StartTemp = 25 °C; 750-120-H; EndTemp = 25 °C; Exxs							X		
T4.3.1	RC CEM I 52,5N_750-120_AHR-AKR	TEMP: SSM; StartTemp = 25 °C; 800-120-H; EndTemp = 25 °C; Exxs							X		
T4.3.2	RC CEM I 52,5N_800-120_AHR-AKR	TEMP: SSM; StartTemp = 25 °C; 850-120-H; EndTemp = 25 °C; Exxs							X		
T4.3.3	RC CEM I 52,5N_850-120_AHR-AKR	TEMP: SSM; 900-120-H; Exxs							X		
T4.3.4	RC CEM I 52,5N_900-120	MILE: Backenbrecher_Retsch-Inputt; Standard-H		X					X		
T4.4.1 - T4.4.9	RC CEM I 52,5N_700-200_Retsch Input	MILE: Standard-H; Retsch-WC		X					X		
T4.5.1 - T4.5.6	WC1_CaF1_90-10	MILE: Standard-H; Retsch-ZrO2		X					X		
T4.6.1 - T4.6.5	ZrO2_CaF1_90-10	Recyclat Betonbrechsaug, gesiebt > 2mm		X					X		
T5.1	RC BS-KM < 0,063	SSM (selektiv), fraktioniert < 0,163 mm		X					X		
T5.2	RC BS-SSM < 0,063	Kugelsiebung, (KS) fraktioniert > 1mm		X					X		
T5.3	RC Zuschlag-KS > 1 mm								X		

Tabelle Anhang 1: Übersicht Probenbezeichnung und Versuchsschema

Projekt	Serie	Code	interne Bezeichnung	Beschreibung	LSG	f _{ck}	DTA	RFA	XRD
FaserZementRC	Serie 3	T6.1	Faserzement_700-120_gemahlen	SSM; Standard-H; Abkühlung sowie Lagerung Laborklima		X			X
FaserZementRC		T6.2	Probe 16	StartTemp = 25° C; Standard; Platte; EndTemp = 25° C; ESM	X	X			X
RC CEM		T6.3	Probe 17	StartTemp = 25° C; Standard; Platte; EndTemp = 25° C; ESM	vorgebrochen; 700-90; RWM; Abkühlung sowie Lagerung Laborklima	X	X		X
RC Stoy		T6.4	Probe M2	Bahnschwelle_Stoy_700-90	700-90-H; RWM; Abkühlung sowie Lagerung Laborklima		X		X
		T6.5		CEM I 42,5R	Portlandzement	X	X		X
	Ref. 1		CEM II/B-S 32,5R	Portlandhüttenzement	X	X		X	
	Ref. 2		CEM III/A 32,5N-LH/NA	Hochofenzement	X	X			
	Ref. 3		CEM III/B 32,5N-LH/SR/NA	Hochofenzement	X	X			
	Ref. 4		CEM II/B-L 32,5R	Portlandkalkzement		X	X	X	X
	Ref. 5		HDI Binder	HDI-BINDER (Fertigmischungen für das Düsenstrahlverfahren)	X	X			X
	Ref. 6		Dämmmer S	DÄMMER S (Fertigmischung zur Hohlraumverfüllung)	X				X
	Ref. 7		PFM	Pflasterfugenmörtel (PFM) 0-2 mm	X	X			X
	Ref. 8.1		PFM > 0,125	PFM (inert: ca. 51 M.-% CaCO ₃), fraktioniert < 0,125mm	X	X			X
	Ref. 8.2		CaO-Gehalt 6%	Referenzkurve für 6 M.-% Feikalk und 96 M.-% Sand					
	T10.1		CaO-Gehalt 12%	Referenzkurve für 12 M.-% Feikalk und 88 M.-% Sand					
	T10.2								

Tabelle Anhang 2: Ergebnisse der Korrelationsanalyse zum Einfluß der Mühlenrechnik

	d10 [µm]	d50 [µm]	d90 [µm]	α-C2S [M-%]	α / β C2S	C3A [M-%]	Ca(OH)2 [M-%]	CaO [M-%]	amorpher Anteil [M-%]	Zeit: Δt [min]	Temperaturdifferenz: ΔT [°C]	freigesetzte Wärmemenge: Q [J]	Korrelationskoeffizienten
T4.4	3,03	30,20	186,63	21,44	0,91	6,17	6,91	0,00	34,03	26,00	7,10	351,02	
T4.6	3,77	9,42	29,91	17,76	1,17	3,61	6,94	0,03	41,13	18,00	9,50	469,68	
T4.5	4,78	9,97	21,35	8,85	0,65	2,16	3,04	2,62	61,68	10,00	18,60	919,58	
d10 [µm]	1	-,803	-,842	-,990	-,566	-,968	-,906	-,912	-,984	-,996	-,973	-,973	Pearson
	3	-,203	-,181	-,046	-,308	-,080	-,139	-,135	-,058	-,029	-,074	-,074	Signifikanz
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	N
d50 [µm]	1	-,803	-,998	-,709	-,037	-,926	-,475	-,486	-,682	-,854	-,644	-,644	Pearson
	3	-,203	-,022	-,249	-,488	-,123	-,343	-,338	-,261	-,174	-,277	-,277	Signifikanz
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	N
d90 [µm]	1	-,842	-,998	-,756	-,032	-,950	-,534	-,546	-,731	-,888	-,695	-,695	Pearson
	3	-,181	-,022	-,227	-,490	-,101	-,321	-,316	-,239	-,152	-,255	-,255	Signifikanz
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	N
α-C2S [M-%]	1	-,990	-,709	-,756	1	-,923	-,957	-,961	-,999	-,972	-,996	-,996	Pearson
	3	-,046	-,249	-,227	-,263	-,126	-,094	-,089	-,012	-,075	-,028	-,028	Signifikanz
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	N
α / β C2S [-]	1	-,566	-,037	-,678	1	-,343	-,862	-,855	-,706	-,488	-,741	-,741	Pearson
	3	-,308	-,488	-,490	-,263	-,389	-,169	-,173	-,251	-,338	-,234	-,234	Signifikanz
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	N
C3A [M-%]	1	-,968	-,926	-,923	-,343	1	-,772	-,780	-,907	-,987	-,885	-,885	Pearson
	3	-,080	-,123	-,101	-,126	-,389	-,219	-,215	-,138	-,051	-,154	-,154	Signifikanz
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	N
Ca(OH)2 [M-%]	1	-,906	-,475	-,534	-,957	-,772	1	-,1000	-,968	-,863	-,979	-,979	Pearson
	3	-,139	-,343	-,321	-,094	-,219	1	-,004	-,081	-,169	-,065	-,065	Signifikanz
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	N
CaO [M-%]	1	-,912	-,486	-,546	-,961	-,780	-,1000	1	-,971	-,870	-,982	-,982	Pearson
	3	-,135	-,338	-,316	-,089	-,173	-,004	-,077	-,164	-,061	-,061	-,061	Signifikanz
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	N
amorpher Anteil [M-%]	1	-,984	-,682	-,731	-,706	-,907	-,968	-,971	1	-,963	-,999	-,999	Pearson
	3	-,058	-,261	-,239	-,251	-,138	-,081	-,077	-,087	-,087	-,016	-,016	Signifikanz
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	N
Zeit Δt [min]	1	-,996	-,854	-,888	-,972	-,987	-,863	-,870	-,963	1	-,948	-,948	Pearson
	3	-,029	-,174	-,152	-,075	-,051	-,169	-,164	-,087	-,103	-,103	-,103	Signifikanz
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	N
Temperaturdifferenz ΔT [°C]	1	-,973	-,644	-,695	-,996	-,741	-,979	-,982	-,999	-,948	1	1,000	Pearson
	3	-,074	-,277	-,255	-,028	-,234	-,065	-,061	-,016	-,103	-,103	-,000	Signifikanz
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	N
freigesetzte Wärmemenge Q [J]	1	-,973	-,644	-,695	-,996	-,741	-,979	-,982	-,999	-,948	1,000	1,000	Pearson
	3	-,074	-,277	-,255	-,028	-,234	-,065	-,061	-,016	-,103	-,103	-,000	Signifikanz
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	N

Ökobilanz der Recyclingbaustoffe aus dem Upcycling von Betonabfällen

Vorbemerkung:

Teil I des vorliegenden Projektberichtes enthält die Ergebnisse aus den materialwissenschaftlichen Untersuchungen zur Struktur von Recyclingzementen sowie Materialprüfungen zur Entwicklung von Pilotprodukten. Im vorliegenden Teil II wird ausführlich auf die Umweltbilanz der neuen RC-Baustoffe eingegangen, da diese einen wesentlichen Bestandteil des Projektinhalts darstellt und gleichermaßen als zentrales Instrument bei der Bewertung und Vermarktung der neuen Technologie verwendet werden wird.

1. Ausgangssituation, Zielsetzung und Aufgabenstellung

Bei der Darstellung der Ökobilanz ist zu unterscheiden zwischen stofflich und verfahrenstechnisch bedingten Umweltbelastungen der neuen Technologie. Dabei beziehen sich die verfahrenstechnischen Kriterien insbesondere auf den Energiebedarf der Anlagenkomponenten und der Prozesssteuerung, während die materialbezogene Ökobilanz maßgeblich vom Energiebedarf für thermisch initiierte Phasenumwandlungen sowie von der Mahlbarkeit der RC-Materialien bestimmt wird. Darüber hinaus ist zur übergreifenden Darstellung der Umweltbilanz die enge Verzahnung von Prozesstechnik/-führung und Materialeigenschaften bei der ökologischen Gesamtbewertung der Technologie zu beachten.

Grundlage zur Ermittlung der Ökobilanz ist die im vorausgegangenen Projekt an Brechsanden entwickelte Verfahrenstechnik [BT17-1; BT17-2]. In den folgenden Darstellungen werden sämtliche Spezifikationen der Anlagentechnik sowie des Brechsands und der Recyclingbaustoffe aus diesem Projekt übernommen und durch die Ergebnisse aus zusätzlichen Materialuntersuchungen des vorliegenden Projektes ergänzt.

Die Darstellung und Bewertung der Ökobilanz des Upcyclings von Betonabfällen erfolgt hinsichtlich der Kriterien

- Ressourcenschutz
- Energieeffizienz
- CO₂-Emissionen

als die zentralen Merkmale, da diese die Umweltbilanz der konventionellen Zementproduktion massiv belasten und die neue Technologie einen wesentlichen Beitrag zur Lösung dieser Probleme in der nationalen und internationalen Zementindustrie leisten soll. Die ausführliche Beschreibung und Evaluierung der o.g. umweltrelevanten Kriterien erfolgen in den nachstehenden Darstellungen bei der Ermittlung der jeweiligen Kennwerte.

2. Spezifikation der Materialien und Prozesstechnik

2.1 Ausgangsmaterial

Ziele der bisherigen Technologieentwicklung sowie des vorliegenden Projektes zu Strukturuntersuchungen von Recyclingzementen ist die Darstellung einer neuen Recyclingtechnologie, die es erlaubt, hochwertige Zementersatzstoffe aus der Aufbereitung von Betonabfällen zu erzeugen. Als Aufgabegut zur Entwicklung der Prozesstechnik wurde Brechsand aus der Aufbereitung von Bahnschwellen aus Spannbeton eingesetzt [BT17-2]. Abb. 1 zeigt die Spezifikationen des Aufgabeguts, das in dem Projekt als Beispiel für gebrochene Betonabfälle aus dem Rückbau von Ingenieurbauwerken etc. eingesetzt wurde. Ausgehend von diesem Material wird die Umweltbilanz für die Aufbereitung von Betonabfällen im Sinne eines Upscalings ermittelt, um das Gesamtpotential und die Bedeutung der neuen Technologie für den Umweltschutz zu quantifizieren.

Ausgangsmaterial Betonbrechsand

Koppelprodukt aus konventioneller Aufbereitung von Bahnschwellen



Spezifikation

Größtkorn (GK): ca. 8 mm
Schüttdichte: 1,44 g/cm³
Bindemittelgehalt: ca. 21 %

Kornverteilung

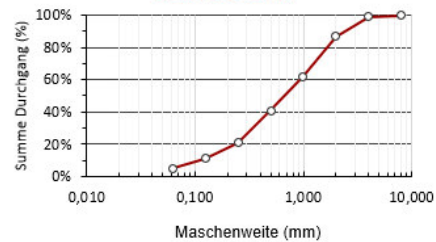


Abb. 1: Spezifikation des Brechsands [BT17-2]

2.2 Prozesstechnik

Die entwickelte Prozesstechnik zum Upcycling des Brechsands resp. Betonabfalls ist unterteilt in die Abschnitte

- (1) thermische Aufbereitung einschließlich selektiver Mahlung und Siebung des Aufgabeguts zur Gewinnung der Vorprodukte RC-CEM und RC-GSK,
- (2) thermische Behandlung und Feinmahlung des Vorprodukts RC-CEM, z.B. auf die Feinheit handelsüblicher Zemente, zur Darstellung der gewünschten Mahlfeinheit des Endproduktes Recyclingzement,
- (3) Siebung des Vorprodukts RC-GSK zur Klassierung der Recyclinggesteinskörnungen in vorgegebene Kornfraktionen.

Analog zur Vorgehensweise bei der Technologieentwicklung wird bei der folgenden Ermittlung der Ökobilanz davon ausgegangen, dass das Upcycling des Aufgabeguts auf Basis einer einmaligen thermischen Behandlung vor dem ersten Mahlprozess erfolgt. In dieser – als Einphasenverfahren bezeichneten Prozessführung – werden die thermische Konditionierung des Brechsands zur Reduzierung seiner Gefügefestigkeit als Vorbereitung für das selektive Mahlen gemäß (1) sowie die thermische Behandlung des Vorprodukts RC-CEM gemäß (2) zur Rückgewinnung der hydraulisch wirksamen Phasen im Zementsteinmehl in einem Prozessschritt zusammengefasst. Dabei ist das Temperaturniveau auf das erforderliche Maximum dieser Vorbehandlungen abzustimmen, das bei $T = 700\text{ °C}$ liegt (Abb. 2).






Prozessschritt				weitere Verarbeitung	Endprodukte
	thermische Behandlung	selektives Mahlen	Sieben		
Material	Brechsand			 Vorprodukt RC-CEM	RC-CEM
				Feinmahlung	
			 Vorprodukt RC-GSK	RC-GSK	
			Siebung		

Abb. 2: Prozessschritte zum Upcycling von Brechsanden (Einphasenverfahren)

Der thermische Energiebedarf für das Einphasenverfahren stellt den maximal erforderlichen Energieaufwand des Upcyclings dar. Mit Blick auf den wirtschaftlichen Betrieb einer Aufbereitungsanlage in der Recyclingpraxis ist zu prüfen, inwieweit durch eine differenziertere thermische Prozessführung die Wirtschaftlichkeit der Technologie optimiert werden kann. So erlaubt beispielsweise eine separate thermische Aufbereitung des Brechsands auf vergleichsweise niedrigem Niveau und die thermische Behandlung des Vorprodukts RC-CEM auf höherem Niveau zwar einen gezielteren Energieeinsatz [BT17-2], jedoch können damit einhergehende etwaige Kostenvorteile dieses Zweiphasenverfahrens durch höhere Kosten (Investitionen) für separate Ofenanlagen ggf. kompensiert oder gar überschritten werden. Die technisch und wirtschaftlich optimale Auslegung einer Aufbereitungsanlage für die Recyclingpraxis ist daher Gegenstand einer umfassenden Feasibility Study und wird im vorliegenden Projekt nicht weiterverfolgt.

2.3 Endprodukte (RC-Baustoffe)

Aus dem Upcycling des Brechsands wurden ca. 34 % Recyclingzement (RC-CEM) mit einem max. Bindemittelgehalt von 51 % gewonnen (Abb. 3). Die ca. 66 % verbleibenden Recyclinggesteinskörnungen wurden im vorliegenden Fall in zwei Korngruppen fraktioniert, um einen ersten Überblick über die korngößenabhängige Qualität der RC-GSK hinsichtlich des anhaftenden Zementsteinanteils zu erhalten. Dieser beträgt bei der Korngruppe RC-GSK (fein) ca. 11 %, bei der vergleichsweise groben Kornfraktion RC-GSK (grob) lediglich noch ca. 4 %. Etwaige qualitativ minderwertige Koppelprodukte und/oder unverwertbare Restmengen des Aufgabeguts fallen nicht an, vielmehr liegt die Abfallverwertungsquote bei 100 %.



Abb. 3: Spezifikation der RC-Baustoffe aus dem Upcycling des Brechsands

3. Ressourcenschutz

3.1 Recyclingzement

Ausweislich der Ergebnisse aus Teil 1 des vorliegenden Projektes kann mit Recyclingzementen ein Festigkeitsniveau erzielt werden, das konservativ abgeschätzt ca. 90 % desjenigen eines konventionellen Zementes erreicht [HSW21]. Es wird erwartet, dass durch eine Optimierung der mechanischen Aufbereitung, insbesondere mittels innovativer energieeffizienter Zerkleinerungstechniken, höhere Mahlfineheiten des RC-CEM und in deren Folge Früh- und Endfestigkeiten erzielt werden können, die der Festigkeitsentwicklung eines Zementes der Festigkeitsklasse 32,5 entsprechen. Mit Blick auf den angestrebten Schutz natürlicher Rohstoffvorkommen bedeutet dies, dass die Recyclingzemente als gleichwertiger Ersatzstoff für konventionelle Zemente verwendet werden können, jedoch im Gegensatz zur konventionellen Zementproduktion auf den Einsatz natürlicher Rohstoffe verzichtet werden kann, da beim Upcycling ausschließlich Abfälle verwendet werden.

Die Bedeutung der neuen Technologie für den Ressourcenschutz wird anhand der Angaben zum Bedarf der Zementproduktion an natürlichen Rohstoffen dargestellt. In Deutschland wurden nach Angaben des Vereins Deutscher Zementwerke (VDZ) im Jahr 2019 ca. 43 Mio. t Primärrohstoffe (im Wesentlichen Kalkstein, Ton bzw. Mergel) sowie ca. 7,7 Mio. t alternative Rohstoffe - sogenannte Klinkerersatzstoffe, wie z.B. Hüttsand - zur Herstellung von ca. 34,2 Mio. t Zement eingesetzt [VDZ19]. Der hohe Bedarf an natürlichen Rohstoffen spiegelt sich im daraus resultierenden Verhältnis von Primärrohstoffen/Zement mit ca. 1,26 t/t Zement wider (Abb. 4).

Einsatz Primärrohstoffe zur CEM-Produktion (1.000 t/a)*	
Kalkstein/Mergel/ Kreide	39.544
Sand	1.107
Ton	612
Ölschiefer	156
Trass	36
natürl. Gips	867
natürl. Anhydrit	674
Summe	42.996
CEM-Produktion	34.186
Quote	1,26

*VDZ Umweltdaten 2019 [4]

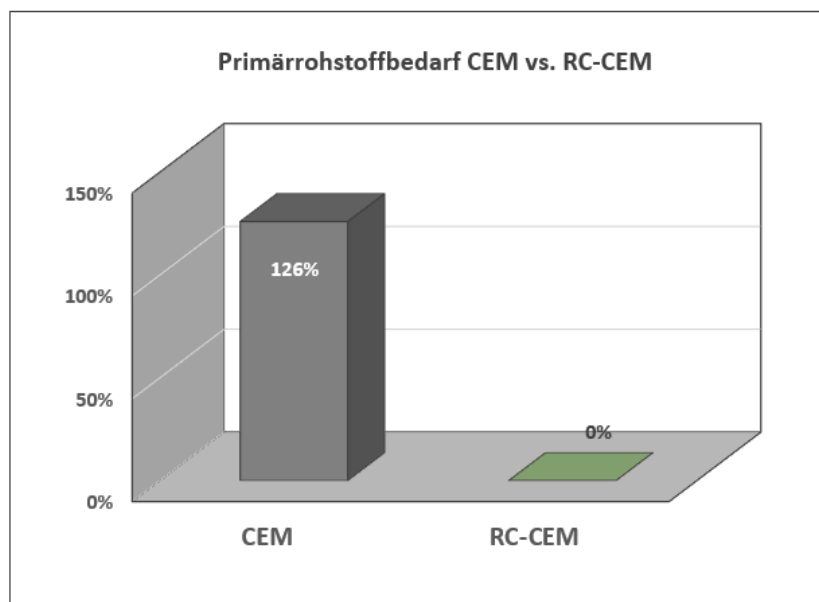


Abb. 4: Bedarf an natürlichen Rohstoffen (Primärrohstoffe) bei der Herstellung von Zement (CEM) und Recyclingzement (RC-CEM)

Das absolute Einsparungspotential für die Primärrohstoffe wird anhand der Angaben zum Betonabfallaufkommen in Deutschland abgeschätzt. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes [StBa19] fallen jährlich ca. 24,6 Mio. t Betonabfälle an. Im Falle der Verwertung werden die Abfälle im Zuge des sogenannten Downcyclings zu RC-Körnungen gebrochen, deren Anwendungsbereich jedoch auf Grund ihrer vergleichsweise geringen mechanisch-physikalischen Qualität auf untergeordnete Anwendungen z.B. im Tiefbau begrenzt bleibt. Beim Brechen der Betonabfälle fallen zudem in der Regel 20 bis 40 %, in Einzelfällen bis zu 50 % Brechsand mit Korngrößen bis zu 8 mm als Koppelprodukte an, deren Recyclingpotential ungenutzt bleibt und die mangels Verwendungsmöglichkeit oftmals zu entsorgen sind. Im Folgenden wird von einem konservativ geschätzten Brechsandanteil von 30 % mit einem Feuchtgehalt von ca. 5 % ausgegangen, so dass jährlich ca. 7,0 Mio. t trockener Brechsand zu verwerten sind. Bei einer Ausbeute für den Recyclingzement von 34 % (Abb. 3) können durch das Upcycling des Brechsands ca. 2,4 Mio. t/a RC-CEM hergestellt und damit ca. 3,0 Mio. t/a natürliche Rohstoffe eingespart werden (Tabelle 1).

Das hohe Entlastungspotential der neuen Recyclingtechnologie für den Rohstoffabbau wird durch das Upscaling der Technologie auf die Wiederverwertung des gesamten Betonabfalls deutlich. In diesem Fall steht die gesamte Betonabfallmenge in Höhe von jährlich ca. 24,6 Mio. t als Verfahrensinput zur Verfügung. Unter der realistischen Annahme, dass der Betonabfall durchschnittlich einen Zementgehalt von 140 kg/t Beton enthält und der Recyclingzement zu jeweils ca. 50 % aus Bindemittel und inertem Feinstmehl besteht, ergibt sich für den Recyclingzement ein Mengenpotential von 28 % bzw. 6,6 Mio. t RC-CEM/a, so dass auf den Abbau von ca. 8,3 Mio. t/a Primärrohstoffe für die Zementproduktion verzichtet werden kann.

Abfall		24,6 Mio. t Betonabfall/a		
Aufgabegut Upcycling	Material		Brechsand	Betonabfall
	Menge	%	ca. 30 %	100 %
		t/a	ca. 7,4 Mio. t	ca. 24,6 Mio. t
		Feuchtegehalt	ca. 5 %	ca. 5 %
			ca. 0,4 Mio. t	ca. 1,2 Mio. t
Aufgabegut (trocken)	ca. 7,0 Mio. t	ca. 23,4 Mio. t		
RC-CEM	Ausbeute	%	ca. 34 %	ca. 28 %
		t RC-CEM/a	ca. 2,4 Mio. t	ca. 6,6 Mio. t
	Einsparung Primärrohstoffe	t/a	ca. 3,0 Mio. t	ca. 8,3 Mio. t

Tabelle 1: Einsparung von Primärrohstoffen der Zementproduktion durch Verwendung von RC-Zement

3.2 Recyclinggesteinskörnungen

Die Wiederverwendungsmöglichkeiten von Recyclinggesteinskörnungen (RC-GSK) werden maßgeblich vom Zementsteingehalt des aufbereiteten Materials bestimmt. Im Gegensatz zum Downcycling von Betonabfällen zu gebrochenen zementsteinhaltigen RC-Körnungen bzw. Betongranulaten können durch das Upcycling Recyclinggesteinskörnungen mit unterschiedlichen und vergleichsweise niedrigen Zementsteinanteilen gewonnen werden (s. Abb. 3). In weiteren Untersuchungen ist nachzuweisen, dass dieser, in dünnen Schichten an der Oberfläche der Recyclinggesteinskörnungen anhaftende Zementstein vorteilhaft für die Erzeugung hoher Betonfestigkeiten genutzt werden kann. Denn auf Grund der thermischen Vorbehandlung des Aufgabeguts im Zuge der Abfallaufbereitung enthält diese Grenzschicht zwischen der Bindemittelmatrix und der Gesteinskörnung die oben beschriebenen hydraulisch abbindenden Recyclingbindemittel und kann ggf. zur Festigkeitssteigerung von Betonen aus RC-Baustoffen durch Erhöhung der Verbundfestigkeit beitragen. Unabhängig von dieser angestrebten hochwertigen Nutzung der RC-GSK und analog zur Verwendung von konventionellen RC-Körnungen ist eine gleichwertige Verwendung der neuen RC-GSK als Ersatzstoff für natürliche Gesteinskörnungen für untergeordnete Anwendungen im Tiefbau durchweg möglich.

Beim Upcycling von Brechsand werden neben dem Recyclingzement gleichzeitig ca. 66 % RC-Gesteinskörnungen - also ca. 4,6 Mio. t/a - als Ersatzstoffe gewonnen, im Falle der Aufbereitung des gesamten (trockenen) Betonabfalls beträgt die jährlich verfügbare Menge an RC-GSK ca. 15,4 Mio. t.

4. Energieeffizienz

4.1 thermischer Energiebedarf zur Herstellung von RC-CEM

Die Bestimmung des Energiebedarfs zur thermischen Aufbereitung des Aufgabeguts erfolgt anhand thermoanalytischer Untersuchungen. Abb. 5 zeigt das mittels Thermogravimetrie (TG) und Differential Scanning Calorimetry (DSC) ermittelte Thermogramm des zuvor pulverisierten Brechsands, während Abb. 6 die Entwicklung der spezifischen Wärmekapazität (c_p) des Brechsandmehls für den hier relevanten Temperaturbereich bis 700 °C darstellt.

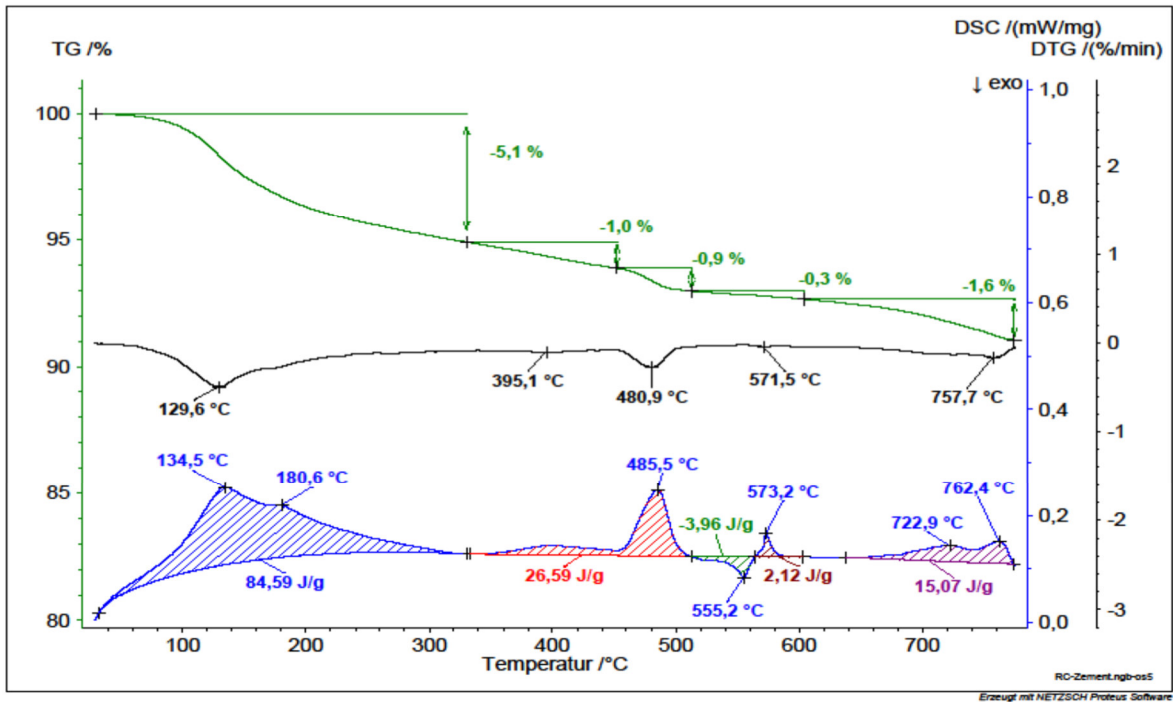


Abb. 5: Thermogramm (TG und DSC) zur Bestimmung der erforderlichen Trocknungsenergie und Reaktionsenthalpien des Brechsands

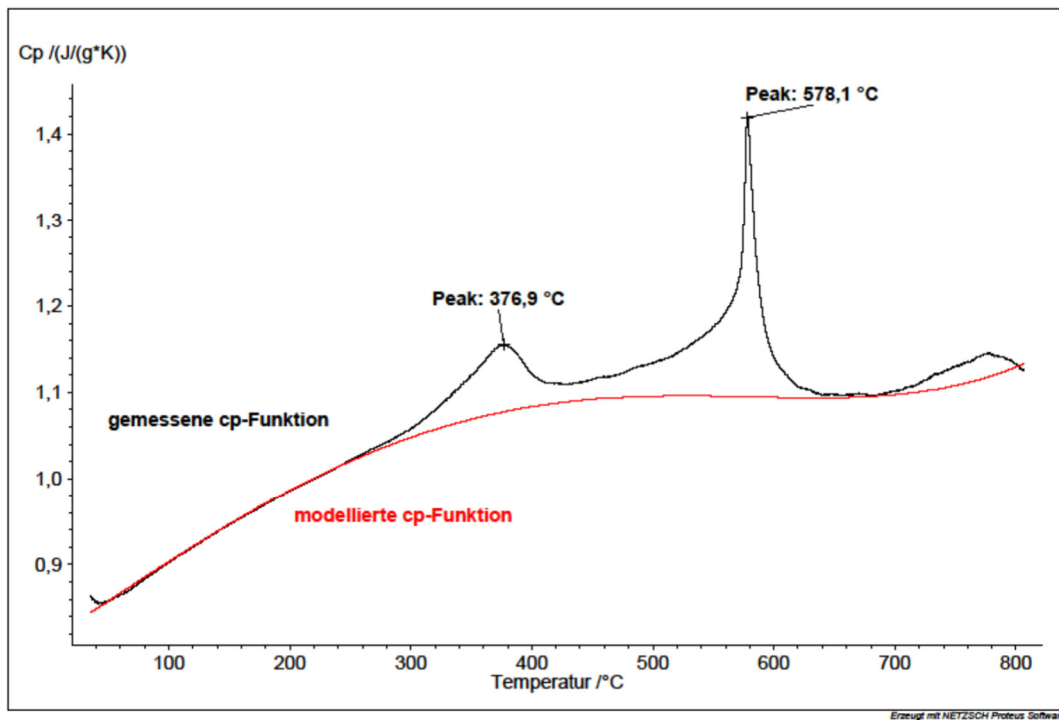


Abb. 6: Thermogramm zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität c_p des Brechsands

Basierend auf diesen Ergebnissen erfolgt die rechnerische Ermittlung des thermischen Energiebedarfs für die Herstellung von Recyclingzementen aus Brechsand (Tabelle 2) auf folgenden Berechnungen und Annahmen:

- Der Energiebedarf aus Trocknung und exo- bzw. endothermen Reaktionsenthalpien des Brechsands - mit einem Bindemittelgehalt von 21 % (Abb. 1) - beträgt im Temperaturbereich bei einer angenommenen Ausgangstemperatur (Materialtemperatur) von ca. 10 °C und einer Zieltemperatur von 700 °C insgesamt ca. 114 J/g (Abb. 5).
- Zur Aufheizung des Materials mit einer durchschnittlichen spezifischen Wärmekapazität von $c_p = 1,0 \text{ J/(g}\cdot\text{K)}$ (Abb. 6) auf die max. Prozesstemperatur von 700 °C ist ein Energieeinsatz von ca. 690 J/g erforderlich, so dass die thermische Behandlung insgesamt einen Energieeinsatz von ca. 804 J/g Brechsand erfordert.
- Zur Realisierung dieses Temperaturregimes bedarf es in der Recyclingpraxis eines zusätzlichen Energieeinsatzes zur Kompensation von Wärmeverlusten, die maßgeblich von der Bauart der Ofentechnik bestimmt werden. Im Folgenden wird von einer für die Zementproduktion üblichen Ofentechnik (Drehrohrofen) mit einem Wirkungsgrad $\eta = 0,7$ ausgegangen [VDZ00], so dass ein Energiebedarf von 1.149 J/g für die thermische Brechsandaufbereitung zu erwarten ist.
- Die Wirtschaftlichkeit der thermischen Aufbereitung wird maßgeblich von der Rückgewinnung der Wärme aus dem aufbereiteten Material bestimmt. In der Zementindustrie werden für diesen Prozessschritt vielfach sogenannte Rostkühler mit einem Wirkungsgrad von 75 % [ZKG16] eingesetzt. Unter der Annahme, dass dieselbe Technologie für den Recyclingprozess eingesetzt wird, können ca. 518 J/g aus der Wärme des aufbereiteten Materials (690 J/g) in den Recyclingprozess zurückgeführt werden. Ausgehend von dem oben ermittelten Energiebedarf in Höhe von 1.149 J/g kann der effektive thermische Energieaufwand somit auf ca. 631 J/g Brechsand reduziert werden.
- Zur Berechnung des spezifischen, auf die Herstellung des Recyclingzementes bezogenen Energieaufwands wird im Folgenden auf eine aliquote Verteilung entsprechend der Ausbeute von RC-CEM und RC-GSK verzichtet, da auch für die Gewinnung natürlicher Gesteinskörnung in der Regel kein Einsatz thermischer Energie erforderlich ist. Vielmehr wird der Energieeinsatz ausschließlich der RC-CEM-Gewinnung mit einer Ausbeute von 34 % (Abb. 3) bei der Brechsandaufbereitung zugeordnet, so dass für die Herstellung einer Tonne RC-CEM ca. 2,94 Tonnen Brechsand mit einem thermischen Energieaufwand von insgesamt 1.856 MJ aufzubereiten sind.
- Zur analogen Abschätzung des Energiebedarfs bei der thermischen Behandlung der gesamten Betonabfälle sind sowohl der niedrigere Bindemittelgehalt im Aufgabegut (14 %) als auch die mit ca. 28 % etwas geringere Ausbeute von Recyclingzement je Tonne Betonabfall zu berücksichtigen (Tabelle 2). Unter Beibehaltung der übrigen Berechnungsansätze besteht in diesem Fall ein Energiebedarf für RC-CEM in Höhe von ca. 2.074 J/g Betonabfall (= MJ/t Betonabfall).

Aufgabegut		Brechsand	Betonabfall
Bindemittelgehalt	%	21 %	14%
Energiebedarf aus Trocknung + Reaktionsenthalpien	J/g	114,0	76,0
spez. Wärmekapazität	c_P (J/g/K)	1,0	
Temperaturbereich	$\Delta T_{(10 - 700\text{ °C})}$ (K)	690,0	
Energiebedarf	J/g	690,0	
Zw.-Summe thermischer Energiebedarf	J/g	804,0	766,0
Ofentechnik	Wirkungsgrad η_1	0,70	
therm. Energiebedarf gesamt (ohne Wärmerückgewinnung)	J/g	1.149	1.094
Wärmeenergie des Aufgabeguts	J/g	690,0	
Rostkühler	Wirkungsgrad η_2	75%	
Energie aus Wärmerückgewinnung (E _w)	J/g	518	
Summe therm. Energiebedarf	J/g Aufgabegut	631	576
	J/g (= MJ/t) RC-CEM	1.856	2.074

Tabelle 2: Ermittlung des thermischen Energiebedarfs zum Upcycling von Brechsand bzw. Betonabfall

4.2 thermischer Energieeinsatz bei der Zementproduktion

Die Herstellung von Zementen ist ein ausgeprägt energieintensiver Produktionsprozess. Der hohe thermische Energieeinsatz wird im Wesentlichen für das Brennen des Zementklinkers im Drehrohrföfen bei ca. 1.450 °C aufgewendet, darüber hinaus in geringem Umfang für die Trocknung von Roh- und ggf. Klinkerersatzstoffen. Nach Angaben des VDZ [VDZ19] beträgt der thermische Energieeinsatz im Mittel ca. 2.772 MJ je Tonne Zement bei einem durchschnittlichen Klinker-Zement-Faktor in Höhe von 0,72.

Im Sinne der Vergleichbarkeit des thermischen Energieeinsatzes von Zement und Recyclingzement ist der Wärmeenergiebedarf des Normzementes mit einem Klinkeranteil von 72 % auf den Bindemittelgehalt des Recyclingzementes in Höhe von 51 % (s. Abb. 3) zu normieren, da insbesondere der Klinkeranteil den thermischen Energiebedarf entscheidend bestimmt. Für den im Folgenden als Vergleichszement (V-CEM) bezeichneten Zement mit einem reduzierten Klinkeranteil von 51 % ist rechnerisch ein thermischer Energieaufwand von ca. 1.964 MJ/t ausreichend.

Der oben ermittelte Energiebedarf zur Herstellung von RC-CEM aus Brechsand liegt dann mit 1.856 MJ/t um ca. 5 % unter diesem Referenzwert bzw. wird beim Upcycling des Betonabfalls mit einem thermischen Energieaufwand von 2.074 MJ/t um 6 % überschritten. Einen zusammenfassenden vergleichenden Überblick über den erforderlichen Energieeinsatz von Zement und Recyclingzement gibt Abb. 7.

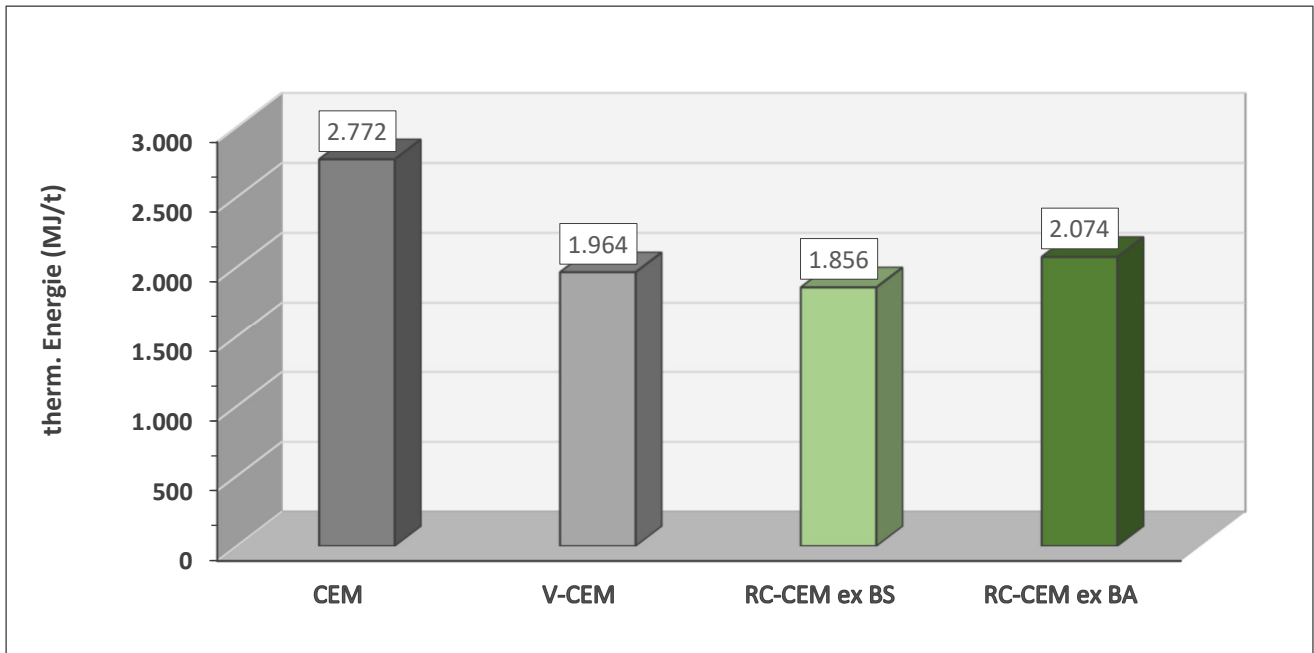


Abb. 7: thermischer Energieaufwand zur Herstellung von Zementen und Recyclingzementen

Unter Punkt 2.2 des vorliegenden Berichtes wurde bereits auf die Vorteile einer optimierten Prozessführung und den damit verbundenen Möglichkeiten der Einsparung thermischer Energie hingewiesen, so dass für den Energieeinsatz beim Upcycling ein Bedarf angenommen werden kann, der deutlich unter demjenigen eines konventionellen Zementes liegt und darüber hinaus den Energieaufwand des Vergleichszementes nicht überschreitet.

4.3 Elektrischer Energiebedarf zur Herstellung von RC-CEM

Der Bedarf an elektrischer Energie für das Upcycling des Brechsands wird ermittelt aus dem Energieaufwand zum Betrieb der in Abb. 2 dargestellten Anlagenkomponenten bezogen auf die aufgegebenen Menge des Aufgabeguts und zugehörigen Ausbeuten der RC-Baustoffe. Eine zusammenfassende Berechnung des elektrischen Energiebedarfs erfolgt in Tabelle 3.

Bei der Ermittlung des spezifischen elektrischen Energiebedarfs wird im Folgenden eine Aufteilung des Gesamtaufwands an elektrischer Energie auf die beiden RC-Baustoffe angesetzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Energieaufwand zur Herstellung von RC-Gesteinskörnungen nicht höher ausfallen soll als derjenige bei der Gewinnung von natürlichen Gesteinskörnungen, der mit ca. 34 MJ/t [Ho18] bzw. 9,4 kWh/t angesetzt wird.

Im Falle der Brechsandaufbereitung beträgt der elektrische Energieeinsatz ca. 50,5 kWh/t Aufgabegut (Tabelle 3); dies erfordert bei einer Ausbeute von 34 % Recyclingzement die Aufbereitung von 2,94 t Brechsand/t RC-CEM und somit einen Energieaufwand von insgesamt 148 kWh. Gleichzeitig fallen beim Upcycling 1,9 Tonnen Recyclinggesteinskörnungen an, denen mit dem o.g. Ansatz 17,9 kWh zugeordnet werden können. Mithin verbleibt ein elektrischer Energiebedarf von 130 kWh/t RC-CEM. Der für die Betonaufbereitung analog berechnete Energiebedarf mit einer RC-CEM-Ausbeute von 28 % beträgt 160 kWh/t RC-CEM (Abb. 8).

Aufgabegut		Brechsand	Betonabfall
Prozessschritt	Energiebedarf* (kWh/t Aufgabegut)		
Brechen	1,7	entfällt	1,7
Brennen + Kühlen	26,9		26,9
selektives Mahlen	10,2		10,2
Siebung	1,0		1,0
Zw.-Summe		37,9	39,8
Ausbeute RC-CEM		34 %	28 %
Energiebedarf Feinmahlung Vorprodukt RC-CEM	20-50	11,9	11,1
Ausbeute RC-GSK		66 %	72 %
Energiebedarf Siebung Vorprodukt RC-GSK	1,0	0,7	0,7
Summe elektr. Energie (kWh/t Aufgabegut)		50,5	51,6

* Quelle: Angaben Recyclingunternehmen / VDZ / Anlagenhersteller

Tabelle 3: Ermittlung des elektrischen Energiebedarfs zum Upcycling von Brechsand bzw. Betonabfall

4.4 Elektrischer Energiebedarf zur Herstellung von Zement

Nach Angaben des VDZ [VDZ19] werden zur Herstellung von einer Tonne Zement insgesamt 111,9 kWh elektrische Energie eingesetzt, davon ca. 25 % (27,9 kWh) für die Rohmehlaufbereitung sowie 24 % (26,8 kWh) für das Brennen und Kühlen des Klinkers sowie ca. 46 % (51,4 kWh) für die Zementmahlung. Für die folgende Betrachtungen wird die Summe dieser einzelnen Aufbereitungsschritte mit 106 kWh/t CEM als Vergleichswert herangezogen.

Analog zu den Darstellungen des Energieaufwandes zur thermischen Aufbereitung bei der Zementherstellung in Abhängigkeit vom Klinkeranteil wird im Folgenden der elektrische Energieaufwand dem Klinkeranteil des Vergleichszementes angepasst. Der Aufwand für den Vergleichszement ist proportional zum Klinkeranteil auf 75 kWh/t V-CEM zu reduzieren.

Einen zusammenfassenden vergleichenden Überblick über den erforderlichen elektrischen Energieeinsatz von Zement bzw. Vergleichszement und Recyclingzementen aus Brechsand bzw. Betonabfall gibt Abb. 8.

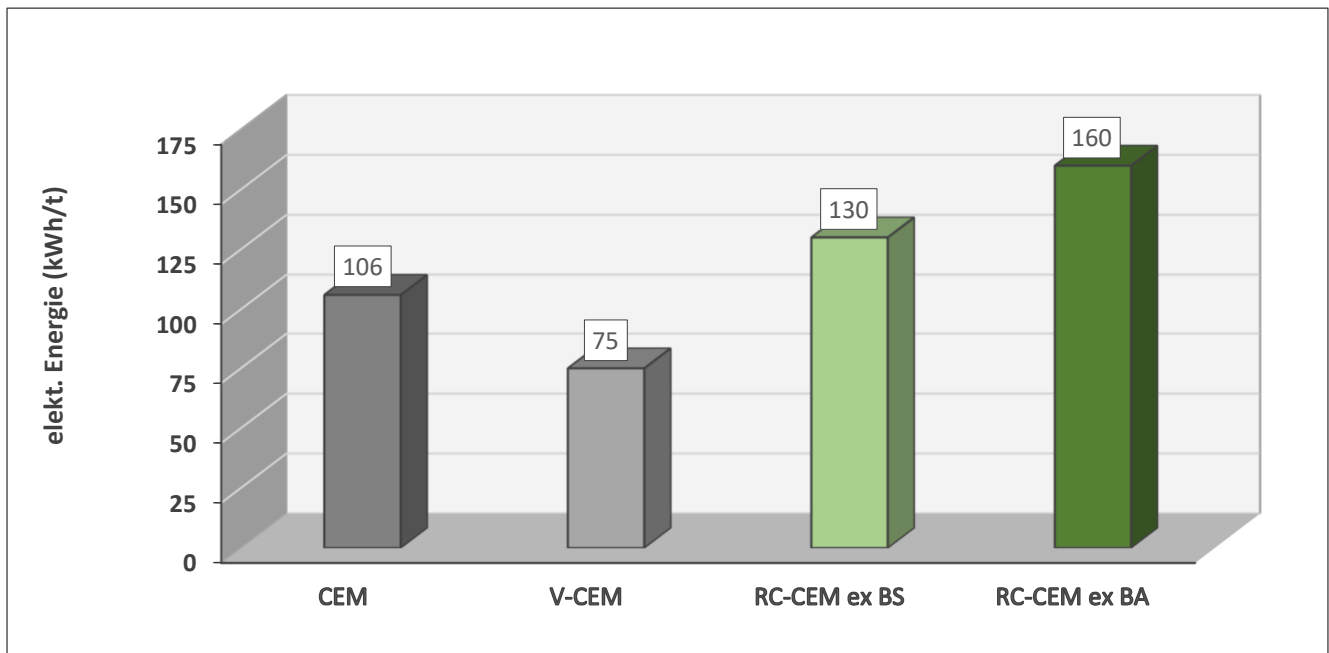


Abb. 8: elektrischer Energieaufwand zur Herstellung von Zementen und Recyclingzementen

Zusammenfassend stellt sich der Energiebedarf für das Upcycling von Brechsanden bzw. Betonabfällen wie folgt dar:

Der Aufwand an thermischer Energie liegt auf Grund der mit max. 700 °C vergleichsweise niedrigen Prozesstemperatur unter dem Energiebedarf eines konventionellen Zementes bzw. auf dem Niveau eines vergleichbaren Zementes mit reduziertem Klinkeranteil (Abb. 7).

Der Bedarf an elektrischer Energie beträgt im Falle der Brechsandaufbereitung ca. 130 kWh/t RC-CEM sowie beim Upcycling von Betonabfällen ca. 160 kWh/t RC-CEM und fällt damit höher aus als bei der Zementproduktion (Abb. 8).

Wird zur Beurteilung der Energieeffizienz der Technologie der Gesamtbedarf aus thermischer und elektrischer Energie herangezogen (Abb. 9), ist mit der Erzeugung von RC-CEM aus Brechsanden ein Aufwand erforderlich, der mit 646 kWh/t deutlich unterhalb desjenigen zur Zementproduktion (876 kWh/t CEM) liegt bzw. dem Aufwand zur Erzeugung des Vergleichszementes (621 kWh/t V-CEM) praktisch entspricht. Der Energieaufwand zur Gewinnung der RC-Baustoffe aus Betonabfällen fällt mit 736 kWh/t ebenfalls geringer aus als bei der Zementproduktion, bezogen auf den Vergleichszement ist jedoch ein um ca. 19 % höherer Energieeintrag erforderlich.

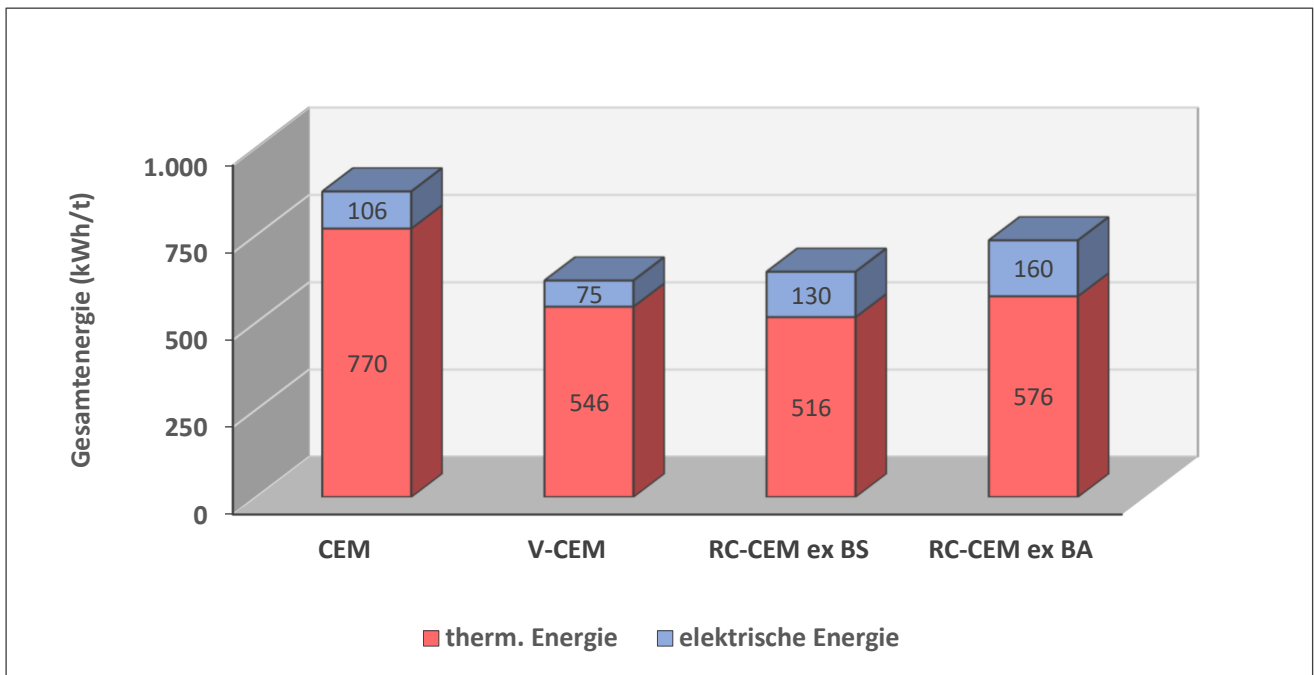


Abb. 9: Gesamtenergiebedarf der Zemente und Recyclingzemente

5. CO₂-Emissionen

Die intensive CO₂-Emission bei der Zementherstellung entsteht vor allem durch das Calcinieren des kalksteinhaltigen Rohstoffs, da die erforderliche Zersetzung des CaCO₃ zu Calciumoxid (CaO) mit entsprechenden Emissionen von Kohlenstoffdioxid (CO₂) verbunden ist. Zusammen mit den energiebedingten Emissionen beträgt der CO₂-Ausstoß eines konventionellen Zementes im Mittel ca. 0,562 t CO₂/t CEM [VDZ15] (Tabelle 4).

Durch die Verwendung von Brechsand oder Betonabfällen als Rohstoff für die Herstellung von Recyclingzementen entfällt die Calcinierung. Zur Bildung von Dicalciumsilikat wird neben den Calciumsilikathydraten Calciumoxid benötigt. Sofern dieses Calciumoxid im Zementstein enthaltenden Calciumcarbonat entzogen wird, ist dies ein CO₂-neutraler Prozess, da Letzteres im Zuge der Carbonatisierung zuvor der Umwelt entzogen wurde.

Zusätzlich zu den Rohstoff-bedingten Emissionen sind in der CO₂-Bilanz die Emissionen infolge des thermischen sowie elektrischen Energieeinsatzes zu berücksichtigen. Für die folgende Berechnung der energiebedingten CO₂-Einsparungen wird davon ausgegangen, dass für das Upcycling des Brechsands bzw. Betonabfalls der gleiche Energiemix verwendet wird, wie für die Zementproduktion und somit die vom VDZ veröffentlichten Angaben [VDZ15] zur Aufteilung der CO₂-Emissionen der Zementproduktion analog auf das Upcycling von Brechsand bzw. Betonabfälle angewendet werden können. Die proportionalen Berechnungen der in Tabelle 4 aufgeführten thermisch sowie elektrisch bedingten CO₂-Emissionen des Upcyclings erfolgen auf Basis des in Abb. 9 zusammengefassten Energieeinsatzes für die Zement- und Recyclingzemente.

Ausgehend von den für die Zementproduktion bekannten CO₂-Emissionen als maßgebende Referenzwerte stellen sich diese für Recyclingzemente wie folgt dar:

- Die rohstoffbedingten Emissionen entfallen, da beim Upcycling der Calcinierungsprozess entfällt.
- Die thermisch bedingten CO₂-Emissionen werden - proportional bezogen auf die Emissionen in Höhe von 0,094 t CO₂/t CEM bei der Herstellung von CEM für die Recyclingzemente auf 0,063 t CO₂/t RC-CEM ex Brechsand bzw. 0,070 t CO₂/t RC-CEM ex Betonabfall reduziert. Für den Vergleichszement beträgt die analog ermittelte Emission 0,067 t CO₂/t V-CEM

- Die elektrisch bedingten CO₂-Emissionen sind proportional zum intensiveren Energieeinsatz gegenüber der konventionellen Zementproduktion zu erhöhen und betragen bei der Herstellung von Recyclingbindemitteln aus Brechsand ca. 0,091 t CO₂/t RC-CEM bzw. 0,142 t CO₂/t RC-CEM beim Upcycling von Betonabfällen.
- In Summe beträgt die CO₂-Emission beim Upcycling von Brechsand 0,154 t CO₂/t RC-CEM bzw. von Betonabfällen 0,212 tCO₂/t RC-CEM und liegt damit um 73 % bzw. 62 % niedriger als bei der Zementproduktion (Tabelle 4, Abb. 11). Bezogen auf die Emissionen des Vergleichszements erlaubt die Technologie eine CO₂-Einsparung von 44 % bzw. 33 %-Punkten.

Ursache	CO ₂ -Emissionen			
	CEM (t CO ₂ /t CEM)	V-CEM (t CO ₂ /t V-CEM)	RC-CEM ex BS (t CO ₂ /t RC-CEM)	RC-CEM ex BA (t CO ₂ /t RC-CEM)
rohstoffbedingt	0,394	0,279	entfällt	
thermisch bedingt	0,094	0,067	0,063	0,070
elektrisch bedingt	0,074	0,052	0,091	0,142
Gesamt	0,562	0,398	0,154	0,212

Tabelle 4: CO₂-Emissionen bei der Zementproduktion und beim Upcycling

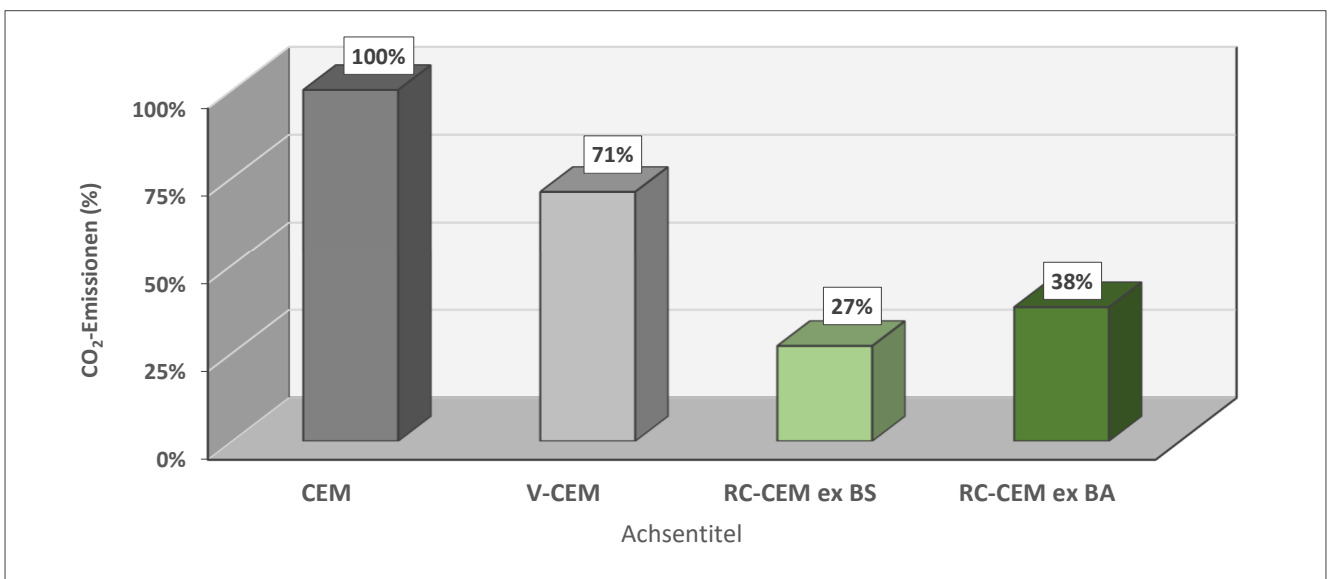


Abb. 10: CO₂-Emissionen der Recyclingzemente bezogen auf die Emissionen der Zementproduktion

6. Zusammenfassung

Die Ökobilanz des Upcyclings von Betonabfällen zur Herstellung von Recyclingzementen und Recyclinggesteinskörnungen (Abb. 11) zeichnet sich - bezogen auf die Umweltdaten der Zementproduktion - hinsichtlich des Schutzes natürlicher Rohstoffressourcen, des Energieeinsatzes sowie der CO₂-Emissionen durch die im Folgenden zusammengefassten Vorteile aus:

- Die Produktion von Zementen erfordert mit 1,26 t Primärrohstoffen je Tonne Zement einen hohen Einsatz natürlicher Ressourcen. Recyclingzemente werden dagegen ausschließlich aus Betonabfällen hergestellt, etwaige zusätzliche natürliche Rohstoffe sind nicht erforderlich. So können durch das Upcycling des gesamten Betonabfalls in Deutschland ca. 8,3 Mio. t/a Primärrohstoffe für die Zementproduktion eingespart

werden (Tabelle 1). Bei einem Jahresverbrauch von ca. 43 Mio. t Primärrohstoffe [VDZ19] beträgt das jährliche Einsparungspotential somit ca. 19,3 % der gesamten Primärrohstoffmenge.

- In Summe ist der Energieaufwand zur thermischen und elektrischen Behandlung der Betonabfälle um 18 % geringer als bei der Produktion konventioneller Zemente und liegt ca. 13 % über demjenigen zur Produktion eines vergleichbaren Zementes mit gleichem Klinkeranteil (Abb. 9). Durch Ausbau der Recyclingtechnologie vom Ein- zum Zweiphasenverfahren kann ggf. der Energiebedarf zu Gunsten des Upcyclings noch reduziert werden.
- Die massiven rohstoffbedingten CO₂-Emissionen infolge der Calcinierung des natürlichen Rohstoffs bei der konventionellen Zementproduktion entfallen beim Upcycling, da hier die hydraulischen Eigenschaften des Bindemittels durch die praktisch CO₂-freie Rückgewinnung der hydraulisch wirksamen Phasen im bindemittelhaltigen Zementstein erzielt werden. Insgesamt werden durch das Upcycling 0,396 t CO₂/t RC-CEM ex Betonabfall - also ca. 70 % - gegenüber der Zementproduktion eingespart. Im Falle der Aufbereitung des gesamten Betonabfalls können - allein in Deutschland - jährlich ca. 6,6 Mio. t Recyclingzement (Tabelle 1) hergestellt und die CO₂-Emissionen der Zementindustrie um 2,6 Mio. t CO₂/a reduziert werden. Bei einer Gesamtproduktion von 34,2 Mio. t CEM/a [VDZ19] mit einer Emissionsrate von ca. 0,562 t CO₂/t CEM [VDZ15] - d.h. einer CO₂-Emission von ca. 19,2 Mio. t CO₂/a - beträgt das Reduktionspotential somit ca. 13,5 % der deutschen Zementproduktion.

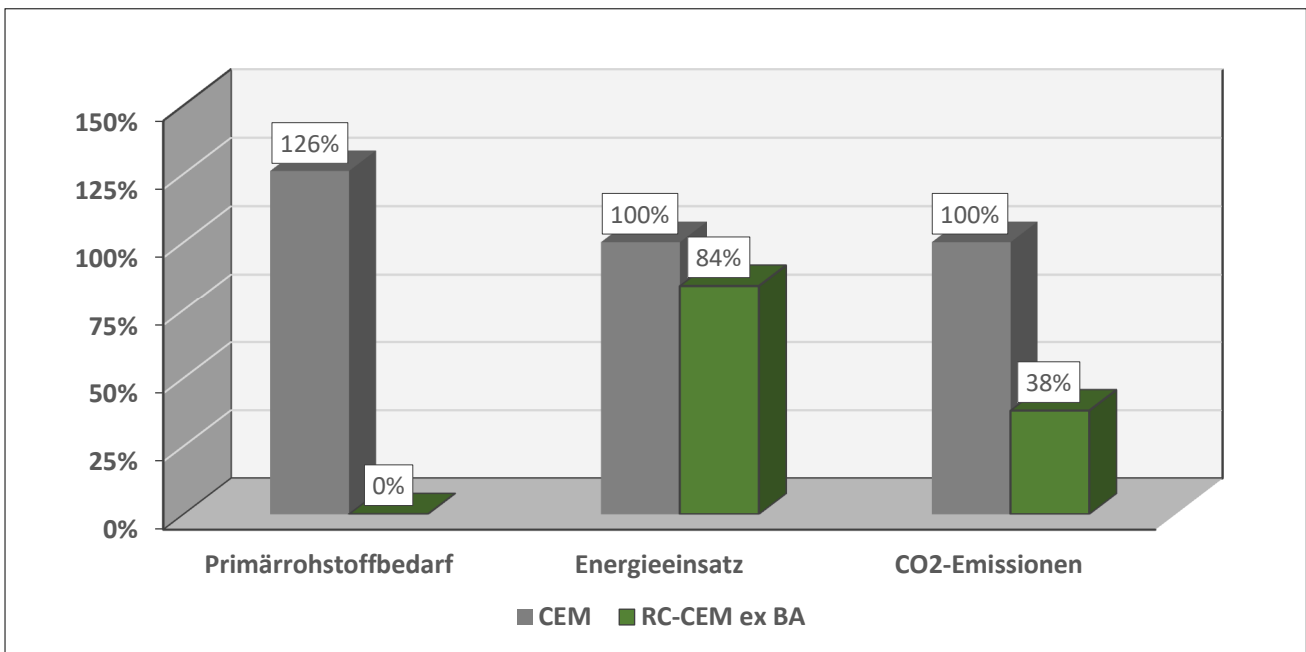


Abb. 11: Umweltbilanz der Herstellung von RC-Zementen vs. Zementproduktion

7. Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabenergebnisse

Insgesamt stellt die neue Technologie des Upcyclings von Betonabfällen zu Recyclingzementen eine äußerst umweltfreundliche Alternative zur konventionellen Zementproduktion dar. Die ausgeprägten Vorteile der Ökobilanz und die gleichzeitig sowohl national als auch international stetig steigenden Anforderungen an den Umwelt- und insbesondere Klimaschutz lassen ein hohes Marktinteresse an der neuen Technologie erwarten. Es ist daher vorgesehen, die Ergebnisse mittels Publikationen in Fachzeitschriften und Beiträgen zu Kolloquien und Fachveranstaltungen insbesondere in den Bereichen Zement-/Baustoffproduktion sowie Recycling- und Verfahrenstechnik vorzustellen. Auf Grund der zentralen ökologischen und ökonomischen Bedeutungen der neuen Technologie als Beitrag für den internationalen Klimaschutz sind zudem übergeordnete Beiträge, z.B. im Wirtschafts- und/oder Forschungsteil einschlägiger Wirtschaftszeitungen und -magazinen, geplant, um das Upcycling auch einem breiteren Publikum vorzustellen.

Literaturverzeichnis Teil II

- [BT17-1] IBU BAU+TEC GmbH: *RC-Zement - Herstellung von neuen Zementen aus Abbruchbeton - Recyclingzemente (RC-Zement)* Teilvorhaben 1 Baustofftechnik: Entwicklung innovativer Baustoffe aus Recyclingzement. BMBF-Verbund-projekt KMU-innovativ – Verbund-vorhaben Ressourceneffizienz / Schlussbericht Teil I 18. April 2017 (unveröffentlicht).
- [BT17-2] IBU BAU+TEC GmbH: *RC-Zement - Herstellung von neuen Zementen aus Abbruchbeton - Recyclingzemente (RC-Zement)* Teilvorhaben 1 Baustofftechnik: Entwicklung innovativer Baustoffe aus Recyclingzement. BMBF-Verbund-projekt KMU-innovativ – Verbund-vorhaben Ressourceneffizienz / Schlussbericht Teil II 18. April 2017 (unveröffentlicht).
- [Ho18] Hoffmann, Thomas (Bundesverband Transportbeton): *RC-GK in der Betonherstellung, Entwicklungen & Perspektiven von R-Beton*. Vortrag SOLIDS 2018, Dortmund.
- [HSW21] Hochschule Wismar: Laboruntersuchungen zum Upcycling von Betonabfällen; Teil 1 des Abschlussberichts.
- [StBa19] Statistisches Bundesamt (Destatis): *Umwelt - Abfallentsorgung 2017*. Fachserie 19 Reihe 1, veröffentlicht 6-2019.
- [VDZ00] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ): *Zement Taschenbuch 2000* 49. Ausgabe.
- [VDZ15] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ): *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2015* (www.vdz-online.de).
- [VDZ19] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ): *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2019* (www.vdz-online.de).
- [ZKG16] *ZKG-Handbuch Zementanlagenbau 2015/2016*, S. 22, Herausgeber: Bauerverlag BV GmbH, Gütersloh.