

Abschlussbericht BWPLUS

R-Zement: CO₂-arme Herstellung des Klinkerminerals Dicalciumsilikat aus Recycling-Baustoffen

von

Günter Beuchle, Krassimir Garbev, Ulrich Precht, Uwe Schweike,
Peter Stemmermann, Angela Ullrich

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Technische Chemie
Abteilung Technische Mineralogie

Förderkennzeichen: L75 21115

Laufzeit: 01.04.21 - 30.06.25

Finanziert aus Landesmitteln, die der Landtag Baden-Württemberg beschlossen hat.

September 2025



Baden-Württemberg
Ministerium für Umwelt, Klima
und Energiewirtschaft

Kurzfassung

Etwa 35 % der industriellen CO₂ Emissionen Baden-Württembergs entfallen auf die Zementherstellung. Zwei Drittel dieser Emissionen stammen aus der Entsäuerung des natürlichen Rohstoffs Kalk. Im Sinne des Klimaschutzes wäre es daher sinnvoll, den Rohstoff Kalk durch bereits weitgehend CO₂-freie, zementhaltige Reststoffe aus dem Baustoffrecycling zu ersetzen. Am KIT wurde ein Verfahren zur Herstellung von Zementklinker aus zementhaltigen Reststoffen entwickelt und im Labormaßstab getestet. Die maximale Prozesstemperatur ist auf 1000°C begrenzt um eine einfache und emissionsarme elektrische Beheizung zu ermöglichen. Freigesetztes CO₂ fällt in konzentrierter Form an und kann z.B. zur Karbonatisierung von Betonzuschlag oder Karbonatisierungshärtung von Beton genutzt werden. Das Produkt Niedertemperatur-Belitzementklinker (NT-Belitzementklinker) besteht überwiegend aus Dicalciumsilikat und entspricht normativ einem Hauptbestandteil europäischer Normalzemente.

Ziel des Projektes R-Zement war es, das Verfahren zur Herstellung von NT-Belitzementklinker im Pilotmaßstab zu optimieren. Dazu wurde eine Pilotanlage mit einem Durchsatz von 10 kg/h entwickelt, ausgelegt, aufgebaut und in Betrieb genommen. Anschließend wurden Prozessparameter zur Herstellung von NT-Belitzementklinker aus realen Recyclingprodukten optimiert. Weiterhin wurden Testchargen für die Herstellung von Kreislaufbeton produziert. Der Einsatz von NT-Belitzementklinker in der Herstellung von Porenbeton wurde im industriellen Großversuch erfolgreich getestet. Relativ zu Portlandzementklinker ist eine Senkung der CO₂ Emission von über 60 % möglich, wenn die Anlage mit erneuerbarem Strom beheizt wird. Die Pilotanlage besteht aus Einrichtungen zum Mischen und Aufmahlen der Rohstoffe sowie zur Aufbereitung des Produkts. Zentrale Komponente ist ein in einer CO₂-Atmosphäre betriebener elektrisch beheizter Drehrohrofen zum Brennen des NT-Belitzementklinkers. Die Förderung umfasste Investitionen in die Pilotanlage und Forschungsaufwendungen zur Erhöhung der technologischen Reife (TRL 2-3 → TRL 5).

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	ii
Inhaltsverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	vi
Abkürzungsverzeichnis.....	vii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Vorgehen.....	3
2 Charakterisierung und Aufbereitung von BW-relevanten Ausgangsmaterialien (AP1).....	6
2.1 Erfassung von technologisch und für BW relevanten Stoffströmen.....	6
2.2 Entwicklung eines Standards für Feinbrechsand zur Herstellung von NT-Belitklinker.....	7
2.3 Aufbau einer Aufbereitungslinie im Labormaßstab	9
2.4 Optimierung physikalischer Verfahren zur Rohstoffaufbereitung.....	10
3 Experimentelle Untersuchung der Calcinierung, Abgasreinigung und Korrosion im Laborofen (AP 2).....	12
3.1 Calcinierungsversuche	12
3.1.1 Versuche im Laborofen (Batch).....	12
3.1.2 Versuche im Labordrehrohr (kontinuierlich).....	13
3.1.3 Fazit zu den Laborversuchen	14
3.2 Abgasreinigung.....	14
3.3 Korrosion im Laborofen	15
4 Pilotanlage (AP 3)	18
4.1 Planungsphase, Beschaffung und Installation.....	18
4.1.1 Bigbag-Station	18
4.1.2 Trocknung	19
4.1.3 Mahlanlage	19
4.1.4 Datenerfassung und -auswertung.....	20
4.1.5 Abgasanlage und Abgas-Analytik.....	20
4.1.6 Drehrohrofen	20
4.1.7 Zusätzliche Kleinkomponenten.....	21
4.2 Inbetriebnahme und Funktionstests.....	21
4.2.1 Entwicklung eines Standardverfahrens	21
4.2.2 Anpassungen an der Anlage	23

4.3	Langzeitversuche	24
4.3.1	Materialvorbereitung	24
4.3.2	Verwendete Rohmehle	27
4.3.3	Vorversuche im Batch-Ofen	28
4.3.4	Brennversuche am Technikumsdrehrohr.....	29
4.4	Herstellen von NT-Belitzementklinker als Testmaterial für calciumarmen Recyclingzement.....	32
5	Alkaliwäsche (ursprüngliches AP 4), Mineralisator CaCl_2	33
5.1	CaCl_2 als Mineralisator	33
6	Entwicklung von Anwendungen mit Herstellern – Anwendungsversuche (AP 5)	35
6.1	URBAN.....	35
6.2	REPOST.....	35
7	Zusammenfassung.....	37
8	Verwertung.....	38
9	Ausblick.....	40
	Literaturverzeichnis	42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Prozesskette Kreislaufbeton	2
Abbildung 1-2: Foto der R-Zement-Pilotanlage	5
Abbildung 2-1 Aufbereitungslinie Labormaßstab (Schema).....	9
Abbildung 3-1: Korrosionstest an Hastelloy mit/ohne Materialkontakt	16
Abbildung 3-2: Nickelbasislegierungen nach Beendigung der Versuche.....	16
Abbildung 4-1: Schematischer Hallennutzungsplan	18
Abbildung 4-2: R-Zement-Pilotanlage mit Bigbagstation, Mühle, Drehrohr.....	22
Abbildung 4-3: Schematische Darstellung des Belitzement-Prozesses.....	23
Abbildung 4-4: Partikelgrößenverteilung im Brechsand nach 30min	25
Abbildung 4-5: Partikelgrößenverteilung im Rohmehl nach 60min	26
Abbildung 6-1: Herstellung von Porenbetonprototypen im Großtechnikum der Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH.....	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Standard für Brechsande zur Herstellung von Belitzementklinker	9
Tabelle 2-2: Chemische Zusammensetzung von Pflastersteinfraktionen	10
Tabelle 2-3: Ergebnisse der RFA von URBAN – Material < 0,25 mm.....	10
Tabelle 3-1: Phasenbestand der Brennversuche im Laborofen.....	13
Tabelle 3-2: Phasenbestand der Brennversuche im Labordrehrohrföfen	13
Tabelle 4-1: Chemische Zusammensetzung von 4 Chargen der verwendeten Brechsande	24
Tabelle 4-2: Untersuchte Misch und Homogenisierungsdauern	26
Tabelle 4-3: Granulometrie-Parameter für Ausgangsmaterialien, Mahlungen und Mischungen	27
Tabelle 4-4: Verwendete Rohmehle mit Einwaagemengen	28
Tabelle 4-5: Mit Rietveldanalyse bestimmter Phasenbestand der im Labor-Muffelofen durchgeführten Testbrände	28
Tabelle 4-6: Parametervariation Testbrand	29
Tabelle 4-7: Versuchseinstellungen, Rohmehle, C/S-Verhältnisse.....	30
Tabelle 4-8: Phasenbestand Drehrohrversuche	31

Abkürzungsverzeichnis

Bp	Betonpflastersteine
C ₂ S	Dicalciumsilikat, Ca ₂ SiO ₄ , reaktive Modifikationen oft als Belit bezeichnet
C/S	molares Verhältnis von CaO zu SiO ₂
CCS	CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung (C arbon C apture and S torage)
CCU	CO ₂ -Abscheidung und -Nutzung (C arbon C apture and U se)
Fsp	Feldspäte (K,Na,Ca)(Al,Si) ₄ O ₈
MWC	mineralischer Bauschutt mit Anteilen von Betonbruch (M ineral W aste and C oncrete)
NT-	Niedertemperatur (<1000°C)
OPC	Portlandzement (O rdinary P ortland C ement)
Qz	Quarz SiO ₂
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
Spu	Spurrit Ca ₅ (SiO ₄) ₂ CO ₃
TG	Thermogravimetrie
W	Wollastonit CaSiO ₃
XRD	Röntgendiffraktometrie

1 Einleitung

1.1 Motivation

Etwa 35 % der industriellen CO₂-Emissionen Baden-Württembergs stammen aus der Zementherstellung. Die Produktion von Zement ist damit die wichtigste Quelle des Treibhausgases in diesem Sektor. Sieben Zementwerke produzieren jährlich ca. 5,5 Mio. Tonnen Zement, und emittieren dabei ca. 3,3 Mio. Tonnen CO₂. Zwei Drittel dieser Emissionen stammen aus der Entsäuerung des natürlichen Rohstoffs Kalk. Im Sinne des Klimaschutzes wäre es daher sinnvoll, den natürlichen Zementrohstoff Kalk durch bereits weitgehend CO₂-freie, zementhaltige Reststoffe aus dem Baustoffrecycling zu ersetzen. Besonders geeignet sind auf den ersten Blick Altbaustoffe wie Betonbrechsande, Porenbeton- und Faserzementbruch, für die es heute keine hochwertigen Recyclingoptionen gibt. Allerdings ist der in diesen Reststoffen enthaltene ausgehärtete Zement stark verdünnt. Zudem ist das Material häufig durch Anhaftungen von Fremdmaterial verunreinigt. Die Reststoffe fallen lokal und in schwankenden Mengen an. Ihr Einsatz in konventionellen Anlagen zur Portlandzementherstellung ist daher aus mehreren Gründen nicht wirtschaftlich:

- Der durch Verdünnung niedrige Calciumanteil der zementhaltigen Reststoffe erlaubt nur einen sehr limitierten Anteil am Zementrohmehl (maximal einige Prozent).
- Die Anhaftungen von Fremdmaterial würden eine komplexe Korrektur der Rohmaterialzusammensetzung verlangen.
- Die zementhaltigen Reststoffe müssten über weite Strecken (~150 km) zu den Portlandzementwerken transportiert werden.

Die Herstellung von calciumarmen Zementen oder Zementklinker aus Reststoffen des Baustoffrecyclings ist hierzu ein Lösungsansatz. Im Labormaßstab gelingt die Umsetzung von Betonbrechsand (oder feinerem Sand aus der Porenbetonaufbereitung) zu hydraulisch aktiven Modifikationen des Klinkerminerals Dicalciumsilikat, die auch als Belit bezeichnet werden.

Das Recycling von Zement aus Betonbrechsand ermöglicht es das Konzept des Recyclingbetons (RC-Beton) hin zu einem Kreislaufbeton weiterzuentwickeln. In Abbildung 1-1 ist die Prozesskette zur Herstellung von Kreislaufbeton aus rezyklierten Gesteinskörnung und zu Zement formuliertem NT-Belitzementklinker schematisch dargestellt.

Nach der mechanischen Aufbereitung von Baureststoffen wie z.B. Altbetonen werden die größeren Gesteinskörnungen als Ersatz für frische Zuschläge direkt in neuem Beton wiederverwendet. Die feineren Brechsande, die mehr Zementstein als Sand enthalten, werden mit Kalkstein gemischt und in einem Drehrohfen zu NT-Belitzementklinker gebrannt. Die Prozesstemperatur liegt nur bei etwa 1000°C.

Dies ermöglicht materialtechnisch einfachere, elektrisch beheizte und auch kleine Anlagen. Prinzipiell ist auch ein Betrieb mit Oxyfuel-Verbrennung möglich.

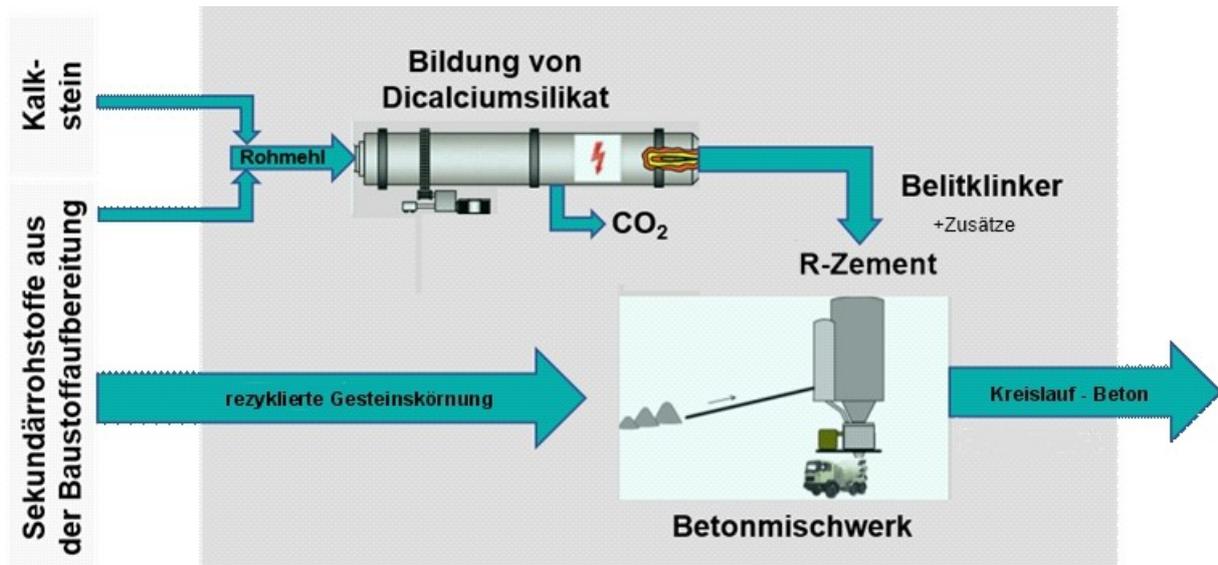


Abbildung 1-1: Prozesskette Kreislaufbeton. Aus Sekundärrohstoffen der Baustoffaufbereitung wie Betonbrechsanden und Kalkstein wird in einem Drehrohrofen Belitklinker gebrannt, aus dem durch Vermahlen mit Zusätzen R-Zement hergestellt wird. Aus R-Zement, rezyklierter Gesteinskörnung und Wasser wird im Betonmischwerk Kreislaufbeton.

In einer nachfolgenden Weiterentwicklung könnte das beim Brennen des Belitklinkers in hoher Konzentration entstehende Kohlendioxid (Ofenabgas) durch mineralische Karbonatisierung in den gröberen Kornfraktionen der Betonaufbereitung gebunden werden. Damit wäre ein CO₂-neutraler Kreislaufbeton möglich.

1.2 Zielsetzung

Ziel des Projektes war es, die neue Technologie zur Herstellung von NT-Belitzementklinker aus Sekundärrohstoffen des Baustoffrecyclings im Pilotmaßstab zu optimieren (TRL 2-3 → TRL 5). Die somit erzeugbaren Mengen an NT-Belitklinker sollen erste Anwendungsprüfungen in verschiedenen Einsatzbereichen erlauben. Eine untersuchte Anwendung ist der Ersatz von Portlandzement in der Herstellung von Porenbeton. Weiterhin wird der Einsatz von NT-Belitklinker in Kompositzementen getestet, die zur Herstellung von Pflastersteinen oder Fertigbetonteilen geeignet sind. Im besten Fall wurde eine Reduktion der CO₂ Emission von bis zu 75 % im Vergleich zur Herstellung von Portlandzementklinker angestrebt. Im Pilotmaßstab sollte erstmals eine Kreislaufführung für Zement demonstriert werden. Freigesetztes CO₂ fällt im NT-Belit-Verfahren in konzentrierter Form an und steht zur Nutzung z.B. zur Methanisierung oder zur Karbonatisierungshärtung von Zement oder Beton zur Verfügung. Die dazu unter Umständen notwendigen weiteren Prozesse, z.B. die Entfernung von Spurengasen zur Schonung

von Katalysatoren für chemische Reaktionen, wurden im Projekt R-Zement nicht betrachtet.

Im Projektverlauf sollte die gesamte Prozesskette vom bisher nicht verwertbaren realen Altbaustoff bis zum Recyclingzement im Pilotmaßstab abgebildet werden (Abbildung 1-1). Die Technologie sollte insbesondere skalierbar und in Bezug auf die Einsatzstoffe flexibel sein, um den Betrieb kleinerer dezentraler Anlagen zu ermöglichen.

Die realen Ressourceneffizienz-Effekte (insbesondere die Reduktion des Kalkbedarfs und die Reduktion der zu deponierenden Baureststoffe) sowie die reale erreichbare CO₂-Reduktion sollten im Pilotmaßstab demonstriert werden.

Der Transfer dieser neuen Technologie in den Markt erfordert innovative Geschäftsmodelle unter Einbeziehung mehrerer Akteure. Ergänzend zu diesem Vorhaben wurde im Rahmen der Ausschreibung „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Innovative Produktkreisläufe“ des BMBF das Projekt „REPOST“, (6/2019-12/2022) zur Entwicklung eines Kreislaufkonzepts für Porenbeton und Faserzement bearbeitet (Beuchle, et al., 2024). Projektpartner waren der größte deutsche Porenbetonhersteller Xella (Hauptantragssteller), ein Baustoffrecyclingbetrieb, das Institut für Technische Chemie sowie das Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (Prof. Schultmann) des KIT. Das Projekt umfasste auch eine technoökonomische und -ökologische Bewertung.

Neben der Minimierung der CO₂-Emissionen schont die neue Technologie natürliche Ressourcen (Kalk), vermindert den Anteil minderwertiger letztlich zu deponierender Reststoffe aus dem Baustoffrecycling und hilft im Falle der Errichtung dezentraler Anlagen Transportwege zu minimieren. Durch eine neuartige Prozessführung ist die Technologie energetisch sehr effizient. Zur Abtrennung von Schadstoffen bzw. Wertstoffen wird allerdings zusätzlich Energie benötigt, so dass die Energiebilanz nur für klar definierte Einsatzstoffe und ganzheitlich aufgestellt werden kann.

1.3 Vorgehen

Als eine neue energie- und ressourceneffiziente Technologie wurde vom KIT die Produktion von Dicalciumsilikat (Ca₂SiO₄ oder kurz C₂S) als Zwischenprodukt zur Herstellung von Baumaterial aus primären und sekundären Rohstoffen untersucht und patentiert (Husinger, et al., 2014). Mischungen aus sekundären Rohstoffen (Porenbeton, Flotationsrückstände (NOMECOR, 2016-2019), verschiedene Flugaschen) oder auch Kalkstein (CaCO₃) und SiO₂ wurden in einem Ofen in einer hochkonzentrierten CO₂-Atmosphäre unter Zugabe von Mineralisator (Natriumkarbonat) erhitzt und zu C₂S umgesetzt. Durch die Kombination von CO₂-Atmosphäre und Mineralisator konnten hohe C₂S-Ausbeuten (bis 90 %) bei niedrigen Temperaturen (ca. 1.000°C) und drastisch verkürzten Verweilzeiten (90 % Umsatz bei 5 Minuten Verweilzeit) erreicht werden. Weitere Vorteile dieser Methode sind die Nutzung der Kristallisationsenthalpie des Dicalciumsilikats im Prozess und eine hervorragende

Homogenisierung der Produkte mit gleichförmiger Reaktivität in nachfolgenden Prozessen. Das vom Kalkstein freigesetzte CO₂ liegt in konzentrierter Form vor und ermöglicht deshalb die Optionen CCS (Carbon Capture and Storage) oder CCU (Carbon Capture and Use).

Die zum Projektbeginn im Labormaßstab untersuchte Prozesskette wurde während der R-Zement-Laufzeit in einer Pilotanlage verwirklicht, in Betrieb genommen und getestet (Abbildung 1-2).

Materiallagerung und -abmischung sowie die Rohmehl- und Produktmahlung wurden in einfachen gleichzeitig anpassungsfähigen batch-Prozessen (in Abbildung 1-2 links bzw. in der Bildmitte) realisiert, um z. B. auf variable Eingangsstoffe reagieren zu können. Das elektrisch beheizte Drehrohr (rechts) wurde dagegen als kontinuierlicher Reaktor geplant und errichtet, damit die Herstellung in einem skalierbaren Betrieb untersucht werden konnte. Die Anlagenkapazität beträgt rund 10 kg Dicalciumsilikat pro Stunde, an einem Tag erhalten wir bis zu 100 kg Produkt.

Die sekundären Rohstoffe wurden wie geplant von Projektpartnern, die Baureststoffe recyceln, geliefert. Das Netzwerk umfasste zu Projektbeginn das bereits laufende Verbundprojekt REPOST (Recycling von Porenbeton der Firma Xella). Während der Bearbeitung wurde zusätzlich das Projekt URBAN (11/2022-06/2026) eingebunden, in dem wir uns gemeinsam mit den Partnern Fa. Holcim, Sika und Ehl mit dem Recycling von Beton für Pflastersteine oder Betonfertigteile beschäftigen. Damit standen unterschiedliche Rohstoffchargen für den R-Zement-Betrieb zur Verfügung.



Abbildung 1-2: Foto der R-Zement-Pilotanlage

Im Vorhaben URBAN wurden mehrere Tonnen sekundäre Ausgangsstoffe für am Ende geplante Produktionsversuche verarbeitet. Diese zeigten bereits in vermeintlich einheitlichen Chargen eine erhebliche Heterogenität, die sich im Projekt nur durch einigen Aufwand verringern, aber nicht völlig aufheben ließ. In Zusammenarbeit mit der Firma Heinrich Feess GmbH & Co. KG aus Kirchheim/Teck, einem bekannten Baustoffrecycler, wurden zudem erhebliche zeitlichen Schwankungen hinsichtlich chemischer und mineralogischer Zusammensetzung und wesentlicher physikalischer Parameter in gleich deklarierten Produkten, insbesondere in Betonbrechsand, ermittelt. Daraus ergab sich in der Zwischenzeit ein weiteres durch die DFG gefördertes Forschungsprojekt, „R-ClinkerControl“ (2024-2027), das sich mit der (schnellen) Messung und Kompensation von schwankenden Eigenschaften in Baustoffabfällen bzw. der sich ergebenden Rohmehle beschäftigt. Als mittelbares Ergebnis wird sich hier eine Zeitreihe zu Eigenschaften aller Fraktionen aus einer Abbruchmaßnahme (mit Schwerpunkt in Baden-Württemberg) ergeben.

Die Rückgewinnung von wasserlöslichen Beiprodukten, z.B. Aluminiumverbindungen oder des Mineralisators Na_2CO_3 , hat sich als nicht lohnenswert erwiesen. Es konnten weder die notwendigen Mengen für eine externe Aufbereitung hergestellt (siehe dazu die Verzögerungen beim Aufbau der Pilotanlage) noch Dienstleister für diese Aufbereitung gefunden werden. Das ursprünglich geplante Arbeitspaket AP4 wurde nach den Voruntersuchungen im Einvernehmen mit dem Projektträger nicht weiterbearbeitet.

2 Charakterisierung und Aufbereitung von BW-relevanten Ausgangsmaterialien (AP1)

2.1 Erfassung von technologisch und für BW relevanten Stoffströmen

Zu Zusammensetzungen, Eigenschaften und Verwertungsoptionen gibt es für Betonbrechsande eine gute Übersicht aus dem unter Beteiligung des Instituts für Technische Chemie erstellten BW-ThinkTank-Projekt „HOLISCON“ (Bruckschlögl, et al., 2023). Für Porenbeton-Recycling wurde bereits auf das REPOST-Projekt verwiesen.

Bau- und mineralische Abbruchabfälle werden entsprechend ihrer Herkunft nach DIN EN 12620:2008-07 in Verbindung mit DIN 4226-101:2027-08 und der Abfallverzeichnisverordnung (AVV) klassifiziert. In Baden-Württemberg werden mineralische Fraktionen aus der Bauschutttaufbereitung z.B. als rezyklierte Gesteinskörnungen (Typ 1: Betonsplitt bzw. Typ 2: Bauwerkssplitt) zur Herstellung und Verarbeitung von Beton nach DIN 1045-2 und DIN EN 206-1 bis zu einer Druckfestigkeitsklasse C30/37 verwendet. Beton- und Mauerwerksbruch werden mittels Brecher zerkleinert und auf die gewünschte Kornfraktion abgeseibt. Verwendung finden ausschließlich Fraktionen größer als 2 mm.

Feinere Fraktionen werden aktuell auch aufgrund fehlender Normung in Beton nicht eingesetzt. Es gibt aber Bestrebungen, diese Fraktionen als Substitut für die Sandfraktion bzw. als Zuschlagstoff in der Zementproduktion oder als ein Bestandteil von Zementrohmehl zu nutzen.

Bei den Feinfraktionen von gemischtem mineralischem Bauschutt mit Anteilen von Betonbruch (MWC) handelt es sich um sehr heterogene Stoffgemische. Sie können sowohl in der Zusammensetzung als auch in ihren Eigenschaften deutlich variieren. Entsprechend aufwendig ist es, daraus einen homogenen, in seinen Eigenschaften gleichbleibenden Bestandteil von Zementrohmehl zu generieren.

Um diese schwankenden Recycling-Abfallströme zu untersuchen und für die Herstellung nachhaltiger Recyclingzemente beherrschbar zu machen, wird derzeit zusammen mit dem Institut für Baustoffe (IfB) der Leibniz University Hannover das von der DFG innerhalb des Schwerpunktprogramms „Net-Zero-Concrete“ geförderte Projekt R-ClinkerControl (2024-2027) bearbeitet.

Ziel ist es, mithilfe KI-gestützter Kontrollmechanismen die unvermeidbaren Schwankungen der chemischen und physikalischen Eigenschaften von MWC auszugleichen.

Dazu werden in Zusammenarbeit mit der Firma Heinrich Feess GmbH & Co. KG aus Kirchheim/Teck RC-Materialien verschiedener Qualität betrachtet. Zum einen wird gemischter MWC, zum anderen sortenrein anfallendes Betonabbruchmaterial untersucht.

Die Erfassung von technologisch und für Baden-Württemberg relevanten Stoffströmen nach Menge, mineralischem Phasenbestand, Korngrößenverteilung und chemischer Zusammensetzung ist ein weiterer Bestandteil dieser Arbeit.

Für Porenbetonabbruch wurde im Projekt REPOST sowohl das aggregierte als auch das regionalisierte Altporenbetonaufkommen aus dem Abbruch und Rückbau in Deutschland untersucht. Mittels eines Quantifizierungsmodells konnte gezeigt werden, dass bundesweit für das Jahr 2050 ein jährliches Aufkommen von über 4 Millionen m³ Altporenbeton zu erwarten ist.

Das aggregierte Altporenbetonaufkommen kann mithilfe eines Quantifizierungsmodells auch auf die kreisfreien Städte und Landkreise in Deutschland aufgeteilt werden. Diese Aufteilung zeigt regional deutliche Unterschiede. So fallen im Norden Deutschlands – insbesondere in Schleswig-Holstein und Niedersachsen – ebenso wie in Baden-Württemberg höhere Altporenbetonaufkommen als im Rest des Landes an.

Außerdem werden besonders in großen Städten hohe Aufkommen an Altporenbeton erwartet. Zwangsläufig sind Regionen mit hohem Aufkommen in der Nähe von Porenbetonwerken zu finden. Dazu gehört auch die nördliche Hälfte Baden-Württembergs um Stuttgart mit vier Porenbetonwerken in einem größeren Umkreis. Entsprechend der Studie fielen hier im Jahr 2020 7800 m³ Altporenbeton an. Auch regional ist bis 2050 eine deutliche Steigerung zu erwarten (Steins, et al., 2021), (Steins, et al., 2021a).

2.2 Entwicklung eines Standards für Feinbrechsand zur Herstellung von NT-Belitzklinker

Um einen calciumreduzierten NT-Belitzementklinker mit einem C/S-Verhältnis von 2.0 zu brennen, muss Betonbrechsand einerseits eine chemische Zusammensetzung (bezogen auf die sieben Hauptoxide) aufweisen, die den Verbrauch des Korrekturstoffs Kalkstein minimiert. Weiterhin können nur Materialien akzeptiert werden, die frei von Asbest und anderen WHO-Fasern sind. Metalle, Kunststoffe in Form von Folien und Gewebe, Holz, Papier und Glas müssen vollständig aussortiert werden.

Die beim Brechen und Sieben anfallenden Fraktionen mit einem Korndurchmesser kleiner 2 mm werden als feine rezyklierte Gesteinskörnungen bezeichnet. Dafür hat sich der Begriff Betonbrechsand etabliert, wenn sie aus Betonbruch bestehen (THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien).

Typischerweise bestehen Betonbrechsande aus feinen Partikeln der Gesteinskörnung des Ausgangsbetons plus anhaftenden oder separat vorliegenden Zementsteinkörnern, d.h. also bei ursprünglich verwendeten silikatischen Gesteinskörnungen aus Sand und Zementhydraten, vorwiegend C-S-H-Phasen. Der Massenanteil von den Brechsanden zur groben rezyklierten Gesteinskörnung hängt von der Betonqualität und der Aufbereitungstechnik ab. Typisch ist ein Massenverhältnis von 30 zu 70. Brechsande können aber auch bis zu 50 Massenanteile ausmachen (Ulsen, et al., 2013).

Für die Verwendung als Rohmehlkomponente in einem Drehrohrprozess ist eine hohe Feinheit von Vorteil. Die Reaktivität beim Klinkerbrennen wird dadurch stark beeinflusst. Bei hoher Ausgangsfeinheit sind keine mechanisch und energetisch aufwändigen Mahlungen notwendig bzw. sie können auf das zur Homogenisierung nötige Minimum beschränkt bleiben.

Auch die chemische Zusammensetzung von Betonbrechsanden ist sehr variabel, da eine Vielzahl von Zementen, Betonzusatzstoffen und Gesteinskörnungen verwendet werden. Eine Auswertung verschiedenster Studien erfolgte in (Höffgen, et al., 2025).

Bei den Betonbrechsanden dominieren Siliciumdioxid (SiO_2) und Calciumoxid (CaO) mit Massenanteilen von 16 bis 78 % bzw. 5 bis 38 %; die Schwankungsbreite ist allerdings sehr groß. Dies zeigt sich auch in den Nebenbestandteilen, die als Störfaktoren für den Einsatz in Baustoffen oder im Kontakt mit der Umwelt betrachtet werden müssen: Sulfate (als SO_3) mit Massenanteilen von 0,3 bis 1,0 % und Alkalien (als Oxide) mit Massenanteilen von 0,5 bis 2,7 %.

Ein weiterer Sekundärrohstoff, der als Edukt für die Herstellung von NT-Belitzementklinker verwendet werden kann, ist Alt-Porenbeton. Porenbeton wird heute grundsätzlich deponiert. In geringem Umfang ist ein Recycling als aufbereitetes Granulat bzw. Porenbetonmehl in der Porenbetonherstellung möglich. Porenbeton besteht vorwiegend aus Calciumsilikathydrat-Phasen insbesondere in Form von Tobermorit. Um eine optimale Tobermoritbildung gewährleisten zu können wird CaSO_4 zudosiert. Das bedingt einen erhöhten Sulfatgehalt im Porenbetonmehl. Aluminium findet als Triebmittel Verwendung.

Die chemische Zusammensetzung von Porenbetonmehl dominieren Siliciumdioxid (SiO_2) und Calciumoxid (CaO) mit Massenanteilen zwischen 42 und 56 % bzw. 24 und 31 %. Der Sulfatmassenanteil (als SO_3) schwankt zwischen 1,46 und 10,65 % sehr stark. Der Aluminiummassenanteil (als Al_2O_3) liegt bei 2 bis 3 %. Der Massenanteil anderer Alkalien (als Oxide) schwankt ebenfalls zwischen 2 und 3 %.

Trotz der hohen Sulfatgehalte im Sekundärrohstoff ist Porenbeton zur Herstellung von NT-Belitzementklinker geeignet, wenn Sulfat durch angepasste Mineralisatoren gebunden wird (Garbev, et al., 2022).

Im Projekt „R-Clinker-Control“ werden weitere mineralische Recycling-Abfallströme auf Eignung untersucht.

Aus den bisher zur Verfügung stehenden RC- Materialien und den damit gewonnenen Erfahrungen, wurden die in Tabelle 2-1 aufgeführten Werte als Standard für Brechsande zur Herstellung von Belitzementklinker festgelegt.

Tabelle 2-1: Standard für Brechsande zur Herstellung von Belitzementklinker

Komponente	Massenanteile von-bis [%]
Siliciumdioxid (SiO ₂)	40 - 80
Calciumkarbonat (CaCO ₃)	6 - 40
Sulfat (SO ₃)	- 10
Aluminiumoxid (Al ₂ O ₃)	- 5
Weitere Alkalioxide	- 7

2.3 Aufbau einer Aufbereitungslinie im Labormaßstab

Die im Labor aufgebaute Aufbereitungslinie (siehe Abbildung 2-1) besteht aus einem Backenbrecher, einer Mühle, Sieben, Trockenofen, Labordrehrohr und der entsprechenden Analytik. Es ist möglich, Betonbrocken mit Korngrößen von bis zu 70x100x100 mm³ zu zerkleinern und aufzubereiten.

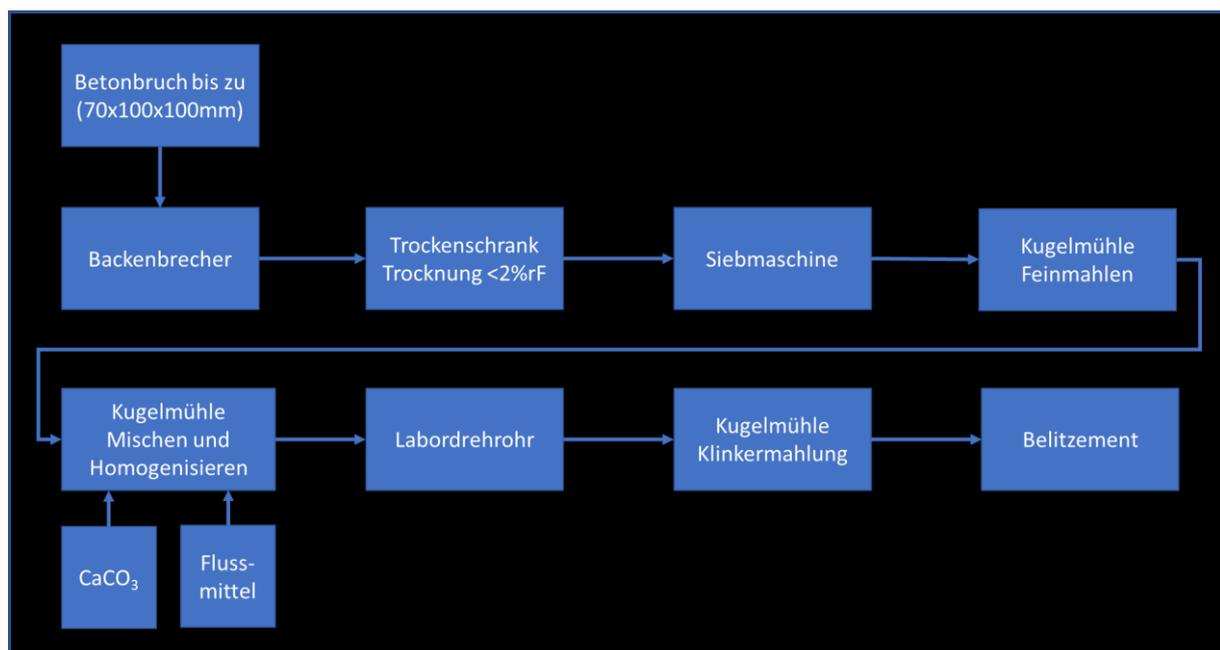


Abbildung 2-1 Aufbereitungslinie Labormaßstab (Schema)

In einem ersten Schritt wurden Betonpflastersteine (Bp) zerkleinert, gesiebt und die einzelnen Kornfraktionen auf Eignung zur Klinkerherstellung untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass es mit dieser Aufbereitungslinie nicht möglich ist, gezielt zementsteinreiches, calciumhaltiges Material in der Feinfraktion anzureichern (siehe Tabelle 2-2).

Tabelle 2-2: Chemische Zusammensetzung von Pflastersteinfraktionen nach Aufbereitung im Labormaßstab (RFA, Zahlenangaben in Massenprozent; Differenz zu 100% Wasser, CO₂ und Sonstige).

Korngröße [mm]	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Σ	Ca/Si molar
< 0,5	0,69	0,83	4,97	67,7	0,63	1,43	13,3	0,13	1,52	91,2	0,21
0,5 – 1,0	0,58	0,46	3,56	78,4	0,24	1,34	7,30	<0,1	0,94	92,92	0,10
1,0 – 2,0	0,63	0,47	3,70	77,3	0,18	1,34	7,65	0,10	1,12	92,49	0,11
2,0 – 4,0	0,62	0,40	3,75	74,7	0,20	1,16	8,72	0,11	1,22	90,88	0,13
4,0 – 8,0	0,62	0,52	3,56	74,1	0,18	0,99	10,0	0,12	1,49	91,58	0,14

Für die Hauptbestandteile lassen sich nur bedingt Trends in der Verteilung über die Kornfraktionen erkennen, SiO₂ erscheint im Feinstgut vermindert, CaO eher angereichert vorzuliegen. Die Zahlen ergeben allerdings keinen konsistenten Trend über alle Fraktionen; die Änderungen sind gering.

2.4 Optimierung physikalischer Verfahren zur Rohstoffaufbereitung

Im Labormaßstab gelang es nicht, gezielt Zementstein in der Feinstfraktion anzureichern.

Im Projekt URBAN, (11/2022-06/2026), wird in Zusammenarbeit mit Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft das Herstellen von CO₂-reduziertem Beton durch Upcycling von Reststoffen aus der Betonaufbereitung und CCU im industriellen Maßstab untersucht. Hierfür wird auf industriell aufbereitetes Material zurückgegriffen, bei dem mit Hilfe eines speziellen Verfahrens, des „Smart Liberator™“, Betonabbruch gezielt so aufbereitet wird, dass sich Zementstein in der Feinfraktion anreichert (siehe Tabelle 2-3).

Tabelle 2-3: Ergebnisse der RFA von URBAN-Material < 0,25 mm (Differenz zu 100% Wasser, CO₂ und Sonstige)

Korngröße [mm]	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Σ	Ca/Si molar
< 0,25	0,37	1,27	5,54	45,56	1,17	0,96	27,36	0,26	2,11	84,6	0,64

Im Weiteren wird daher entsprechend aufbereitetes (URBAN-) Material verwendet, das in der Pilotanlage zu Rohmehl konditioniert wird.

Wie sich zeigt, ist es durchaus lohnenswert, die Aufbereitungstechnologie zu optimieren, um die Anreicherung von Zementstein in der Feinfraktion zu verbessern:

Wenn eine entsprechende Qualität der Aufbereitung von Abbruchbeton gewährleistet werden kann, kann auch ein geringes Maß an Fremdbestandteilen toleriert werden.

Im Projekt R-Zement wurden alle Rohmehle mit Brechsand-Chargen aus den genannten Industrieprojekten hergestellt, damit ausreichende Mengen mit einer handhabbaren Gleichmäßigkeit eingesetzt und die Testbrände durchgeführt werden konnten. In begleitenden Untersuchungen zum Abfallaufkommen aus Abfallbilanzen oder dem Gebäudestand (siehe URBAN) zeigen sich sehr unterschiedliche Mengenschätzungen und Datenlücken. Ein umfassendes Stoffkataster mit Recyclingpotential, auch mit Fokus auf Baden-Württemberg, wird sich erst durch das neu begonnene Projekt R-Clinker-Control ergeben.

3 Experimentelle Untersuchung der Calcinierung, Abgasreinigung und Korrosion im Laborofen (AP 2)

3.1 Calcinierungsversuche

Die ersten Calcinierungsversuche mit Rohmehl aus bisher nicht untersuchten Quellen bzw. mit Variationen in deren Aufbereitung werden stets als Kleinversuche in einem diskontinuierlichen Muffelofen bzw. in einem Labordrehrohrföfen durchgeführt.

Ausgangsmaterial ist in der Regel ein Betonbrechsand. Dieser wird in einem ersten Schritt auf Korngrößen $< 125\mu\text{m}$ aufgemahlen. Anschließend wird unter Zudosierung von CaCO_3 und Mineralisator (Na_2CO_3 bzw. CaCl_2) ein Rohmehl gemischt.

3.1.1 Versuche im Laborofen (Batch)

Folgende Vorgehensweise wurde für die Calcinierungsversuche im Laborofen festgelegt: Jeweils 100 g Rohmehl werden in einen zylindrischen Schmelztiegel aus gesintertem Aluminiumoxid gegeben. Die Tiegel haben ein Fassungsvermögen von 270 ml, sie sind zu etwa einem Drittel mit Material gefüllt. Der Brennvorgang findet in einem Hochtemperaturofen Supertherm LHT 04/17 der Firma Nabertherm statt. Ein aktives Einstellen der Atmosphäre im Ofen ist zwar nicht möglich, während des Aufheizvorgangs stellt sich allerdings durch die Calcinierung von CaCO_3 und Na_2CO_3 , über der Probe eine CO_2 -Atmosphäre ein. Diese hat so lange Bestand, bis CaCO_3 und Na_2CO_3 vollständig reagiert haben.

Der Ofen wird zusammen mit dem Material in 60 Minuten auf 1000°C aufgeheizt. Das Material verbleibt dann für weitere 60 Minuten bei dieser Temperatur und kühlt anschließend im Ofen bis auf Raumtemperatur ab.

Als Beispiel werden hier die Ergebnisse von zwei Rohmehlen dargestellt:

- HC_Mix_01-1C: Bp + CaCO_3 + 5% Na_2CO_3
- HC_Mix_01-2C: Bp + CaCO_3 + 2,5% Na_2CO_3

Der mineralogische Phasenbestand der Testbrände ist in Tabelle 3-1 zusammengefasst.

Die kombinierte Analytik aus Röntgendiffraktometrie (XRD), Thermogravimetrie (TG) und Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) ermöglicht die Bestimmung der Ausbeute von C_2S (kristallin und amorph).

Es zeigt sich, dass in den beispielhaft dargestellten Versuchen ein Massenanteil von 2,5 % Na_2CO_3 nicht ausreicht, um das Material vollständig in reaktives C_2S umzusetzen - speziell verbleiben im Versuch HC_Mix_01-2C große Mengen an CaO (15 %) im Produkt. In beiden Fällen bilden sich zusätzlich calciumhaltige Neben-

produkte (Massenanteile von ca. 4 % Brownmillerit, $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$, und 3 bis 4 % Combeit, $\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{Si}_3\text{O}_9$).

Tabelle 3-1: Phasenbestand der Brennversuche im Laborofen. Angaben in Massenprozent (am.: amorph; $\beta\text{-C}_2\text{S}$: $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$, $\alpha\text{HC}_2\text{S}$: $\alpha\text{-H-Ca}_2\text{SiO}_4$; Spu.: Spurrit; Qz: Quarz; W.: Wollastonit; Fsp.: Feldspäte $(\text{K,Na,Ca})(\text{Al,Si})_4\text{O}_8$; Differenz zu 100% Sonstige).

Probe	am.	$\beta\text{-C}_2\text{S}$	$\alpha\text{HC}_2\text{S}$	Reaktiv (am+ β + α)	Spu.	Qz.	CaCO_3	CaO	CaCO_3 +CaO	W.	Fsp	Σ
-1C	20,7	31,6	25,7	78,0	0,0	0,2	0,2	4,6	4,8	1,0	0,5	84,5
-2C	21,4	31,7	10,7	63,8	0,5	3,5	0,3	15,2	15,5	4,2	1,0	88,5

3.1.2 Versuche im Labordrehrohr (kontinuierlich)

Für Versuche im Labordrehrohr sind Rohmehlchargen von je 750 g nötig. Sie werden mit 200g/h ins Drehrohr gefördert und im Gegen- oder Gleichstrom (83 l/h CO_2) bei 1000°C und einer mittleren Verweilzeit von 12 bis 15 Minuten gebrannt. An- und Abfahrmaterial wird verworfen. Materialanbackungen an der Wandung müssen ständig mit einem Metalldraht gelockert werden.

Beispielhaft werden die Ergebnisse für drei verschiedene Rohmehle, die sich im zugesetzten Mineralisator unterscheiden, zusammengefasst. Der erste Versuch wurde geteilt, so dass ein Teilversuch unter Gleichstrom-, der andere unter Gegenstrombetrieb durchgeführt wurde:

- U03_01a: Bp + CaCO_3 + 5% Na_2CO_3 / CO_2 Spülgas im Gleichstrom
- U03_01b: Bp + CaCO_3 + 5% Na_2CO_3 / CO_2 Spülgas im Gegenstrom
- U03_02: Bp + CaCO_3 + 5% Na_2CO_3 + 2,6 CaCl_2 / CO_2 Spülgas im Gleichstrom
- U03_03: Bp + CaCO_3 + 2,6% CaCl_2 / CO_2 Spülgas im Gleichstrom

Tabelle 3-2 zeigt die Phasenzusammensetzung der Produkte.

Tabelle 3-2: Phasenbestand der Brennversuche im Labordrehrohr. Angaben in Massenprozent (am.: amorph; $\beta\text{-C}_2\text{S}$: $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$, $\alpha\text{HC}_2\text{S}$: $\alpha\text{-H-Ca}_2\text{SiO}_4$; Spu.: Spurrit, $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_2(\text{CO}_3)$; Qz: Quarz, SiO_2 ; W.: Wollastonit, CaSiO_3 ; Fsp.: Feldspäte, $(\text{K,Na,Ca})(\text{Al,Si})_4\text{O}_8$; Differenz zu 100%: Sonstige).

Probe	am.	$\beta\text{-C}_2\text{S}$	$\alpha\text{HC}_2\text{S}$	Reaktiv (am+ β + α)	Spu.	Qz.	CaCO_3	CaO	CaCO_3 + CaO	W.	Fs p	Σ
U03_01a	34,8	3,2	45,4	83,4	0,1	2,2	3,6	3,7	7,3	1,2	1,4	95,6
U03_01b	31,9	7,2	41,6	80,7	0,3	2,0	2,2	7,0	9,2	1,4	1,3	94,9
U03_02	26,8	27,7	19,4	73,9	1,7	2,2	6,1	8,1	14,2	1,2	1,8	95
U03_03	20,8	13,4	3,0	37,2	21,8	8,6	12,9	13,4	26,3	0,7	0,4	95

Bei 1000°C reicht die Zudosierung von 5% Na₂CO₃ als Mineralisator aus, das Rohmehl zu einem reaktiven Produkt umzusetzen. Das gelingt sowohl bei einem Spülgasstrom im Gleich- als auch im Gegenstrom.

Wird zusätzlich CaCl₂ zudosiert, ändert sich die Zusammensetzung des Produkts: Der Anteil an β-Ca₂SiO₄ steigt auf Kosten des α-H-Ca₂SiO₄-Anteils. Zusätzlich sind die Anteile an CaO und CaCO₃ im Produkt deutlich höher.

Wird ausschließlich CaCl₂ als Mineralisator eingesetzt resultiert ein deutlich geringerer reaktiver Anteil im Produkt. Der eingesetzte Massenanteil von 2.6 % CaCl₂ reicht unter diesen Bedingungen nicht aus, um mehr reaktives Material zu generieren. Es verbleiben große Mengen an CaCO₃ und CaO im Produkt. Auch der Spurritgehalt (ein Calciumsilikatkarbonat, Ca₅(SiO₄)₂CO₃) ist deutlich erhöht.

3.1.3 Fazit zu den Laborversuchen

Die Versuche im diskontinuierlichen Hochtemperatur-Laborofen sind aussagekräftig und charakterisieren die Rohmehlmischung in Bezug auf die zu erreichende Qualität des Zementklinkers. Der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung sind einfach, der Zeit- und Rohmehlbedarf gering. Ein Messen der exakten Temperatur im Materialbett ist jederzeit möglich.

Das Labordrehrohr ist als Bestandteil der Aufbereitungslinie nur bedingt geeignet. Der Bedarf an Rohmehl und der Zeitaufwand sind deutlich höher. Die Produktqualitäten sind gut, es kommt aber immer wieder zu Problemen bei der Materialaufgabe. Dadurch ist ein gleichmäßiger Materialstrom durch den Ofen nicht gegeben. Die Aufenthaltszeit des Materials im Ofen variiert, ein kontinuierlicher Betrieb kann nicht aufrechterhalten werden. Auch ist es nicht möglich, eine konstante Atmosphäre im Drehrohr zu gewährleisten: Durch die Einlauf- und Auslaufkappen dringt Falschluf ins Drehrohr; es herrschen keine nachvollziehbaren Versuchsbedingungen. Des Weiteren ist ein Messen der Materialtemperatur im Drehrohr nicht möglich.

Um neue Rohmehlmischungen unter kontrollierten, nachvollziehbaren Bedingungen testen zu können, findet deshalb im Weiteren der Hochtemperatur Batch-Ofen Nabertherm Supertherm LHT 04/17 Verwendung.

3.2 Abgasreinigung

Versuche zur Abgasreinigung sind mit den Laboröfen nicht möglich, da die anfallenden Abgasmengen zu gering sind. Um eine potentielle Gefährdung des Personals auszuschließen sind sowohl der Drehrohröfen als auch der Nabertherm Supertherm in geeigneten Laborabzügen aufgebaut.

Zur Abgasreinigung in der Pilotanlage dient ein Feinstofffilter mit austauschbaren Einsätzen unterschiedlicher Feinheit und ein Universal-Adsorptionsfilter auf Aktivkohlebasis.

3.3 Korrosion im Laborofen

Zur Auslegung des Drehrohrofens wurden Materialtest im Laborofen durchgeführt. Als Rohrmaterial für elektrisch beheizte Drehrohre eignen sich:

- Hitzebeständiger Stahl (bis 1150°C)
- Nickelbasislegierungen Hastelloy, Inconel (bis 1250°C)
- Technische Keramik (Al_2O_3 , Si_3N_4) (bis 1600°C)

Sowohl die Nickelbasislegierungen als auch die Technischen Keramiken zeichnen sich durch ihre hohe Korrosionsbeständigkeit und Festigkeit - insbesondere bei hohen Temperaturen - aus. Aufgrund des deutlich höheren Preises und der im Beschaffungszeitraum unsicheren Verfügbarkeiten zu stark schwankenden Tagespreisen kam ein Keramikrohr allerdings nicht in Frage.

Da der im Drehrohr der Pilotanlage zu realisierende Temperaturbereich unterhalb von 1150°C liegt, ist prinzipiell sowohl der Einsatz von hitzebeständigem Stahl als auch von einer der Nickelbasislegierungen Hastelloy bzw. Inconel als Drehrohrmaterial möglich.

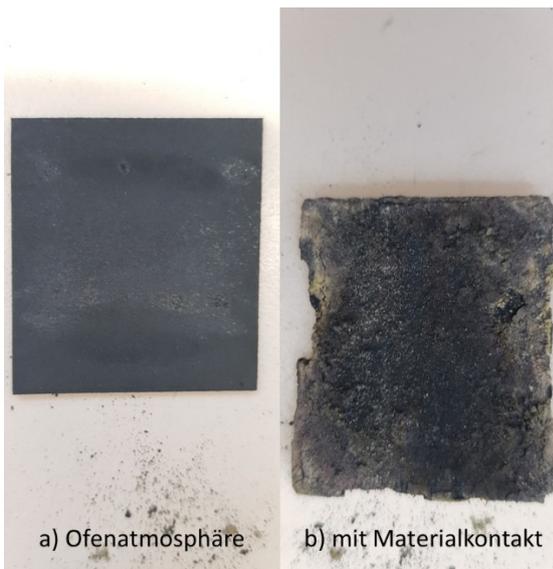
Um den deutlichen Mehrpreis der Legierungen gegenüber Stahl zu rechtfertigen, muss die Widerstandsfähigkeit der Nickellegierungen gegen Korrosion deutlich besser sein. Dies wurde vorab in Korrosionsversuchen überprüft.

Im Drehrohr sollen Rohmehle sowohl mit Na_2CO_3 als auch CaCl_2 als Mineralisator gebrannt werden. Für die Korrosionsversuche dient deshalb Rohmehl mit einem Massenanteil von 2 % CaCl_2 als Mineralisator.

Es wurden jeweils 100 g Rohmehl in einen Tiegel gegeben. Jeweils ein Plättchen der Nickelbasislegierungen Hastelloy bzw. Inconel wurden sowohl direkt in das Rohmehl gesteckt als auch in über dem Rohmehl in die Ofenatmosphäre gelegt (siehe Abbildung 3-1). Das Rohmehl wurde im Nabertherm Hochtemperaturofen Supertherm LHT 04/17 für 5 h bei 1100°C gebrannt und über Nacht abgekühlt. Der Versuch wurde jeweils 11 Mal wiederholt. Die Gesamtaufenthaltszeit jeder Legierung im Material bei 1100°C betrug somit 55 h zuzüglich der jeweiligen Abkühlphase.



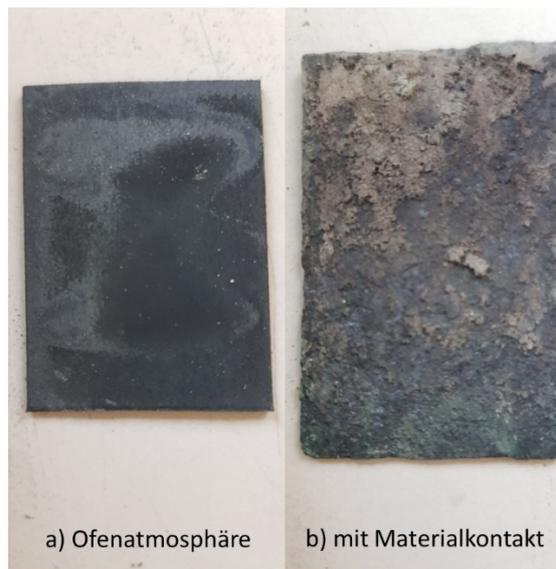
Abbildung 3-1: Korrosionstest an Hastelloy mit/ohne Materialkontakt



a) Ofenatmosphäre

b) mit Materialkontakt

Hastelloy



a) Ofenatmosphäre

b) mit Materialkontakt

Inconel

Abbildung 3-2: Nickelbasislegierungen nach Beendigung der Versuche a) in der Ofenatmosphäre, b) mit Materialkontakt.

Wie die Korrosionstests zeigen, kommt es mit zunehmender Beanspruchungsdauer bei Materialkontakt an beiden Nickelbasislegierungen zu deutlicher Korrosion. Die nur der Ofenatmosphäre ausgesetzten Proben zeigen keine Korrosionsspuren (siehe auch Abbildung 3-2).

Die Versuche sind aufgrund der Rahmenbedingungen nur bedingt geeignet, Fragen nach realen Standzeiten von Rohrmaterialien abzuschätzen. Da es aber auch bei den in Frage kommenden kostenintensiven Nickelbasislegierungen Hastelloy und Inconel schon nach recht kurzen Beanspruchungsdauern zu deutlicher Korrosion kommt, wurde in Absprache mit den in Frage kommenden Herstellern für das Pilotdrehrohr aus wirtschaftlichen Erwägungen auf hitzebeständigen Stahl zurückgegriffen.

Die Standzeit des Pilotdrehrohrs mit hitzebeständigem Stahl kann noch nicht abschließend beurteilt werden, da die bisher aus insgesamt 18 Kampagnen mit jeweils ca. 12 Betriebsstunden kumulierten 216 Gesamt-Betriebsstunden dazu nicht ausreichen.

4 Pilotanlage (AP 3)

4.1 Planungsphase, Beschaffung und Installation

Durch verschiedenste Verzögerungen bedingt, konnte nach Planung und Beschaffung erst im November 2023 mit Lieferung, Aufbau und Inbetriebnahme der einzelnen Anlagenkomponenten und der nötigen Zusatzkomponenten begonnen werden.

Die Pilotanlage besteht im Wesentlichen aus einer Bigbag-Station zum Handling der Rohmaterialien, einer Trocknung für den Betonbrechsand, einer Mühle zum Feinmahlen, Mischen und Homogenisieren, dem Drehrohrföfen für den Brennvorgang, einer Abgasanlage mit Gasanalytik sowie weiteren Nebenkomponenten und Infrastruktur. Die Anlagenteile wurden planerisch in einen Hallennutzungsplan eingearbeitet, der ständig an die verfügbaren Informationen angepasst wurde. Er ist in seiner letzten Version in Abbildung 4-1 dargestellt.

In den folgenden Abschnitten werden die Planung sowie Details der einzelnen Anlagenteile beschrieben.

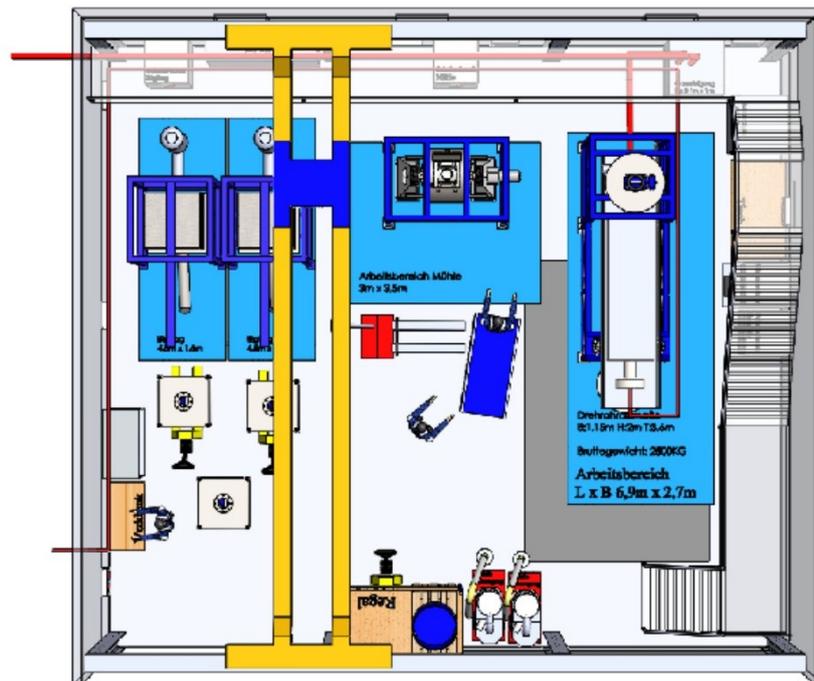


Abbildung 4-1: Schematischer Hallennutzungsplan

4.1.1 Bigbag-Station

Die Planung der Bigbag-Entleerstation zur Entleerung von zwei verschiedenen Materialien (Kalksteinmehl und Betonbrechsand) wurde in Zusammenarbeit mit der

Firma EMDE im März 2023 finalisiert. Sie ermöglicht den effizienten Umgang mit Schüttgütern und sorgt für einen sicheren, sauberen und zeitsparenden Umschlag der Rohstoffe.

Aufgrund der Platzverhältnisse in der Halle musste der Materialaustrag nach vorn erfolgen, was durch schwenkbare Förderschnecken realisiert werden konnte. Auch eine Option zur Teilentleerung von Bigbags sowie die Trennung der Abluftströme wurden realisiert. Die Gesamtkonstruktion wurde so angepasst, dass eine direkte Befüllung sowohl von Fässern als auch der zu beschaffenden Transportbehälter möglich ist (lichte Höhe des Materialaustrags mindestens 1400 mm).

Lieferung und Aufbau der Anlage erfolgten plangemäß im November 2023.

4.1.2 Trocknung

Nach erfolglosen Tests eines kontinuierlichen Plattentrockners (ANDRITZ Gouda Plate Dryer) wurde im zweiten Quartal 2022 ein Trockenschrank Memmert UF 750 beschafft. Durch Anpassung der Trocknungsdauer kann die nach unseren bisherigen Erfahrungen schwankende Feuchtigkeit (vor allem der Betonbrechsande infolge von unterschiedlichen Lagerungsbedingungen) auf eine akzeptable Restfeuchte <2 % auf die Trockenmassen bezogen eingestellt werden.

Um Batchtrocknung von ca. 100 kg Material zu ermöglichen, wurden acht stapelbare Trockenwannen sowie ein Trichter und eine Kippvorrichtung zum Materialhandling konstruiert und Ende 2022 beschafft. In Kombination mit einer mobilen Entstaubungsanlage ist ein sicheres Materialhandling gegeben. Da der Trockenschrank im Abluftbetrieb arbeiten soll, wurde eine Verrohrung zur Abführung der feuchten Abluft aus der Halle installiert. Durch das Einbringen des Materials in den Trockenwannen wird Staub im Abluftstrom effektiv vermieden. Die Trocknung ist seit Januar 2023 einsatzbereit.

4.1.3 Mahlanlage

Feinmahlen, Mischen und Homogenisieren von Material erfolgt in einer Kugelmühle im Batch-Betrieb. Anforderungen waren ein Mahlgutvolumen von 100-120 Liter, eine erreichbare Mahlfeinheit von $d_{95} < 100 \mu\text{m}$ (Steuerung über die Mahldauer) mit maximaler Aufgabe-Korngröße von 5 mm, eine Einhausung mit der Möglichkeit einer Mahlgutbefüllung von oben aus einem aufgesetzten Transportbehälter sowie eines möglichst staubarmen Materialaustrags nach unten direkt in den Vorlage- oder einen Transportbehälter (lichte Höhe des Austrags mindestens 1400 mm). Diese Anforderungen wurden am besten vom Modell FHZ WST 500 D erfüllt.

Die Mühle wurde im August 2021 bestellt und im September 2021 geliefert. Aufgrund der oben beschriebenen Verzögerungen mussten die Einzelteile zwischengelagert werden, ein Aufbau konnte erst Ende 2023 erfolgen.

4.1.4 Datenerfassung und -auswertung

Die Datenerfassung und -auswertung erfolgt an einem PC mit der Software LabVIEW. Da das System modular aufgebaut ist (sowohl Software als auch Hardware), konnte die im November 2022 beschaffte Grundausstattung im Zuge der fortschreitenden Planung um eine OPC-Schnittstelle zur Kommunikation mit der Drehrohrsteuerung und verschiedene Analog- und Digital-Eingangsmodule für die verschiedenen Druck-, Temperatur- und Massendurchfluss-Sensoren erweitert werden. Weitere Anpassungen und Erweiterungen sind möglich.

4.1.5 Abgasanlage und Abgas-Analytik

Die Planung der Abgasanlage beinhaltete Staubfilter, Aktivkohle-Filter, diverse Sensoren zur Messung von Temperatur, Druck und Gasgeschwindigkeit, das Rohrleitungssystem und eine Saugpumpe. Zusätzlich ist eine Rohrbegleitheizung vorgesehen, um Kondensation im Abgasstrang zu vermeiden. Die Auslegung erfolgte gemäß der zum Teil bekannten Prozessparameter. Nach der Beschaffung der Einzelkomponenten erfolgte ab Ende 2023 die Auslegung der Anlage inklusive Verrohrung und Montage in Kooperation mit der Firma Kortüm+Zoldan. Zusätzlich wurde die Installation der Reingasversorgung und der Druckluftversorgung für die Halle geplant. Die Installation konnte im Juni 2024 abgeschlossen werden.

Die Abgas-Analytik sollte die Messung von CO, CO₂, O₂ sowie SO₂ umfassen. Dazu wurde gemeinsam mit der Firma ABB ein System aus zwei IR-Photometern (CO low/high, SO₂ high, CO₂), einem UV-Photometer (SO₂ low) sowie einer paramagnetischen O₂-Messung konzipiert. Um spätere Kalibrierungen zu erleichtern, wurde für beide IR-Photometer eine integrierte Kalibrierküvette vorgesehen. Aufgrund der frühzeitigen Planung konnte die Beschaffung bereits Mitte 2021 erfolgen.

4.1.6 Drehrohrofen

Die Planung des Drehrohrofens begann bereits Ende 2019. Prinzipielle Anforderungen waren unter anderem eine erreichbare maximale Temperatur von 1100°C, ein Massendurchsatz entsprechend 10 kg Produkt pro Stunde, einstellbare Ofenatmosphäre mit N₂ / CO₂ / O₂, flexible Gasführung für Gleich- oder Gegenstrom. Da es sich um eine Einzelanfertigung handelt, waren mehrere Planungsrunden gemeinsam mit dem Hersteller notwendig. Die Planungen konnten im 2. Quartal 2022 erfolgreich abgeschlossen werden. Durch Insolvenz des vorgesehenen Auftragnehmers verzögerte sich die finale Beauftragung. Anfang 2023 wurde mit der Industrieofen- und Anlagenbau GmbH ein neuer Partner gefunden. So konnte bereits Ende Q2/2023 die Auftragsvergabe erfolgen. Sie beinhaltete die Lieferung eines Vorlagebehälters (beheizbar, mit Schutzgas spülbar, mit Zellenradschleuse) sowie zweier normaler Transportbehälter für das Materialhandling.

Nach der Warmabnahme beim Hersteller erfolgte die Lieferung und Montage der Anlage im April 2024. Anschließend wurden die Spülgas- und Abgasleitungen angeschlossen und nach kleineren Nachbesserungen war die Anlage im November 2024 betriebsbereit.

4.1.7 Zusätzliche Kleinkomponenten

Zusätzlich erfolgte die Planung und Beschaffung von Kleinkomponenten, die für den Regelbetrieb der Anlage notwendig sind: Ende 2021 wurde eine Scherearbeitsbühne beschafft, um eine sichere Bedienung, Wartung und Reparatur von Mühle und Drehrohr zu gewährleisten. Weitere Investitionen betrafen zwei Wiegehubwagen zur Materialdosierung sowie ein Hochhubwagen. Zur Entstaubung dienen zwei mobile Entstaubungsanlagen der Klasse M sowie eine der Klasse H, deren Lieferung in Q1/2022 und Q4/2023 erfolgte.

Am 11. Juni 2024 wurde die Pilotanlage unter großer Beteiligung des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, den Förderungsgebern der Begleitprojekte, Projektpartnern sowie von Forschern aus dem KIT eingeweiht.

4.2 Inbetriebnahme und Funktionstests

Die Inbetriebnahme des Drehrohrrofens als Hauptkomponente der Anlage erfolgte gemeinsam mit dem Hersteller bis zum 30.04.2024. Dabei ging es zunächst um die prinzipielle Erfüllung der vorgegebenen Betriebsparameter (vor allem Materialaufgaberate und erreichbare Ofentemperatur) sowie Funktionsfähigkeit der Steuer- und Regeleinrichtungen. Als Material wurde ein noch vorhandenes nicht vollständig umgesetztes Rohmehl aus Vorversuchen verwendet.

Dabei wurden verschiedene Nachbesserungsbedarfe festgestellt, die parallel zum Testbetrieb bis November 2024 vom Hersteller abgestellt werden konnten. Im Juli waren die Arbeiten zum Anschluss der Gasversorgung und der Abgasleitungen erfolgt, so dass erste Funktionstest der Einzelkomponenten unter normalen Betriebsbedingungen und mit Standard-Ausgangsstoffen durchgeführt werden konnten.

Abbildung 4-2 zeigt ein Foto der betriebsbereiten Anlage in Q3/2025, nur der Trockenschrank befindet sich rechts außerhalb des Bildes.

4.2.1 Entwicklung eines Standardverfahrens

Die Ergebnisse der Funktionstests wurden verwendet, um eine Standardprozedur zur Herstellung von NT-Belitzementklinker zu entwickeln. Sie ist in Abbildung 4-3 schematisch dargestellt und soll im Folgenden im Detail beschrieben werden.

Ausgangsstoffe sind Betonbrechsand und Kalkstein (Kalksteinmehl Medenbach), die in Bigbags angeliefert werden. Sie werden aus der Bigbag-Station in Transportbehälter umgefüllt, die Gewichtskontrolle erfolgt mit Wiegehubwagen. Der verwendete

Betonbrechsand besitzt eine Korngröße von 0-250 µm (z.B. aus dem SmartCrusher-Prozess, Projekt URBAN) mit Restfeuchtegehalten um die 10 Masse-%. Er wird zunächst in 100 kg-Chargen auf Trockenbleche verteilt und im Trockenschrank bei 250°C für > 48 h getrocknet. Damit wird die Restfeuchte auf kleiner als 2 % reduziert, was gravimetrisch überprüft wird. Für das Kalksteinmehl kann dieser Schritt entfallen, da es trocken ist (Restfeuchte <1 Gew.%).



Abbildung 4-2: R-Zement-Pilotanlage mit Bigbagstation, Mühle, Drehrohr

Nach dem Abkühlen wird das Material mittels einer Kippvorrichtung und einem Trichter in einen Transportbehälter gefüllt und aus diesem mittels des Hallenkrans von oben in die Kugelmühle eingefüllt. Beim Umfüllen kommen jeweils die mobilen Entstaubungsanlagen zum Einsatz. Am Ende der Standard-Mahldauer von 60 Minuten erfolgt eine Probenahme, um mittels Granulometrie die erreichte Mahlfeinheit zu überprüfen. Zusätzlich erfolgt die Bestimmung der Zusammensetzung mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), um in einer Mischungsrechnung die nötigen Zugaben an Kalksteinmehl (für ein molares C/S-Verhältnis von 2) und einen Massenanteil von 5 % Natriumkarbonat als Mineralisator zu bestimmen. Diese werden direkt in die Mühle zugegeben. Es folgt eine 60-minütige Mischungs- und Homogenisierungsmahlung.

Danach wird das fertige Rohmehl aus der Mühle in den Vorlagebehälter gefüllt, der mit dem Hallenkran direkt auf den Drehrohrofen gesetzt wird.

Über Nacht erfolgt das Aufheizen des Drehrohrs auf 1100°C. Der Vorlagenbehälter wird auf 105°C aufgeheizt, um ein Rückfeuchten des Rohmehls zu verhindern. Am nächsten Tag findet der eigentliche Brennprozess statt: Das Material wird mit etwa 13 kg/h in das Drehrohr gefördert und bei ca. 1000°C und Verweilzeiten von etwa 30 Minuten im Gegenstrom mit 0.5 m³/h CO₂ zu Belitzementklinker gebrannt. Maximal ist eine Produktion von ca. 80-100 kg Belitzementklinker pro Tag möglich.

Der Klinker wird aus dem Drehrohr direkt in einen Transportbehälter gefördert und nach dem Abkühlen erneut in der Mühle feingemahlen ($d_{95} < 100 \mu\text{m}$). Schließlich erfolgt eine Phasenanalyse des NT-Belitzementklinkers mittels Röntgendiffraktion (XRD) und Rietveld-Analyse zur Qualitätskontrolle des Produktes.

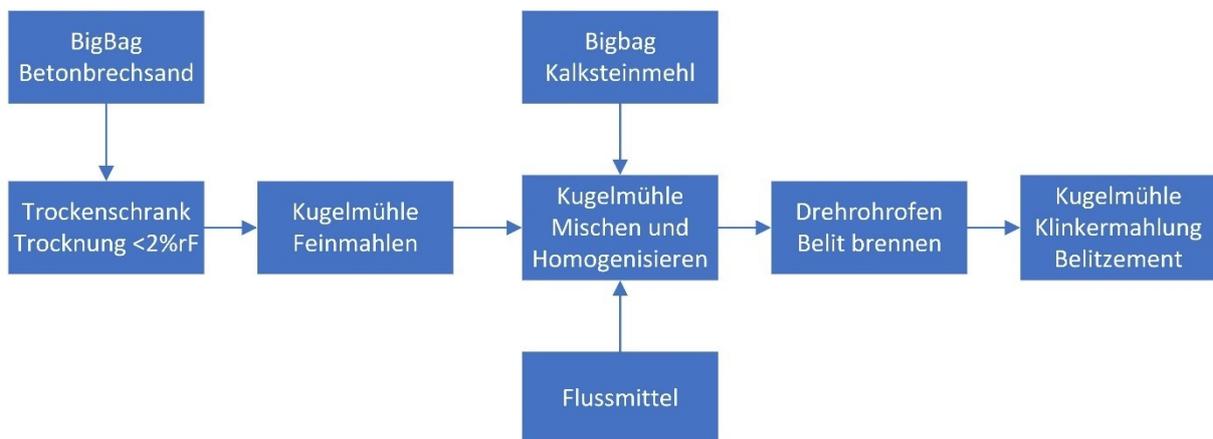


Abbildung 4-3: Schematische Darstellung des Belitzement-Prozesses

4.2.2 Anpassungen an der Anlage

Während der Erprobungsphase haben sich einige Schwierigkeiten im Betrieb der Anlage herausgestellt, die zum Projektende behoben werden konnten bzw. im Nachgang noch bearbeitet werden:

Beim Befüllen und Entleeren der Mühle wurde eine hohe Staubbelastung festgestellt, da die mobile Entstaubung nicht nah genug platziert werden konnte. Deswegen wurde die Einhausung der Mühle um einen Flansch ergänzt, an den der Stutzen der Entstaubung direkt angeschlossen werden kann.

Da am Drehrohr der Materialtransport in das Rohr durch Brückenbildungen beeinträchtigt war, wurden sowohl im Vorlagebehälter als auch oberhalb der Förderschnecke je ein zusätzlicher Vibrator und ein Druckstoßventil installiert. Zwei Endoskopkameras dienen der direkten visuellen Kontrolle des gleichmäßigen Transports während des Versuches. Zur Überwachung des Materialtransports im Drehrohr wurde am Auslaufkopf eine Kamera installiert.

Um die Materialtemperatur als wichtigen Parameter zu kontrollieren, wurde für das Inspektionsfenster am Ofenausgang eine Saphir-Scheibe beschafft, die Temperaturmessungen im Ofeninneren mittels eines Verhältnispyrometers bzw. einer Wärmebildkamera ermöglichen. Erste Versuche sind erfolgversprechend verlaufen,

aber es ist noch zu klären, ob eine ausreichende räumliche Auflösung erreicht werden kann, da der Blickwinkel konstruktionsbedingt sehr flach ist. Deshalb wurde zusätzlich ein langes Thermoelement beschafft, mit dem es in Verbindung mit entsprechenden Modifikationen am Auslaufdeckel möglich sein wird, Temperaturprofile im Ofen direkt zu messen, auch im Materialbett. Das verspricht weiteres Optimierungspotential für den Prozess.

Die größten Änderungen sind an der Abgasanlage notwendig. Zum einen hat sich herausgestellt, dass aufgrund der langen Wege der Rohrdurchmesser zu gering ist, um mit der vorhandenen Pumpe einen stabilen Unterdruck von einigen Millibar am Gasauslass des Ofens zu erreichen. Zudem ist der Staubanteil im Abgasstrom trotz geringer Gasgeschwindigkeit so hoch, dass sich der Sinterfilter im Regelbetrieb schnell zusetzt. Deshalb wird die Verrohrung auf den Durchmesser des Gasauslasses vergrößert und statt der Pumpe ein Seitenkanalverdichter eingesetzt. Zusätzlich wird vor dem Sinterfilter ein Gewebefilter mit vorheriger Kondensatfalle eingebaut, um einen stabilen kontinuierlichen Betrieb über die Versuchskampagne hinweg zu gewährleisten. Erst danach kann die Begleitheizung erneut installiert werden, gleiches gilt für die Gasanalytik. Die Arbeiten sind bereits fortgeschritten, aber noch nicht abgeschlossen.

4.3 Langzeitversuche

4.3.1 Materialvorbereitung

Für diese Versuche wurde der bereits in Kapitel 4.2.1 beschriebene Betonbrechsand verwendet

Zur Berechnung der notwendigen Zugabe von Kalksteinmehl (siehe Kapitel 4.2.1) wurden die chemischen Zusammensetzungen der vier vorhandenen Bigbags aus RFA-Messungen von geglühten Proben ermittelt. Der Glühverlust GV wurde während der Probenpräparation bestimmt. Die Zusammensetzungen der Einzelproben sind in Tabelle 4-1 dargestellt.

Tabelle 4-1: Chemische Zusammensetzung von 4 Chargen der verwendeten Brechsande (RFA-Analysen und Glühverlust GV in Gew. % außer für C/S=mol/mol)

Name	GV 950°	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Σ mit GV	C/S
SR-RC 1	10,1	0,4	0,9	4,6	55,3	0,8	1,0	18,2	0,2	1,9	93,3	0,4
SR-RC 2	10,0	0,4	0,9	4,6	55,1	0,8	1,0	18,7	0,2	1,9	93,6	0,4
SR-RC 3	10,0	0,4	0,9	4,6	55,1	0,8	1,0	18,8	0,2	1,9	93,6	0,4
SR-RC 4	10,0	0,4	0,9	4,6	55,0	0,8	1,0	18,1	0,2	1,9	92,9	0,4

Es zeigen sich kaum Schwankungen in der Zusammensetzung, die vier Chargen sind gleich.

Zur Untersuchung der Mahlfeinheit des Brechsandes wurden mit Lasergranulometrie zwei Versuche mit 30 und 60 Minuten Mahldauer durchgeführt

In Abbildung 4-4 sind beispielhaft die Messungen für die Mahldauer von 30 min dargestellt.

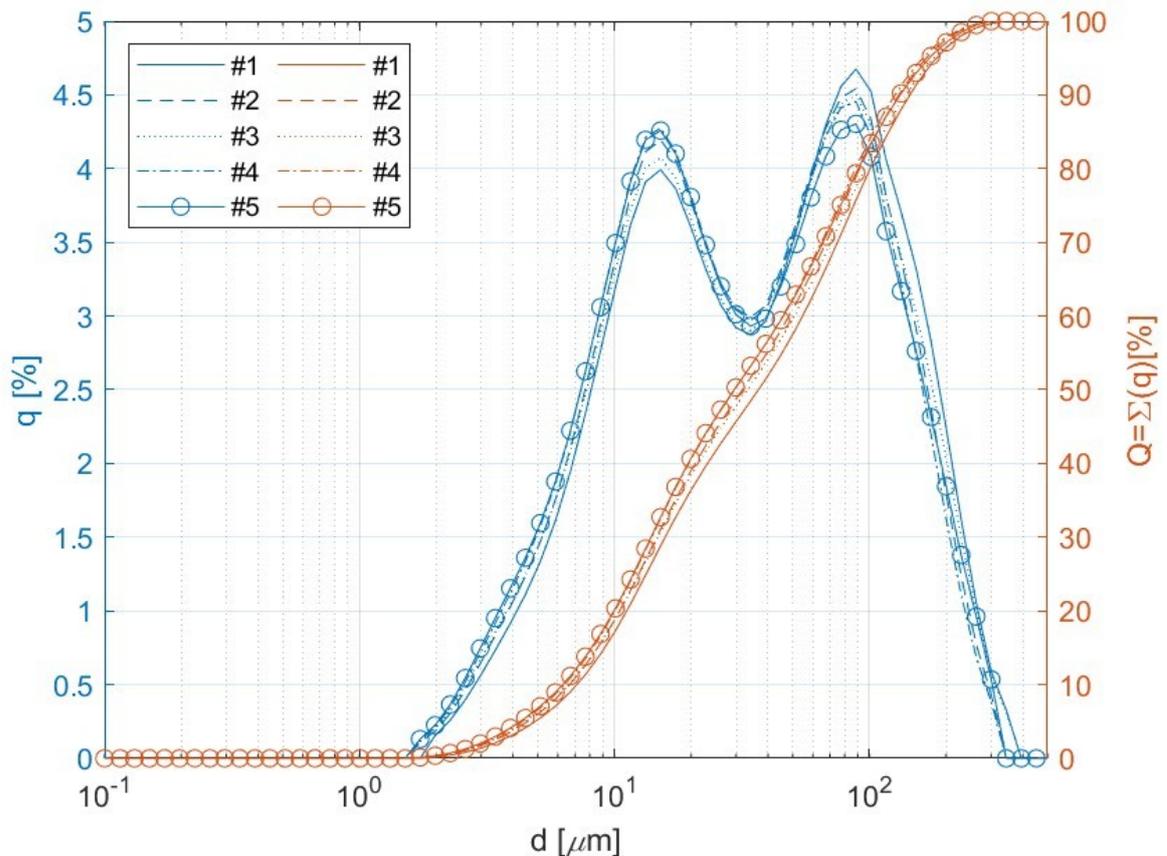


Abbildung 4-4: Partikelgrößenverteilung im Brechsand nach 30min

Aufgrund des nicht unimodalen Kornspektrums wurde als Zielgröße ein d_{90} kleiner als $150 \mu\text{m}$ festgelegt. Dieser wird bereits nach 30 Minuten erreicht, und eine auf 60 Minuten verlängerte Mahldauer bringt keine wesentliche Verbesserung. Alle Granulometrie-Kenngrößen (d_{10} , d_{90} , Median) sind in Tabelle 4-3 zusammengefasst.

Die für die Brennversuche verwendeten Rohmehle werden ebenfalls in der FHZ-Mühle gemischt und homogenisiert. Die Probenbezeichnungen mit den zugehörigen Misch- bzw. Homogenisierungszeiten sind in Tabelle 4-2 aufgeführt. Für die Mischung wird eine reduzierte Mühlendrehzahl (33 U/min) verwendet. Zu den Misch- und Homogenisierungszeiten addieren sich jeweils 30 Minuten, die für eine vollständige Entleerung der Mühle notwendig sind.

Tabelle 4-2: Untersuchte Misch und Homogenisierungsdauern

Name	Dauer, Misch- und Homogenisierung [min]	Dauer Entleerung [min]
RM-1_01	60	30
RM-1_02	30	30
RM-1_03	90	30

In Abbildung 4-5 ist beispielhaft die Partikelgrößenverteilung nach der Homogenisierungsdauer von 60 Minuten dargestellt.

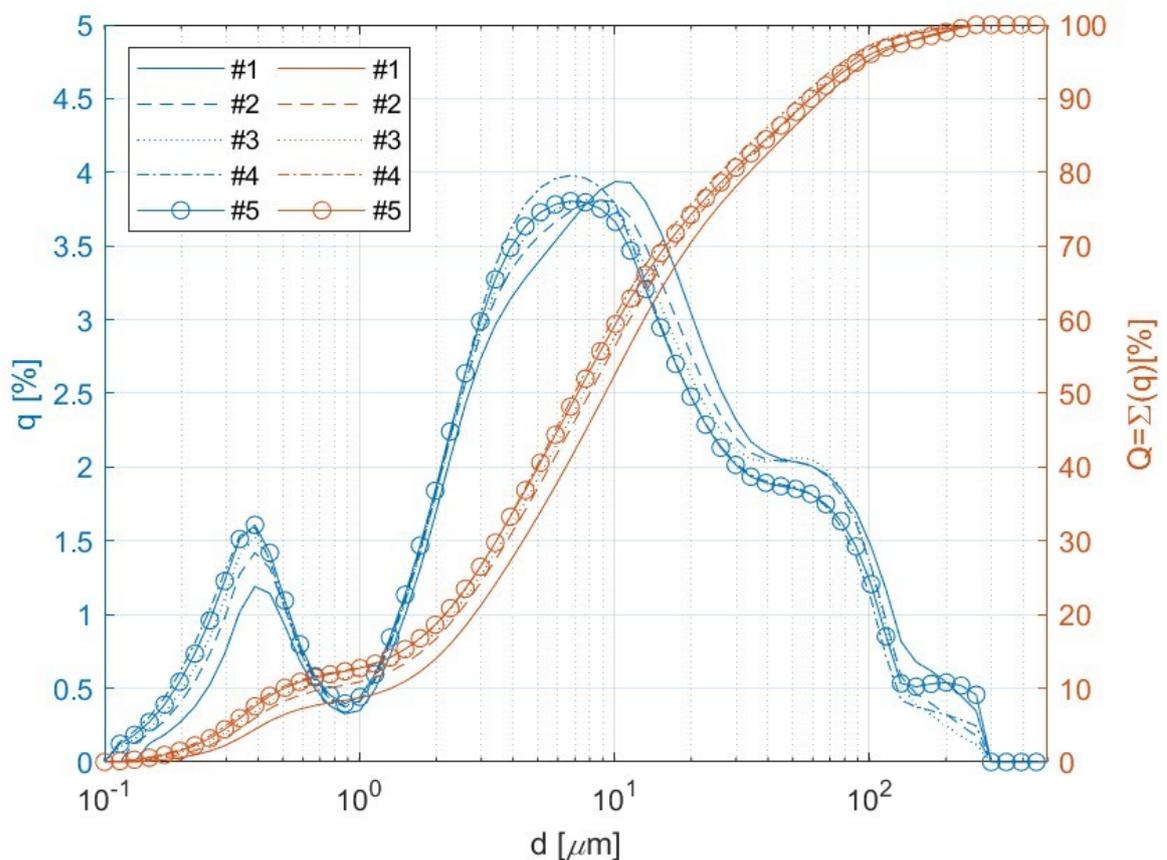


Abbildung 4-5: Partikelgrößenverteilung im Rohmehl nach 60min

Qualitativ ist in der Korngrößenverteilung die Mischung der gemahlene Brechsandkomponente und der bereits feinen Kalksteinmehlkomponente erkennbar.

Auch die Entscheidung über die zu wählende Homogenisierungsdauer wird aufgrund der komplexen Verteilungskurven und in Anlehnung an bekannte Werte aus der Rohmehlmahlung in der Portlandzementherstellung aus den Granulometrie-Kenngrößen abgeleitet (hier: $d_{90} < 100 \mu\text{m}$).

Die Granulometrie-Kenngrößen für die Ausgangsmaterialien, gemahlene Brechsand (30 und 60 Minuten Mahldauer) und gemischtes Rohmehl (30/60/90 Minuten Homogenisierungsdauer) sind in Tabelle 4-3 zusammengefasst

Tabelle 4-3: Granulometrie-Parameter für Ausgangsmaterialien, Mahlzeiten und Mischungen

	Median [μm]	d_{90} [μm]	d_{10} [μm]
Kalksteinmehl	8,5	65,4	2,4
Brechsand	154,1	247,4	35,6
Brechsand 30'	32,2	134,4	6,6
Brechsand 60'	18,2	105,7	3,3
Rohmehl 30'	9,7	51,4	1,3
Rohmehl 60'	7,8	58,6	0,7
Rohmehl 90'	9,4	59,6	0,7

Bereits nach einer Mahldauer von 30 min wird die geforderte Feinheit für den Brechsand ($d_{90} < 150 \mu\text{m}$) zuverlässig erreicht. Sie wird im Folgenden als Standardmahldauer verwendet.

Für die angestrebte Rohmehlfinheit ($d_{90} < 100 \mu\text{m}$) ist eine anschließende Homogenisierung von 30 Minuten ausreichend. Da ein homogenes Rohmehl essentiell für eine erfolgreiche Umsetzung zu Ca_2SiO_4 im Drehrohrprozess ist, wurde die Standard-Homogenisierungsdauer sicherheitshalber auf 60 Minuten festgelegt.

4.3.2 Verwendete Rohmehle

Um die Gesamtanlage im Betrieb charakterisieren und optimieren zu können, wurden Rohmehlmischungen für 14 Testbrände vorbereitet.

Die Rohmaterialmischungen unterscheiden sich in Mahldauer (RM-1) bzw. dem C/S-Verhältnis (RM-2 bzw. RM-3). Eine Übersicht über die verwendeten Rohmehle und deren Zusammensetzungen gibt Tabelle 4-4.

Größere Rohmaterialmengen bedeuten letztlich größere Schwankungen in der Zusammensetzung des Betonbrechsandes (siehe auch Projekt R-ClinkerControl). Diese Schwankungen abzubilden ist mit einem sehr hohen analytischen Aufwand verbunden, der praktisch kaum zu realisieren ist. Des Weiteren reagieren nicht alle SiO_2 -reichen Bestandteile mit dem zur Verfügung stehenden CaCO_3 vollständig. Um den daraus resultierenden höheren Freikalkgehalt im Produkt zu minimieren, werden auch Mischungen mit einer geringeren CaCO_3 -Zugabe (und damit einem reduzierten C/S-Verhältnis) untersucht. Entsprechend wurde eine weitere Rohmehlmischung mit einem reduzierten C/S-Verhältnis von 1,8 vorbereitet (RM-2 I und RM-2 II in Tabelle 44).

Tabelle 4-4: Verwendete Rohmehle mit Einwaagemengen

Name	C/S	Silikatträger [kg]	CaCO ₃ [kg]	Na ₂ CO ₃ [kg]
RM-1_01	2,0	29,5	48,0	4,0
RM-1_02	2,0	29,5	48,0	4,0
RM-1_03	2,0	28,0	45,5	3,5
RM-2 I	1,8	49,6	45,7	4,8
RM-2 II	1,8	49,6	45,7	4,8
RM-3.1	2,0	32,3	59,0	4,8

4.3.3 Vorversuche im Batch-Ofen

Um die Qualität der Rohmehle und ihre Eignung zur Herstellung von Belitzementklinker zu zeigen, wurden die vorbereiteten Rohmehlchargen RM-1_01, RM-1_02 und RM1-03 im Laborofen (Nabertherm Hochtemperaturofen LHT 04/17) gebrannt und der Belitzementklinker aufgemahlen. Die Brenndauer betrug 60 Minuten bei einer Ofentemperatur von 1000°C. Die Phasenzusammensetzungen der einzelnen Testbrände sind Tabelle 4-5 zu entnehmen

Tabelle 4-5: Mit Rietveldanalyse bestimmter Phasenbestand der im Labor-Muffelofen durchgeführten Testbrände (in Massenprozent) (am.: amorph; β -C₂S: β -Ca₂SiO₄, α HC₂S: α -H-Ca₂SiO₄; Spu.: Spurrut, Ca₅(SiO₄)₂(CO₃); Qz: Quarz (SiO₂); Wollastonit, CaSiO₃; Rankinit Ca₃(Si₂O₇); Combeit: Na₂Ca₂(Si₃O₉); Sonstige ~ 10 Gew. %).

Probenname	am.	β -C ₂ S	α HC ₂ S	Reaktiv	Spu.	Qz.	CaCO ₃	CaO	CaCO ₃ + CaO	Wollastonit + Rankinit	Combeit
DR001a	24,6	40,9	9,7	75,2	0,0	0,0	0,0	9,2	9,2	1,8	4,0
DR001b	23,9	37,2	16,0	77,1	0,0	0,0	0,0	5,0	5,0	1,5	6,3
DR001c	23,2	42,0	14,5	79,7	0,0	0,0	0,0	3,0	3,0	1,4	6,1
Mittelwert=	23,9	40,0	13,4	77,3	0,0	0,0	0,0	5,7	5,7	1,6	5,5
URBAN	36,2	2,2	35,5	73,9	0,0	2,4	7,8	6,7	14,5	1,2	1,5
REPOST	27,1	36,2	14,8	78,1	0,0	4,3	3,9	3,3	7,2	1,3	0,0

Mit den drei unterschiedlich lang homogenisierten Proben aus den Misch- und Homogenisierungsversuchen wurden orientierende Testbrände durchgeführt.

Bei allen Rohmehlen wurde ein guter Umsatz zu reaktivem Ca₂SiO₄ bzw. amorphem Anteil von bis zu 80 % erreicht. Es bildet sich kein Spurrut, und im Produkt findet sich kein residualer Quarz und nur geringe Mengen an CaO. Natrium wird zuverlässig in

Combeit fixiert. Unterschiede, die sich auf die verschiedenen Mahl- und Homogenisierungsdauern der Rohmehlmischungen in der Mühle zurückführen lassen, wurden nicht festgestellt.

Als Nebenbestandteile bilden sich geringe Mengen an Mayenit, Anhydrit, Brownmillerit, Gehlenit und Ellestadit. Feldspäte können nicht in Gänze umgesetzt werden, ihre Reaktivität ist zu gering.

Die Versuchsergebnisse entsprechen denen aus den Projekten URBAN und REPOST. Für das URBAN Projekt wurde die Kalzinierung von Klinkerrohmehl im elektrisch beheizten Drehrohr der Fa. IBU-tec im Tonnenmaßstab realisiert. Die Unterschiede der Phasenzusammensetzung von im Pilotdrehrohr bzw. im Drehrohr der Fa. IBU-tec gebrannten Klinker sind gering. Sie resultieren wahrscheinlich aus den verschiedenen Ofengeometrien. Bei der Kalzinierung von Porenbetonmehl (REPOST) entsteht aufgrund des Sulfatgehaltes zusätzlich das Calcium-Silikat-Sulfat Ternesit, $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_2(\text{SO}_4)$. Wird CaCl_2 als Mineralisator eingesetzt, bildet sich anstelle von Ternesit Chlorellestadit, $\text{Ca}_{10}(\text{SiO}_4)_3(\text{SO}_4)_3\text{Cl}_2$ (siehe auch Abschnitt 5).

Aus den Versuchsergebnissen der Vorversuche wird ein Mittel-/Referenzwert gebildet, der im Weiteren als Benchmark für die Brennversuche am Technikumsdrehrohr dient.

4.3.4 Brennversuche am Technikumsdrehrohr

Zunächst wurden die Parameter Aufgabemenge, Neigung und Ofendrehzahl variiert, um die Auswirkungen auf die Produktqualität zu untersuchen und die optimalen Brennparameter für einen hohen reaktiven Anteil im Produkt zu identifizieren.

Eine Übersicht der bei den einzelnen Testbränden realisierten Parametervariationen ist in Tabelle 4-6 dargestellt, die genauen Kombinationen aus Parametern und Rohmehlen listet Tabelle 4-7 auf.

Tabelle 4-6: Parametervariation Testbrand

Parameter:								
Material- Aufgabemenge	[kg/h]	12	10	8	6			
Neigung des Drehrohrs	[Grad]	3	2,5	2	1,35			
Ofendrehzahl	[U/min]	5,25	4	3,4	2,5	2	1,8	1

Der mit Rietveld-Analyse bestimmte Phasenbestand der Produkte ist für die einzelnen Versuche in Tabelle 4-8 zusammengefasst. Als Nebenbestandteile/Nebenphasen bilden sich auch geringe Mengen an Mayenit, $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$, Anhydrit, CaSO_4 , Brownmillerit, $\text{Ca}_2(\text{Al},\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_5$, Gehlenit, $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$ und Ellestadit, $\text{Ca}_{10}(\text{SiO}_4)_3(\text{SO}_4)_3(\text{OH},\text{Cl},\text{F})_2$. Auch die im Ausgangsmaterial enthaltenen Feldspäte können nicht in Gänze umgesetzt werden.

Tabelle 4-7: Versuchseinstellungen, Rohmehle, C/S-Verhältnisse

Name	Neigung [°]	T [°C]	Drehzahl [U/min]	Förderung [kg/h]	C/S	RM
DR001	3°	1050	4	6	2	RM 1.01
DR002	3°	1100	4	6	2	RM 1.01
DR003	3°	1100	4	12	2	RM 1.01
DR004	3°	1100	3,4	12	2	RM 1.01
DR006	3°	1100	2,5	12	2	RM 1.01
DR007	3°	1100	5,25	12	2	RM 1.02
DR008	3°	1100	5,25	12	2	RM 1.02
DR009	3°	1100	5,25	12	2	RM 1.03
DR010a	3°	1100	5,25	12	1,8	RM 2.0
DR010b	2,5°	1100	5,25	12	1,8	RM 2.0
DR011a	2,5°	1100	5,25	12	1,8	RM 2.0
DR011b	2,5°	1100	5,25	8	1,8	RM 2.0
DR013	1,35°	1100	1,052	10	2	RM 3.1
DR014	2,0°	1100	1,8	6	2	RM 3.1
DR015	2,0°	1100	1,8	6	2	RM 3.1

Die Ergebnisse am Technikumsdrehrohr zeigen, dass Ofenwandtemperaturen unterhalb von 1100°C nicht ausreichen, um Rohmehl in reaktives Produkt umzusetzen (siehe DR001 in Tabelle 4-8). Der Spurrithalt sowie die Anteile an nicht umgesetztem Quarz, an CaCO₃ und CaO im Produkt sind deutlich erhöht. Dadurch ist die Ausbeute an reaktivem Material sehr niedrig.

Wie erwartet ist der Gehalt an CaO bzw. nicht umgesetzten CaCO₃ bei der Verwendung von Rohmehl mit einem molaren C/S-Verhältnis von 1,8 etwas geringer als wenn ein Rohmehl mit einem C/S=2,0 verwendet wird (DR010 und DR011 in Tabelle 4-8).

Bei einer geringen Drehrohrneigung und hohen Förderraten bilden sich deutliche Mengen an Spurrith. Dabei fällt auf, dass der hohe Spurrithalt nicht mit hohen Gehalten an nicht umgesetztem Quarz, CaO- und CaCO₃ einhergeht. Mögliche Ursache ist die Rekristallisation von Spurrith aus C₂S in der hochkonzentrierten CO₂-Atmosphäre, was durch die sehr lange Verweilzeit des Materials im Drehrohr (ca. 60 min) begünstigt wird. Deutlich wird das im Versuch DR013.

Tabelle 4-8: Phasenbestand Drehrohrversuche (Massenanteile aus der Rietveld-Analyse; am.: amorph; β -C₂S: β -Ca₂SiO₄, α HC₂S: α -H-Ca₂SiO₄; Spu.: Spurrhit, Ca₅(SiO₄)₂(CO₃); Qz: Quarz (SiO₂); Sonstige (Wollastonit, CaSiO₃; Rankinit Ca₃(Si₂O₇); Combeit: Na₂Ca₂(Si₃O₉) Feldspäte u.a.).

Name	am.	β -C ₂ S	α HC ₂ S	Reaktiv (am+ β + α)	Spu.	Qz.	CaCO ₃	CaO	CaCO ₃ + CaO	Sonstige
DR001	11,7	28,9	2,9	43,5	18,6	7,3	7,2	11,3	18,5	12,1
DR002	19,8	35,4	6,6	61,8	1,0	1,9	3,5	9,8	13,3	22
DR003	26,0	29,2	14,2	69,4	0,5	0,7	3,5	5,9	9,4	20
DR004	23,9	31,8	11,5	67,2	0,6	0,5	3,5	7,5	11,0	20,7
DR006	31,8	18,3	13,3	63,4	1,1	3,3	12,4	8,4	20,8	11,4
DR007	33,9	1,3	44,4	79,6	2,2	1,0	4,4	4,1	8,5	8,7
DR008	40,0	23,0	3,7	66,7	0,0	0,8	2,7	7,0	9,7	22,8
DR009	31,8	16,2	23,7	71,7	0,1	0,9	4,9	11,1	15,9	11,3
DR010a	23,5	18,4	25	66,9	0,4	3,1	1,8	5,9	7,7	21,9
DR010b	28	24	21,6	73,6	0	3	1,5	5,3	6,8	16,6
DR011a	30,0	19,1	19,3	68,4	0,2	3,6	2,2	5,4	7,6	20,2
DR011b	30,4	25,1	11,0	66,5	0,7	2,7	2,0	4,4	6,4	23,7
DR013_1	29,7	25,5	0,4	55,6	23,9	0,8	2,9	0,2	3,1	16,6
DR013_2	30,1	30,2	0,2	60,5	18,0	0,9	1,6	0,3	1,9	18,7
DR013_3	29,0	23,3	0,1	52,4	17,4	4,3	4,0	1,9	5,9	20
DR013_4	30,6	42,0	0,0	72,6	5,5	1,6	1,2	0,3	1,6	18,8
DR013_5	24,6	54,7	0,2	79,5	3,8	1,3	0,4	0,1	0,5	14,9
DR014	19,4	28,3	0	47,7	18,5	2,7	4,0	1,2	5,2	25,9
DR015	28,3	22,8	0,2	51,3	22,4	2,8	3,4	0,7	4,1	19,4

Im Verlauf von Versuch DR013 wurden 5 Proben genommen. Aufgrund der geringen Neigung des Drehrohrs und der hohen Förderrate wird das Rohr überfüllt. Die Ausbeute an potentiell reaktivem Material ist gering, der Spurrhitgehalt hoch (DR013_1 bis DR013_3 in Tabelle 4-8). Im Versuchsverlauf wurde daraufhin die Materialzuführung ins Drehrohr gestoppt. Der Anteil an potentiell reaktivem Material stieg dann deutlich. Dementsprechend nahm der Spurrhitgehalt ab (DR013_4 und DR013_5 in Tabelle 4-8).

Mit den Einstellungen des Versuchs DR007 konnte die in Abschnitt 4.3.3 definierte Benchmark erreicht werden.

4.4 Herstellen von NT-Belitzementklinker als Testmaterial für calciumarmen Recyclingzement

Aufgrund der zeitlichen Verzögerungen bei der Beschaffung und Inbetriebnahme der Pilotanlage wurden die für Produktionsversuche im Tonnen-Maßstab benötigten Materialmengen vorwiegend mit Hilfe von Dienstleistern hergestellt. In der Pilotanlage konnten nur beispielhaft 100 kg-Chargen mit gleichen Eigenschaften erzeugt werden.

5 Alkaliwäsche (ursprüngliches AP 4), Mineralisator CaCl₂

Im BMBF-geförderten Projekt REPOST (Beuchle, et al., 2024) begannen Untersuchungen zu neuen Mineralisatoren und zu ihrer Rückgewinnung durch Wäsche. Ziel war es, zum einen günstige Mineralisatoren zu entwickeln, die im Produkt verbleiben können und nicht aus wirtschaftlichen Gründen zurückgewonnen werden müssen. Zum anderen wurde die Rückgewinnung von wertvollen Mineralisatoren durch Wäsche am Beispiel von Recycling-Klinker aus Porenbeton untersucht. Der Fokus lag auf der Rückgewinnung von Natriumkarbonat.

Dabei wurde festgestellt, dass die Wäsche von Natriumkarbonaten für Normalprodukte technisch nicht umsetzbar war. Der Einsatz von Natrium- beziehungsweise Kaliumsalzen als Mineralisator ist daher nur dann sinnvoll, wenn entsprechende sekundäre Quellen zur Verfügung stehen.

Zum anderen wurden neue Mineralisatoren gefunden, die sowohl Sulfate als auch Chlorid beinhalten und im Produkt unlöslich eingebunden werden. Da die Rückgewinnung von Natriumkarbonat auf dem vorgesehenen Pfad nicht ökonomisch ist, wurde das entsprechende Arbeitspaket im Vorhaben R-Zement gestrichen. Ersatzweise werden die Versuche in AP2 und AP4 auf den neuen Mineralisator CaCl₂ erweitert (siehe folgender Abschnitt). Am Gesamtumfang des Vorhabens ändert sich nichts.

5.1 CaCl₂ als Mineralisator

Die Eignung von CaCl₂ als Mineralisator in der Synthese eines Belitzementklinkers wurde an Mischungen aus zwei Porenbetonabbruchmaterialien bzw. einem Produktionsabfall mit CaCO₃ (molares Verhältnis CaO/SiO₂ = 2) untersucht (Ullrich, et al., 2022). Die Mischungen wurden in einem Nabertherm Ofen bei Temperaturen von 700°C bis 1200°C gebrannt und nach dem Abkühlen analysiert.

Das Mineral Ellestadit Ca₅(SiO₄,SO₄)₃(OH,Cl,F) gilt als potenzielles Speichermaterial für Chlor (Neubauer, 1992), (Pöllmann, 1994). Daher wurde in den Experimenten an Proben mit unterschiedlichen Sulfatgehalten neben einer hohen Ausbeute an Ca₂SiO₄ auch eine hohe Ausbeute an Chlorellestadit, Ca₁₀(SiO₄)₃(SO₄)₃Cl₂ angestrebt.

Die Chlorbestimmung mittels Ionenchromatographie zeigt, dass Chlor bis 1000°C im Material gebunden bleibt, danach nimmt der Chlorgehalt insbesondere in den Proben mit geringer Sulfatmenge ab.

Die kombinierte Analytik aus Röntgendiffraktometrie, Thermogravimetrie und Röntgenfluoreszenzanalyse ermöglicht die Bestimmung der Ausbeute an CaO in Form von Ca₂SiO₄ (kristallin und amorph) und Chlorellestadit. Der optimale Temperaturbereich für eine hohe Ausbeute liegt zwischen 950°C und 1000°C. Bei tieferen Temperaturen wurde dagegen Spurrit neben einer karbonatreichen Halogenidschmelze nachgewiesen, was den Umsatz zu Ca₂SiO₄ reduziert. Die Kristallisation von Ellestadit hängt eher vom Sulfatgehalt als von der Bildungstemperatur ab, wobei sich ins-

besondere in sulfatreichen Proben bei höheren Temperaturen zusätzlich Ternesit, $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_2(\text{SO}_4)$, auf Kosten von Ellestadit bildet. Geringe Sulfatgehalte führen zur Bindung von Chlor in schlecht kristallinen und weniger stabilen Phasen sowie zur Kristallisation von Mineralen der Melilithgruppe (ähnlich Gehlenit, $\text{Ca}_2\text{Al}[\text{AlSiO}_7]$) bei hohen Temperaturen.

Raman-Spektroskopie bzw. -Imaging bestätigen die Hochtemperatur-Bildung von Ternesit, Anhydrit und Ca_2SiO_4 aus Ellestadit. Die Methode liefert zudem detaillierte strukturelle und chemische Information über die Zusammensetzung von Mischkristallen und belegt u.a. die Bildung eines Al-reichen Meliliths.

Die kombinierte Analytik zeigt auch, dass die Ausbeute von CaO in Form von Ca_2SiO_4 und Ellestadit durch den Einsatz von CaCl_2 als Mineralisator deutlich gesteigert werden kann.

Alle mit CaCl_2 umgesetzten Proben weisen unabhängig vom Sulfatgehalt bei 1000°C eine Gesamtausbeute um 83 % auf. Die Abhängigkeit der gebildeten Menge an Ellestadit als Speichermineral für Chlor vom Sulfatgehalt belegt die Notwendigkeit der Anpassung der eingesetzten Sulfatmenge auf den CaCl_2 Mineralisator.

6 Entwicklung von Anwendungen mit Herstellern – Anwendungsversuche (AP 5)

6.1 URBAN

Ziel des Arbeitspaketes ist der Einsatz von anwendungsrelevanten Mengen von NT-Belitzementklinker als Zementsubstitut in Beton (Partner: Holcim, EHL, SIKA). Dabei ist die Rezeptur-, Zement- und Betonentwicklung auf Basis von NT-Belitzementklinker Aufgabe des zum 01.11.2022 angelaufenen Projektes URBAN. In diesem Projekt wurden NT-Belitzementklinker nach Vorgabe bei Dienstleistern homogenisiert und gebrannt. Zwei Testbrände von je 600 kg Klinker und ein größerer Ansatz im Tonnenmaßstab zum Test der Produktion von Fertigbetonteilen wurden durchgeführt.

Die Entwicklung von Kompositzementen mit Massenanteilen von 15 bzw. 30 % Belitzementklinker ist erfolgreich abgeschlossen; ebenso wie Betonversuche im Labormaßstab.

Derzeit werden für einen Großversuch bei EHL Belitzementklinker-Kompositzemente in Abstimmung mit den beteiligten Partnern hergestellt.

Mit der Inbetriebnahme der R-Zement Anlage ist es möglich, den für die Anwendung in Fertigbeton bis dahin erreichten Entwicklungsstand für eine wirtschaftliche Umsetzung zu optimieren.

6.2 REPOST

Im Projekt REPOST (Beuchle, et al., 2024) wurden nach der Optimierung von Verfahrensparametern und Rezepturen am Institut für Technische Chemie (ITC) des KIT insgesamt über 100 kg Belitzementklinker aus vier unterschiedlichen Altporenbeton-Qualitäten gebrannt und dem Projektpartner Xella zur Verfügung gestellt. Daten zu Stoff- und Energiebilanzen wurden dem KIT-Institut für Industriebetriebslehre und industrielle Produktion (IIP) zur techno-ökonomischen Analyse übermittelt. Im Technikumsmaßstab ließen sich bis zu 50 % des sonst in der Porenbetonherstellung eingesetzten Portlandzements (OPC) durch NT-Belitzementklinker ersetzen. Abbildung 6-1 zeigt Material aus einer ersten Hochskalierung im Großtechnikum der Xella Technologie und Forschungsgesellschaft mbH mit 25 % NT-Belitzementklinker .



Abbildung 6-1: Herstellung von Porenbetonprototypen im Großtechnikum der Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH; unten links: Porenbeton Planblock Ytong® PP2-0,35 mit 20 % Massenanteil an Altporenbeton; unten rechts: Porenbeton Planblock mit RC-Belitzementklinker (Quelle: Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH)

7 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wurde eine Pilotanlage geplant, beschafft, aufgebaut und optimiert, die die gesamte Prozesskette vom Altbeton-/ Altporenbeton-Feinbrechsand über Trocknung, Mahlung, Mischung und Homogenisierung, Brennen von NT-Belitzementklinker und Aufmahlen zu Belitzement umfasst und ein Materialhandling im 100 kg-Maßstab erlaubt.

Durch Optimierung verschiedener Betriebsparameter konnte ein Standardprozess etabliert werden. Damit ist eine Produktion von 100 kg-Chargen NT-Belitzementklinker am Tag möglich. Durch Variation der Parameter kann auf Änderungen und Schwankungen im Ausgangsmaterial bzw. auf Störungen im Ablauf ohne Abschalten des Prozesses reagiert werden. Für den kontinuierlichen Betrieb der gesamten Produktionskette wurden verschiedene Einschränkungen identifiziert, die eine weitere Verfahrensentwicklung berücksichtigen muss und die für Anlagen mit höheren Kapazitäten dringend zu beachten sind:

- Schwankungen in der Eingangsfeuchte der Rohstoffe müssen durch flexible und kontinuierliche Trockner vereinheitlicht werden.
- Rohstoffe unterschiedlicher Körnungen können absehbar nur durch chargenweise Abstimmung der Mahlung, evtl. unter verminderter Gesamtkapazität, verwendet werden.
- Die chemische Zusammensetzung der Brechsand-Komponente, zur Sicherheit auch der Kalkkomponente, sollte fortlaufend ermittelt und die Mischungsherstellung entsprechend angepasst werden.

Der Einsatz eines indirekt elektrisch beheizten Drehrohres und dessen Betrieb in einer CO₂-Atmosphäre führen dazu, dass im Abgasstrom sehr hoch konzentriertes CO₂ vorliegt. Das ermöglicht perspektivisch eine einfache Weiternutzung (beispielsweise bei CCU, CCS, Methanisierung, Karbonatisierungshärtung). Wenn dies unter Einsatz ausschließlich erneuerbarer Energiequellen erfolgt, ist ein weitgehend CO₂-neutraler Betrieb möglich.

Die Qualität des hergestellten Belitzementes wurde mit analytischen Methoden nachgewiesen. Zudem konnte beim Einsatz von Testchargen in Substitutionsversuchen im Rahmen der Projekte REPOST und URBAN erfolgreich demonstriert werden, dass ein Ersatz von bis zu 30 % OPC durch Belitzement im Porenbetonverfahren und im Standardzement und -beton ohne Qualitätseinbußen möglich ist.

8 Verwertung

Die wirtschaftliche Verwertung wurde und wird im Rahmen der begleitenden Verbundprojekte mit der Porenbeton- bzw. Zementindustrie, REPOST und URBAN, vorangetrieben. Die Technologieentwicklung zielt allerdings mittelfristig nicht nur auf die Nutzung von Sekundärrohstoffen, sondern auch auf eine möglichst umfassende Verwertung von möglichst allen Wertelementen bei gleichzeitiger Abtrennung und Entsorgung der Störstoffe. Für das KIT sind zudem wissenschaftlicher Erkenntnisgewinn, die Publikation der Ergebnisse sowie die Ausbildung zentrale Ziele der Verwertung.

Die R-Zement-Pilotanlage wurde erfolgreich in Betrieb genommen und hat erste Tests gut bestanden. Wie in den bereits genannten Industrieprojekten, muss derzeit jeder Typ Betonabfall, sogar jede Charge auf ihre Eignung zum Wiedereinsatz von Zementstein als daraus rezykliertes Bindemittel untersucht werden. Dazu werden derzeit in laufenden und beantragten Vorhaben industriekompatible Lösungen entwickelt.

Bindemittel wie Zement sind immer nur ein Bestandteil des eigentlichen Produktes, seien es z.B. Fertigbetonteile oder Porenbetonsteine. Für eine Applikationsentwicklung sind Anwendungs- und Produktionstest nötig, die „Proben“ von mehreren 10 bis 100 kg erfordern. Diese Mengen können mit der Pilotanlage hergestellt werden. Damit wird insbesondere der Feinanteil aus der Baustoff- oder Betonaufbereitung einer Verwertung zugeführt.

Die beiden Industrieprojekte URBAN (URBAN, 11/2022-06/2026) und REPOST (REPOST, 6/2019-12/2022) umfassen jeweils ein Arbeitspaket zur techno-ökonomischen Bewertung, die eine vergleichende technologische Betrachtung, teilweise Fragen zu Standorten, Transportwegen und einer zu erwartenden Umstrukturierung in der Recyclingwirtschaft analysieren. Die Potentiale zur Substitution von Portlandzementklinker durch NT-Belitzementklinker wurden an Porenbetonprodukten zu bis zu 50 % (mit Anpassungen im Produktionsablauf) und zu 25 bis 30% mit vergleichsweise geringen Änderungen im Prozess abgeschätzt. Für URBAN-Betonfertigteile ergeben sich, vorbehaltlich des noch stattfindenden Produktionstests, ähnliche Zahlen.

Einsparungen an CO₂-Emissionen können bereits grob abgeschätzt werden, hängen aber entscheidend von

- dem endgültigen Zementgehalt und der OPC-Substitution im Betonprodukt,
- der Basis der elektrischen Stromversorgung (aktueller Strommix oder 100% Erneuerbare),
- den Betriebsdaten einer R-Zement-Produktionsanlage ab.

Im Förderzeitraum vom 1.4.2021 bis 30.6.2025 entstanden zum NT-Belitzementklinker 7 referierte Publikationen in Fachzeitschriften. 1 Promotion wurde begonnen (laufend).

Schließlich wurde die Pilotanlage und das Projekt R-Zement zur Darstellung der technischen Möglichkeiten des ITC bzw. KIT in den Zukunftsthemen Kreislaufwirtschaft, Kohlenstoffkreisläufe und Baustoffrecycling in 10 Fachvorträgen und in Postern der Öffentlichkeit vorgestellt, z.B. in (Haist, et al., 2025). Zudem ist ein Podcast zum Thema auf der Seite des ITC abrufbar.

9 Ausblick

Die R-Zement-Pilotanlage wird nach Projektende für weitere Forschungsarbeiten genutzt. In Rahmen verschiedener Projekte in Kooperation mit der Industrie werden zum einen ausreichende Mengen NT-Belitzementklinker zur Verfügung gestellt. Zum anderen werden Versuche mit alternativen Ausgangsmaterialien durchgeführt.

Mit dem Umbau der Abgasanlage wurde begonnen. Aufgrund einer hoher Staubbelastung und des damit verbundenen erhöhten Druckverlusts ist eine komplette Neuauslegung notwendig. Der Umbau wird nach Projektende fertiggestellt. Erst dann ist eine vollständige stoffliche und energetische Bilanzierung der Anlage möglich.

Für eine Fortsetzung des REPOST-Projektes ist geplant, in der R-Zement-Pilotanlage Belitzementklinker aus Porenbetonbruch in ausreichenden Mengen für erweiterte Porenbetonproduktionen (größere Mengen und/oder unterschiedliche Qualitäten) herzustellen. Dafür sind voraussichtlich Materialmengen von etwa 1 t notwendig, das entspricht circa 10 Tagesproduktionen.

Für Produktionsversuche in der Industrie sind in der Regel deutlich größere Produktchargen >10 t nötig. Das übersteigt die Kapazität unserer Pilotanlage und würde eine Demonstrationsanlage mit mehreren Tonnen Tageskapazität und Investitionen von mehreren Millionen Euro erfordern. Anfragen zur Errichtung einer solchen Anlage liegen vor – allerdings können entsprechende Planungen erst begonnen werden, wenn alle Komponenten in der Prozesskette skalierbar und industrietauglich sind (TRL 5 → 6).

Alternative Ausgangsmaterialien könnten Papieraschen oder Müllverbrennungsschlacken sein, entsprechende Industrieanfragen liegen bereits vor. Aktuell wird im Rahmen des Helmholtz-Projektes FINEST daran gearbeitet, anorganische Fraktionen aus der Aufbereitung von Wärmedämmverbundsystem in der NT-Belitzementklinkerherstellung zu verwenden.

Wichtig ist auch das Sammeln weiterer Betriebserfahrung im mehrstündigen, quasi-kontinuierlichen Dauerbetrieb, auch bei Wechsel der Ausgangsmaterialien, um Steuerungsmöglichkeiten für die Sicherstellung einer konstanten Produktqualität zu testen.

Zusätzliche Untersuchungen müssen zeigen, welche wechselnden Feuchtegehalte noch akzeptabel sind: Wie kann der Trocknungsprozess variiert werden bzw. welche Feuchtetoleranz hat der Brennprozess? Was bedeutet ein erhöhter Feuchtegehalt in der CO₂-Atmosphäre für den Klinkerprozess und die Verwendung des CO₂ (CCU/CCS etc.)?

Neben dem Standard-Mineralisator Na₂CO₃ wurden auch Versuche mit CaCl₂ durchgeführt, das unter anderem in Flugaschen vorkommt und günstig verfügbar ist. Allerdings ergeben sich dabei Schwierigkeiten bei der Handhabung des

hygroskopischen CaCl_2 : Mischungsrechnung, Einwaage und Materialtransport werden schwieriger.

Aus der laufenden DFG Förderung R-ClinkerControl ist ein besserer Überblick der verfügbaren Ausgangsmaterialien zu erwarten. Erstmals werden Daten der Aufbereitung verschiedener Chargen Betonabbruch und der sich aus der Aufbereitung ergebenden Größenfraktionen mit Massenanteilen und chemischen Zusammensetzungen der Kornfraktionen, Gesamtmengen pro Abbruchvorhaben, auftretenden Verunreinigungen und Eigenschaftsschwankungen verfügbar. Darauf aufbauend sind weitere Brennversuche in der Pilotanlage geplant.

Literaturverzeichnis

- Beuchle, G., et al. 2024.** *Recyclingcluster Porenbeton (REPOST) - Schlussbericht des Forschungsvorhabens.* s.l. : Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2024. 38.05.02 (POF IV, LK 01) Metals and Minerals Cycle.
- Bruckschlögl, S., et al. 2023.** Ergebnisse einer Machbarkeitsstudie für ganzheitliches Betonrecycling. Bauen mit Beton im Kreislauf - Recycling, Re-Use und Ressourcenschonung : 19. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. 2023.
- Garbev, K., et al. 2022.** Chlorellestadite (Synth): Formation, Structure, and Carbonate Substitution during Synthesis of Belite Clinker from Wastes in the Presence of CaCl₂ and CO₂. *Minerals.* 12(9), 2022, DOI: 10.5445/IR/1000150872.
- Haist, M. und Stemmermann, P. 2025.** Vorstellung der Ergebnisse des Forschungsprojektes „URBAN“. Ulmer Betontage. 2025.
- Höffgen, J., Bauer, M. und Dehn, F. 2025.** THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien – Entwicklung einer Strategie zum Umgang mit Betonbrechsanden in Baden-Württemberg. *Ausgabe in Vorbereitung.* 2025.
- Husinger, H., et al. 2014.** *Verfahren zur Herstellung von Dicalciumsilikat.* WO 2014/019656 A1. *Prioritätsdaten: 1.10.2012.* Deutschland, 2014.
- Neubauer, J. 1992.** Realisierung des Deponiekonzepts der "Inneren Barriere" für Rauchgasreinigungsrückstände aus Müllverbrennungsanlagen. *Dissertation, Erlangen.* 1992.
- NOMECOR. 2016-2019.** *Neuartige, hybride Methode der Kupferrückgewinnung aus Flotationshalden; Teilvorhaben 3 Nutzung mineralischer Rückstände für die Zementproduktion BMBF FKZ 033R176C (2016-2019).* 2016-2019.
- Pöllmann, H. 1994.** Immobilization of pollutants in waste disposals by forming mineral reservoirs. [Buchverf.] W. Petruk und A.R. Rule (Eds.). *Process Mineral. VII.* Warrendale, PA, USA : The Minerals, Metals and Materials Society, 1994.
- R-ClinkerControl. 2024-2027.** R-ClinkerControl . *AI augmented control model for coping with fluctuating recycling waste in carbonate-melt clinkering for recycling-cement.* [Online] 2024-2027. <https://www.itc.kit.edu/1624.php>.
- REPOST. 6/2019-12/2022.** *Recyclingcluster Porenbeton.* [Online] 6/2019-12/2022. <https://www.itc.kit.edu/1624.php>.
- Steins, J., et al. 2021.** Altporenbeton aus dem Abbruch und Rückbau in Deutschland bis 2050 – eine Vorhersage. [Hrsg.] Wiley-VCH Verlag. *Das Mauerwerk.* 2021.
- Steins, J., Volk, R. und Schultmann, F. 2021a.** Modelling and predicting the generation of post-demolition autoclaved aerated concrete (AAC) volumes in Germany until 2050 171 (2021), S. 105504. *Resources, Conservation and Recycling.* 171, 2021a.
- THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien.** Der THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien: 2018 bis 2023. [Online] [Zitat vom: 19. 05 2025.] https://www.thinktank-irs.de/wp-content/uploads/2025/07/RZ_THINKTANK_Broschuere_2018_2023_DE_Web.pdf.
- Ullrich, A., et al. 2022.** CaCl₂ as a Mineralizing Agent in Low-Temperature Recycling of Autoclaved Aerated Concrete: Cl-Immobilization by Formation of Chlorellestadite. *Minerals.* 12(9), 2022.
- Ulsen, C., Kahn, H. und Hawlitschek, G. et al. 2013.** Production of recycled sand from construction and demolition waste. *Construction and Building Materials.* 40, 2013, S. 1168-1173.
- URBAN. 11/2022-06/2026.** *Verbundvorhaben URBAN - CO₂-reduzierter Beton durch Upcycling von Reststoffen aus der Betonaufbereitung und CCU.* [Online] 11/2022-06/2026. [Zitat vom: 22. 09 2025.] <https://www.itc.kit.edu/1624.php>.

Weitere Veröffentlichungen zum Projekt R-Zement

Zeitschriftenbeiträge

Stemmermann, P., Volk, R., Steins, J.J., Beuchle, G., 2024. Recycling belite cement clinker from post-demolition autoclaved aerated concrete – assessing a new process. *Resources, Conservation and Recycling* 203, Article-no: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107404>

Stemmermann, P., Ullrich, A., Beuchle, G., Garbev, K., Schweike, U., 2022. Belite cement clinker from autoclaved aerated concrete waste – A contribution towards CO₂-reduced circular building materials, in: *CE/Papers 2022 – 2022 Xella International Colloquium*. pp. 17–26. DOI: 10.5445/IR/1000154343

Podcast

S. Fuchs und P. Stemmermann, „Beton, aber klimaneutral‘ – Mit der KIT-Pilotanlage zum Recycling von Altbeton auf dem Weg zur industriellen Anwendung - Campus-Report am 17.07.2025“, Bd. 1214, 2025, doi: 10.5445/IR/1000182470.

Vorträge

Stemmermann, P., 2024. Net-Zero Circular Concrete. Vortrag Hannover Messe (2024), Hannover, Deutschland, 22.04.2024 – 26.04.2024, DOI: 10.5445/IR/1000177491

Stemmermann, P., 2024. Herstellung und Einsatz von Recycling-Zement (R-Zement) aus Betonbrechsand. Vortrag 27. Baustoff-Recycling-Tag (2024), Filderstadt, Deutschland, 24.10.2024 DOI: 10.5445/IR/1000177482.

Ojeda P., A.Y., 2023. Superstructure optimization for a novel cement production process utilizing secondary raw materials. Vortrag, Helmholtz Energy Conference (2023), Koblenz, Deutschland, 12.06.2023 – 13.06.2023, DOI: 10.5445/IR/1000165612

Stemmermann, P.: Zero emission circular concrete, Vortrag 5. International Conference on Progress of Recycling in the Built Environment (2023), Weimar, Deutschland, 10.10.2023 – 12.10.2023, DOI: 10.5445/IR/1000165533

Volk, R., Steins, J.J., Stemmermann, P., Schultmann, F., 2022. Comparison of different post-demolition autoclaved aerated concrete (AAC) recycling options. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1078, Art.Nr.: -012074. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012074>

Yarka Reddy, P. R.; Beuchle, G.; Stemmermann, P.; Stapf, D. Thermodynamic Modelling of Cement Clinker Formation from Cementitious Waste 2024, September 24. *Materials Science and Engineering Congress (MSE 2024)*, Darmstadt, Deutschland, 24.–26. September 2024

Yarka Reddy, P. R.; Sandaka, G.; Beuchle, G.; Stemmermann, P.; Stapf, D. Sustainability in the Cement Industry: Thermodynamic Modelling of Belite Cement Clinker 2024, März 19. *Jahrestreffen der ProcessNet Fachgruppe Hochtemperaturtechnik (2024)*, Lindlar, Deutschland, 19.–20. März 2024

Yarka Reddy, P.R., Beuchle, G., Stemmermann, P., Stapf, D., 2023. Circular Zero Emission Concrete : Thermodynamic Modelling of Belite Cement Clinker. Vortrag Helmholtz Energy Conference (2023), Koblenz, Deutschland, 12.06.2023 – 13.06.2023 DOI: 10.5445/IR/1000159570

Yarka Reddy, P. R.; Beuchle, G.; Stemmermann, P.; Stapf, D.
Sustainability in cement industry: Thermodynamic modelling of belite cement clinker
2023, Oktober 12. Transforming towards a sustainable society - challenges and
solutions (2023), Karlsruhe, Deutschland, 11.–13. Oktober 2023

Poster

**Stemmermann, P.; Ullrich, A.; Garbev, K.; Beuchle, G.; Schweike, U.; Precht, U.;
Stapf, D.** 2023. Zero-Emission Circular Concrete. Helmholtz Energy Conference
(2023), Koblenz, Deutschland, 12.06.2023 – 13.06.2023 DOI: 10.5445/IR/10001