

Günter Beuchle, Krassimir Garbev, Oliver Kreft,  
Frank Schultmann, Uwe Schweike, Justus Steins,  
Peter Stemmermann, Angela Ullrich, Rebekka Volk,  
Beate Weiß

## RECYCLINGCLUSTER PORENBETON (REPOST)

SCHLUSSBERICHT DES FORSCHUNGSVORHABENS



Günter Beuchle, Krassimir Garbev, Oliver Kreft,  
Frank Schultmann, Uwe Schweike, Justus Steins,  
Peter Stemmermann, Angela Ullrich, Rebekka Volk,  
Beate Weiß

## **Recyclingcluster Porenbeton (REPOST)**

Schlussbericht des Forschungsvorhabens

## PRODUKTION UND ENERGIE

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion  
Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung

Band 45

# Recyclingcluster Porenbeton (REPOST)

Schlussbericht des Forschungsvorhabens

von

Günter Beuchle, Krassimir Garbev, Oliver Kreft,  
Frank Schultmann, Uwe Schweike, Justus Steins,  
Peter Stemmermann, Angela Ullrich, Rebekka Volk,  
Beate Weiß

## Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Kaiserstraße 12  
76131 Karlsruhe

Institut für Industriebetriebslehre und industrielle Produktion  
u. Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung  
[www.iip.kit.edu](http://www.iip.kit.edu)



*This document – excluding parts marked otherwise, the cover, pictures and graphs – is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

2024

ISSN 2194-2404

DOI 10.5445/IR/1000173409







# Recyclingcluster Porenbeton (REPOST)

## Schlussbericht des Forschungsvorhabens

Gefördert von: Bundesministerium für Bildung und Forschung



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Gesamtlaufzeit des Projekts: 01.06.2019 – 31.12.2022

Förderkennzeichen: 033R249A, 033R249B, 033R249C, 033R249D

Projektpartner: Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Otto Dörner Entsorgung GmbH

Berichtersteller/-innen  
/ Autoren/-innen: Günter Beuchle  
Krassimir Garbev  
Oliver Kreft  
Frank Schultmann  
Uwe Schweike  
Justus Steins  
Peter Stemmermann  
Angela Ullrich  
Rebekka Volk  
Beate Weiß



# Inhaltsverzeichnis

<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>iii</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>v</b>
<b>1. Kurzbericht .....</b>	<b>1</b>
1.1 Aufgabenstellung.....	1
1.2 Stand der Wissenschaft und Technik .....	1
1.3 Ablauf des Vorhabens .....	2
1.4 Ergebnisse .....	2
<b>2. Eingehende Darstellung .....</b>	<b>5</b>
2.1 Verwendung der Zuwendung sowie erzielte Ergebnisse.....	5
2.1.1 Ziele des Vorhabens .....	5
2.1.2 AP 1: Praxisphase zur sortenreinen Aussortierung von Porenbeton über die Sortieranlage am Standort Hamburg Ottensen und über Separierung und Nachsortierung von Monofractionen von Baustellen .....	6
2.1.3 AP 2: Herstellung von Dicalciumsilikat aus separierten Porenbetonfraktionen.....	9
2.1.4 AP 3: Entwicklung von Porenbeton unter Verwendung von (1) Mehl und (2) NT-BZK aus Altporenbeton .....	17
2.1.5 AP 4: Kalksandstein mit Mehl aus Altporenbeton.....	22
2.1.6 AP 6: Systemanalyse und techno-ökonomische und ökologische Bewertung (KIT-IIP) .....	24
2.2 Zielerreichung.....	38
2.3 Zahlenmäßiger Nachweis .....	41
2.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	41
2.5 Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	42
2.6 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	43
2.7 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses .....	44
<b>3. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>47</b>



# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Zielerreichung des Forschungsvorhabens.....39



# Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
EOX	extrahierbare organisch gebundene Halogene
LHKW	leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe
NT-BZK	Niedertemperatur Belitzementklinker-Prozess
OPC	Portlandzement
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
SFK	Festigkeitsklasse
TA	Thermische Analyse
XRD	Röntgendiffraktometrie





# 1. Kurzbericht

## 1.1 Aufgabenstellung

Im Gegensatz zu frischen Produktionsabfällen enthält Altporenbeton aus dem Rückbau von Gebäuden in der Regel Fremdstoffe, wodurch die Möglichkeit einer hochwertigen Wiederverwertung dieses Materials erschwert wird. Zudem sind übliche Recyclingmöglichkeiten im Straßenbau oder für die Herstellung von Recyclingbeton als Gesteinskörnung angesichts der verhältnismäßig geringen Festigkeit und geringen Frostbeständigkeit von Porenbeton ausgeschlossen. Derzeit wird Porenbeton deshalb nach der Nutzung in den meisten Fällen deponiert. Aufgrund geringer Deponiekapazitäten, hoher Deponiegebühren, gesetzlicher Verpflichtungen zur Recyclingfähigkeit von Produkten und deren Abfällen sowie zur Schonung von Primärstoffen ist es unabdingbar, Verwertungsalternativen für dieses Abbruchmaterial zu finden. Daher war das Ziel des REPOST-Verbundvorhabens, neue Optionen für eine ressourceneffiziente, qualitativ hochwertige und wirtschaftliche Wiederverwertung von Porenbetonresten aus dem Abbruch von Gebäuden in der Produktion von Bauprodukten zu entwickeln. Das Vorhaben zielte auf die Reduzierung des Einsatzes von Primärrohstoffen bei der Herstellung von Baustoffen durch das Wiederverwerten von Altporenbeton auf gleicher oder zumindest vergleichbarer Qualitätsstufe.

## 1.2 Stand der Wissenschaft und Technik

Porenbeton ist grundsätzlich vollständig recyclingfähig: Bei der Produktion fällt immer auch Porenbetonbruch an, der entweder zu Porenbetongranulat (Ölbinder, Wärmedämmschüttungen, Dachbegrünungssubstrate oder im Haustierbereich als Hygienestreu) weiter veredelt, oder in gebrochener Form als Sekundärrohstoff in die laufende Produktion von Porenbeton zurückgeführt wird. Dieses Vorgehen lässt sich aufgrund von Verunreinigungen oder Fremdstoffen jedoch nicht ohne Weiteres auf Altporenbeton aus dem Rückbau von Gebäuden übertragen. Derzeit wird Porenbeton deshalb nach der Nutzung in den meisten Fällen deponiert.

## 1.3 Ablauf des Vorhabens

Das Gesamtvorhaben umfasst sechs Arbeitspakete. Der Arbeitsplan orientiert sich am Lebenszyklus eines rezyklierten Porenbetonsteins und beginnt daher mit dem Rückbau bzw. der Aufbereitung von Porenbeton aus dem Bestand. Zunächst startete eine Praxisphase zur sortenreinen Aussortierung von Porenbeton über die Sortieranlage am Standort Hamburg Ottensen und über Separierung und Nachsortierung von Monofractionen von Baustellen (AP 1). Das so zur Verfügung gestellte Material wurde analysiert und hinsichtlich der Eignung für den neu am KIT entwickelte Niedertemperatur Belitzementklinker-Prozess (NT-BZK-Prozess) bewertet; außerdem wurde eine Anpassung/Optimierung des NT-BZK-Prozesses an Kleinchargen durchgeführt (AP 2). Darüber hinaus wurde Altporenbeton für APs 3, 4 und 5 bereitgestellt.

In AP 3 wurden Porenbetonrezepturen entwickelt, die unter Einhaltung normativer Materialeigenschaften maximale Anteile an aufbereitetem Altporenbeton enthalten. Beinhaltet sind Prototypenentwicklung, Hochskalierung unter Produktionsbedingungen, Testproduktionen sowie Produktionsfreigaben und -aufnahmen. Teilpaket von AP 3 ist die Entwicklung eines Porenbetons unter Verwendung von NT-BZK aus Altporenbeton (aus AP 2) als Substitut für Portlandzement (OPC).

In AP 4 wurde ein Kalksandstein mit Mehl aus Altporenbeton entwickelt, der Festigkeitsklasse (SFK) 12 erreichen sollte. Auch hier war neben Prototypenherstellung, Testproduktionen, Produktionsfreigaben und -aufnahmen beabsichtigt.

Abschließend wurde eine Systemanalyse, sowie techno-ökonomische und ökologische Bewertung für das Porenbeton-Recycling durchgeführt (AP 6).

## 1.4 Ergebnisse

Bei der Bearbeitung des Verbundvorhabens REPOST ist es zielgemäß gelungen, neue Optionen für eine ressourceneffiziente, qualitativ hochwertige und wirtschaftliche Wiederverwertung von Porenbetonresten aus dem Abbruch von Gebäuden in der Produktion von Bauprodukten zu entwickeln.

Aus separierten Porenbetonfraktionen wurden Niedertemperatur Belitzementklinker (NT-BZK) hergestellt, die in der Porenbetonindustrie Verwendung finden.  $\text{CaCl}_2$  und  $\text{Na}_2\text{CO}_2$  erwiesen sich als geeignete Mineralisatoren für den Kalzinierungsprozess. Hierbei konnten kritische lösliche Stoffe (Chlor) in stabile Mineralstrukturen gebunden

werden. Kombinierte Analytik ermöglicht die Bestimmung der Ausbeute von CaO in Belit und anderen Produktphasen

Von der Prototypentwicklung bis zu Testproduktionen konnte gezeigt werden, dass in Abhängigkeit des Zielprodukts Zugabemengen von bis zu 25 M.-% Altporenbetonmehl möglich sind, ohne normative Materialkennwerte zu gefährden. Basisrezepturen wurden als neue Produktkategorie in Xella's Freigaberichtlinie integriert. Die erste Produktionsfreigabe für ein Ytong-Werk erfolgte 2022, weitere sind aktuell in Bearbeitung.

Die Rezepturentwicklung eines Porenbetons mit NT-BZK aus Altporenbeton als (teilweises) Substitut für Portlandzement (OPC) wurde im Technikumsmaßstab abgeschlossen. Dabei ließen sich bis zu 50 M.-% OPC durch NT-BZK ersetzen.

Die Entwicklung eines Kalksandstein-Prototyps der Druckfestigkeitsklasse 12 (Brutto-Trockenrohdichte 1,6–1,8 kg/dm<sup>3</sup>) mit 20 M.-% Altporenbeton ist abgeschlossen. Die geplante Testproduktion mit 12 t Altporenbetonmehl von Otto Dörner wurde aufgrund externer (COVID-19) und interner Umstände (fehlende Versuchskapazitäten in den Kalksandsteinwerken aufgrund hoher Produktionsauslastung in den Jahren 2021 und 2022) wurde durch die Produktionssteuerung der Xella Deutschland GmbH mehrfach verschoben und war letztlich im Rahmen der Projektbearbeitung nicht mehr möglich.

Das KIT hat im Rahmen des Verbundvorhabens REPOST das regionale Altporenbeton-Aufkommen in Deutschland und Europa abgeschätzt sowie eine techno-ökonomische und ökologische Analyse alternativer Verwertungsoptionen für Altporenbeton durchgeführt. Auf dieser Basis wurde zudem ein Porenbeton-Recyclingnetzwerk modelliert, um eine Standort-, Kapazitäts- und Logistiko Optimierung durchzuführen. Dabei wurden auch aktuelle und mögliche Rahmenbedingungen in Form einer Szenarioanalyse berücksichtigt und abschließend Empfehlungen zu möglichen, ressourcenschonenden politischen Handlungsoptionen formuliert.



## **2. Eingehende Darstellung**

### **2.1 Verwendung der Zuwendung sowie erzielte Ergebnisse**

In diesem Abschnitt werden zunächst die in der Vorhabenbeschreibung genannten Ziele des Verbundvorhabens aufgeführt. Anschließend werden die im Arbeitsplan genannten Arbeitspakete einzeln betrachtet. Für jedes Arbeitspaket werden die durchgeführten Arbeiten sowie die dabei erzielten Ergebnisse eingehend erläutert.

#### **2.1.1 Ziele des Vorhabens**

Das Gesamtziel des Verbundvorhabens wurde in Abschnitt 1.1. der Vorhabenbeschreibung wie folgt formuliert: "REPOST entwickelt neue Optionen für eine ressourceneffiziente, qualitativ hochwertige und wirtschaftliche Wiederverwertung von Porenbetonresten aus dem Abbruch von Gebäuden in der Produktion von Bauprodukten." Bei diesem übergeordneten Ziel ergeben sich entsprechend des Abschnitts 3. der Vorhabenbeschreibung die Arbeitspakete 1 bis 6 mit jeweils mehreren Meilensteinen. Die Ergebnisse der Bearbeitung dieser Arbeitspakete und Meilensteine wird im Folgenden ausführlich beschrieben.

Das wissenschaftliche und technische Ziel des Verbundvorhabens ist nach Abschnitt 1.2.1. der Vorhabenbeschreibung wie folgt zusammengefasst: "Ziel des vorliegenden Projektantrages ist es deshalb, Grundlagen für eine ressourceneffiziente, qualitativ hochwertige und wirtschaftliche Kreislaufführung für Porenbeton zu erarbeiten. Der bereits vorhandene Stoffkreislauf für sortenreines Porenbetonmaterial soll deshalb im zentralen Teilprojekt von REPOST für entsprechendes Altmaterial geöffnet werden. Aus Porenbeton-Altmaterial verschiedener Sortenreinheiten werden Baustoffprototypen für den Mauerwerksbau entwickelt, die unter Einhaltung erforderlicher normativer Eigenschaftskennwerte jeweils maximal mögliche Mengen an rezykliertem Sekundärporenbeton enthalten sollen. Soweit dieses Altmaterial nicht direkt stofflich wiederverwertet werden kann, wird eine thermische Umwandlung in Dicalciumsilikat, einem Hauptbestandteil von Zementklinker untersucht. Der so gebrannte Niedertemperatur-Belitzementklinker (NT-BZT) kann gemahlen Portlandzementklinker ersetzen. Das Verfahren ist mit Primärrohstoffen, nicht jedoch mit Porenbeton als sekundärem Roh-

stoff erprobt. Ziel ist, den zu deponierenden Anteil an Porenbeton zu minimieren und in der Porenbetonproduktion die primären Rohstoffe Zement bzw. gebrannten Kalk teilweise mit einem Recyclingprodukt zu ersetzen, das bei seiner Herstellung niedrigere spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen und einen niedrigeren Energieeinsatz verursachte. Darüber hinaus werden ein über den gesamten Lebenszyklus reichendes Geschäftsmodell für zwei neue Verwertungsoptionen sowie die erforderlichen informatorischen, ökonomischen und regulatorischen Rahmenbedingungen entwickelt. Zusätzlich werden die Rücknahme von sortenreinem Porenbetonabbruch durch den Hersteller und weitere Akteure wie Bauherrn, Abbruchunternehmen und Aufbereiter mit einbezogen.“ Zusätzlich war es das Ziel, Projektergebnisse in wissenschaftlichen Fachjournals und auf Fachkonferenzen zu veröffentlichen und im Rahmen der Lehre in die Ausbildung der unterschiedlichen, beteiligten Fachdisziplinen einfließen zu lassen.

### **2.1.2 AP 1: Praxisphase zur sortenreinen Aussortierung von Porenbeton über die Sortieranlage am Standort Hamburg Ottensen und über Separierung und Nachsortierung von Monofraktionen von Baustellen**

#### **2.1.2.1 AP 1-1: Rückgewinnung von Altporenbeton aus gemischtem Bauschutt (Sortieranlage Otto Dörner)**

Es war festzustellen, dass Porenbeton aus Abbruchmaßnahmen im hohen Maß mit Anhaftungen oder anderen Baustoffen verbunden ist, die der Weiterverwendung in der Produktion im Rahmen der Projektziele im Wege stehen. Dazu gehören metallische Gegenstände wie Schrauben oder Haken, Fliesen oder Keramikanhaftungen oder bituminöse oder teerhaltige Beschichtungen oder Anstriche. In Abstimmung mit dem Projektpartner Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH (im Folgenden Xella T&F) wurde ein Anforderungsprofil an die Sortenreinheit von Altporenbeton erstellt.

Gips und mineralische Putze/Kleber/Mörtel sind nach heutigem Kenntnisstand für die Herstellung von Porenbeton unproblematisch. Diese Fremddanteile dürfen eine Gesamtmenge von drei Volumenprozent nicht überschreiten. Es werden nur Materialien akzeptiert, die frei von Asbest und anderen WHO-Fasern sind. Metalle, Kunststoffe in Form von Folien und Gewebe, Holz, Papier und Glas sind vollständig auszusortieren.

Um aus gemischtem Bauschutt Porenbeton mit der erforderlichen Sortenreinheit zu gewinnen, mussten Sortierarbeiten im hohen Maße händisch erfolgen. Die händische

Aussortierung erfolgte durch Hilfskräfte, was eine durch intensive Beaufsichtigung des Sortierergebnis erforderlich macht. Auch mussten kontinuierliche Schulungen und Erklärungen sowie Überprüfungen durchgeführt werden.

Fazit: Die Herstellung von Altporenbeton in hoher Qualität ist mit einem hohen Sortieraufwand verbunden. Auch bei hohem Aufwand noch Störstoffe enthalten, die Endprodukt beeinträchtigen können.

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt den Meilenstein

- M = Optimierung der Sortierungsqualität unter Verwendung der vorhandenen Anlage

#### **2.1.2.2 AP 1-2: Separierung und Nachsortierung von Monofractionen über Baustellen**

Der Versuch, auf den Baustellen selbst die Sortenreinheit zu verbessern, zeigte sich als schwierig. Auf Abbruchmaßnahmen wird überwiegend maschinell gearbeitet, was eine Trennung von Steinen mit und ohne Anhaftungen quasi unmöglich macht. Selbst die sortenreine Trennung von Porenbeton, Gips und Kalksandsteinen konnte von den Baustellen nicht erreicht werden. Großbaustellen mit großen Porenbetonmengen sind meist Lagerhallen. Diese wiederum sind oft mit Bewehrung versehen und somit händisch nicht zu bearbeiten. Bei professionellem Brechereinsatz kommt es jedoch zu hoher Staubentwicklung und somit zu arbeitschutzrechtlichen Problemen.

Der ursprünglich geplante Meilenstein

- M = Weitere Optimierung der Sortierungsqualität unter Verwendung der vorhandenen Anlage

wurde nicht erarbeitet, da die technische Aufrüstung der vorhandenen Anlage als zielführende Maßnahme zur Verbesserung der Sortenreinheit erkannt wurde (AP 1-3).

### **2.1.2.3 AP 1-4: Bereitstellung von Altporenbeton für AP 2 bis AP 5**

In Summe wurden den Projektpartnern KIT-ITC und Xella T&F ca. 50 t Altporenbeton als Ausgangsmaterial für Folgeuntersuchungen und -versuche zur Verfügung gestellt.

#### **1. Bereitstellung von Altporenbeton für AP 2 (KIT-ITC)**

Im Bearbeitungszeitraum 2019 wurde für den Projektpartner KIT-ITC (AP 2) jeweils 1 t Altporenbeton in 3 unterschiedlichen Sortierqualitäten (A, B, C) bereitgestellt. Das Material wurde mittels händischer Aussortierung aus verschiedenen Abbruchprojekten gesammelt.

#### **2. Bereitstellung von Altporenbeton für AP 3 (Xella T&F)**

Im November 2019 wurde eine Gesamtmenge von 26 t Altporenbeton an die Xella Granulanlage in Rotenburg/Wümmen geliefert. Die Vorsortierung bei Otto Dörner erfolgte mittels vorhandener Sortieranlage und anschließender händischer Nachsortierung am Leseband. In Rotenburg wurde das Material auf einen speziell eingerichteten, gesicherten Lagerplatz verbracht und visuell auf Fremd- und Störstoffe nachuntersucht. Erkennbar waren kleinere Anhaftungen von Farbanstrichen, Tapeten, Klebern/Mörteln und Rostschutzfarbe. Die festgestellten Fremdanteile wurden als unproblematisch eingestuft, sodass das Material für die Prozessierung mittels Granulanlage freigegeben wurde. Das großstückige Altmaterial wurde in einen Herbold-Brecher überführt und zunächst nass gebrochen. Nach Trocknung auf 5 % Restfeuchte erfolgte ein weiterer Zerkleinerungsschritt. Bei beiden Schritten entstand als Nebenprodukt Porenbetonmehl, als Nass- bzw. Trockenmehl.

Die Zerkleinerung verlief störungsfrei, sodass die im Projektteilantrag des Partners Xella unter Pos. "0850 sonstige unmittelbare Vorhabenkosten" vorgesehene Zerkleinerung von Porenbeton durch einen externen Lohnaufmahler nicht mehr erforderlich war.

Aus 26 t Altporenbeton ließen sich 6.036 kg Rohgranulat (ca. 25 %) und 19.620 kg Porenbetonmehl (ca. 75 %) darstellen, entsprechend einem Granulat/Mehl-Verhältnis von ca. 1/3. Granulat und 19 Big Bags mit Porenbetonmehl wurden für weiterführende Untersuchungen und Versuche (AP 3) zur Xella T&F geliefert.

An drei Mehlproben, die zu Beginn, in der Mitte und am Ende der Zerkleinerung gesammelt wurden, wurden Analysen der Feststoffgehalte und Eluatkonzentrationen gemäß LAGA-Mitteilung 20, „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen: Teil II: Technische Regeln für die Verwertung, 1.2 Bodenmaterial (TR Boden)“ durchgeführt. Von wenigen Ausnahmen abgesehen wurden die Zuordnungs-



werte für Einbauklasse 0 (Uneingeschränkter Einbau) eingehalten (die Ausnahmen betrafen u. a. Porenbeton-typische Sulfatgehalte). Das traf für extrahierbare organisch gebundene Halogene (EOX), leichtflüchtige aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX-Aromaten und weitere Alkylbenzole), leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (LHKW) sowie Metalle und Metalloide zu. In keiner der Proben konnte Asbest nachgewiesen werden. Somit ergaben sich aus chemischer/physikalischer Sicht keine Einschränkungen hinsichtlich der geplanten Anwendungen bei Xella.

### **3. Bereitstellung von Altporenbeton für AP 4 (Xella T&F)**

Im Oktober 2021 wurde im Xella Granulatwerk Rotenburg erneut Mehl aus Altporenbeton hergestellt. Ausgangsmaterial waren 12 t Altporenbeton von Otto Dörner. Chemisch-mineralogische Analysen, Sieb- und Fremdkörperanalysen am Produkt waren auch hier ohne negativen Befund. Das Produkt wurde somit für die Weiterverwertung in einem Kalksandsteinwerk freigegeben (AP 4).

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt den Meilenstein

- M = Materialübergabe für Versuche KIT-ITC und Xella T&F

### **2.1.3 AP 2: Herstellung von Dicalciumsilikat aus separierten Porenbetonfraktionen**

Im Arbeitspaket 2 werden sekundäre, Porenbeton enthaltende Rohstoffe aus Teilprojekt 1 mit einem neuen, am KIT entwickelten Verfahren bei Temperaturen unter 1000 °C zu einem Zementklinker umgesetzt, der vorwiegend aus Dicalciumsilikat ( $C_2S$ , Belit) besteht [1, 2]. Dieser Niedertemperatur-Belitzementklinker (NT-BZK) wird in Arbeitspaket 3 zur Herstellung von Porenbeton eingesetzt, wobei er Portlandzement teilweise substituiert. NT-BZK kann auch anderweitig in der Baustoffproduktion genutzt werden. Das Verfahren benötigt einen vergleichsweise niedrigen Energieeinsatz und ermöglicht es auch verunreinigte Rohstoffe einzusetzen. *Carbon-capture* ist als Option zu geringen Kosten möglich.

### 2.1.3.1 AP 2-1: Analyse und Bilanzierung aller Stoffströme, Applikationstests

#### 1. Analyse und Bilanzierung aller Stoffströme

In diesem Teilarbeitspaket wurden sowohl die Rohstoffe als auch die Produkte der Herstellung von NT-BZK beprobt und bezüglich der wichtigsten Bestandteile chemisch und in Bezug auf die Phasenzusammensetzung und Partikelgrößenverteilung quantitativ untersucht. Kritische lösliche Verbindungen (z.B. Sulfate, Chloride) im Klinker wurden identifiziert.

Die Rohmaterialien und Störstoffanteile wurden mit Röntgendiffraktometrie (XRD), Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), Thermischer Analyse (TA) und Raman Spektroskopie mineralogisch und chemisch analysiert. Die Bestimmung der Qualität des synthetisierten NT-BZK (Effizienz bzw. Ausbeute der Umwandlung) erfolgt durch Kombination der Einzelmethoden.

Drei Abbruchmaterialien mit unterschiedlichen Sulfatgehalten sowie ein Produktionsrest aus der Porenbetonindustrie wurden durch AP 1 für weitergehende Untersuchungen und Applikationstests zur Verfügung gestellt.

In einem ersten Schritt wurden mittels XRD an diesen Materialien *in-situ* Untersuchungen zum Hochtemperaturverhalten von Porenbetonabfällen in Mischungen durchgeführt, deren Zusammensetzung einem NT-BZK entspricht [3]. Dazu wurden die Rohmaterialien zunächst umfangreich analysiert. Je nach Sortierqualität des Porenbetonabfalls wurden Sulfatgehalte zwischen 1,5 und 10,7 M.-% ermittelt. Für die Synthese eines belitreichen Klinkers wurden die Porenbetonabfälle jeweils im molaren Verhältnis  $\text{CaO/SiO}_2 = 2$  mit  $\text{CaCO}_3$  abgemischt. Anschließend wurden die Proben in einer speziellen Hochtemperatur Kammer (Anton Paar HTK1200N) in 2,5 Stunden auf 1000 °C aufgeheizt. Diese Methode bietet die Möglichkeit die Reaktionskinetik und die Änderung der Phasenzusammensetzung während des Aufheizens zu verfolgen. Aufgrund der geringen einsetzbaren Probenmenge (0,2 g) und der geringen Aufheizgeschwindigkeit wurde ohne Mineralisator gearbeitet. Mineralisatoren erhöhen technisch die Reaktionskinetik und den Stoffumsatz.

Die Bildung von sehr feinkristallinem Belit ( $\text{C}_2\text{S}$ ) beginnt bereits ab 650 °C; der Gehalt steigt bis 1000 °C an. Aufgrund der geringen Kristallinität konnte die  $\alpha'$ -H- $\text{C}_2\text{S}$  Struktur (Hochtemperaturmodifikation) erst ab 950°C eindeutig bestimmt werden. In Abhängigkeit vom Sulfatgehalt des Porenbetons entsteht bei der Reaktion mit  $\text{CaCO}_3$  neben  $\text{C}_2\text{S}$  auch das Calcium-Silicat-Sulfat Ternesit ( $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_2\text{SO}_4$ ). Da sich höhere Sulfatgehalte positiv auf die Bildung und Kristallinität von  $\alpha'$ -H- $\text{C}_2\text{S}$  auswirken, ab 950 °C aber parallel

Ternesit entsteht, zeigt die Probe mit intermediärem Sulfatgehalt (4,2 M.-%) die höchsten  $\alpha'$ -H-C<sub>2</sub>S Gehalte. Bei Temperaturen bis 950 °C liegen zusätzlich größere Mengen CaO und in sulfatarmen Systemen auch Wollastonit vor. Beim Abkühlen findet die Umwandlung von  $\alpha'$ -H-C<sub>2</sub>S zu  $\beta$ -C<sub>2</sub>S statt, während der Ternesitgehalt stabil bleibt.

Eine Erhöhung der Heizdauer (950 °C in 12 Stunden) zeigt, dass der Einfluss der Aufenthaltsdauer auf die Bildung von  $\alpha'$ -H-C<sub>2</sub>S zwar gering ist, dass sich Ternesit aber bereits ab 850 °C bildet und auch der Gesamtgehalt steigt. Bei einem Aufenthalt von 4 Tagen bei 950 °C steigt der Ternesit Gehalt weiter auf Kosten von  $\alpha'$ -H-C<sub>2</sub>S. Langsameres Abkühlen verschiebt die Umwandlung von  $\alpha'$ -H-C<sub>2</sub>S zu  $\beta$ -C<sub>2</sub>S zu deutlich höheren Temperaturen (von 450 °C auf 540 °C). Für einen kontinuierlichen Produktionsprozess bedeutsam ist, dass ein schnelles Abkühlen das potentiell reaktive Material  $\alpha'$ -H-C<sub>2</sub>S stabilisiert.

Die Anpassung des CaO/SiO<sub>2</sub>-Verhältnisses auf 2,5 führte nur zu einer Erhöhung des Ternesit Gehalts, bzw. zu größeren Restmengen an CaO bei hohen Temperaturen. Insgesamt konnte eine Umsetzung der Rohmaterialien zu maximal 90 M.-%  $\beta$ -C<sub>2</sub>S für die Probe mit intermediärem Sulfatgehalt erreicht werden. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde erstmalig die thermische Ausdehnung von Ternesit untersucht. Diese ist, entsprechend der strukturellen Ähnlichkeit vergleichbar mit  $\beta$ -C<sub>2</sub>S, wobei sich die Richtung maximaler Ausdehnung durch den Sulfateinbau ändert.

Das Hochskalieren der Probenmengen von 0,2 g auf 100 g sowie die Erhöhung der Aufheizzeit erfordern den Einsatz eines geeigneten Mineralisators wie CaCl<sub>2</sub> oder Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

Die Eignung von CaCl<sub>2</sub> als Mineralisator in der Synthese eines NT-BZK wurde an Mischungen aus zwei Porenbetonabbruchmaterialien bzw. einem Produktionsabfall mit CaCO<sub>3</sub> (molares Verhältnis CaO/SiO<sub>2</sub> = 2) untersucht [4]. Die Mischungen wurden in einem Nabertherm Ofen auf Temperaturen von 700 °C bis 1200 °C aufgeheizt und nach dem Abkühlen analysiert.

Das Mineral Ellestadit (Ca<sub>5</sub>(SiO<sub>4</sub>,SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH,Cl,F)) gilt als potenzielles Speichermedium für Chlor [5, 6]. Daher wurde in den Experimenten an Proben mit unterschiedlichen Sulfatgehalten neben einer hohen C<sub>2</sub>S Ausbeute auch eine hohe Ausbeute an Chlorellestadit (Ca<sub>10</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>Cl<sub>2</sub>) angestrebt.

Die Chlorbestimmung mittels Ionenchromatographie zeigt, dass Chlor bis 1000 °C im Material gebunden ist, 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 C<sub>2</sub>S (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 von C<sub>2</sub>S reduziert. Die Kristallisation von Ellestadit hängt eher von Sulfatgehalt als von der Bildungstemperatur ab, wobei sich insbesondere in sulfatreichen Proben bei höheren Temperaturen Ternesit auf Kosten von Ellestadit bildet. Geringe Sulfatgehalte führen zur Bindung von Chlor in schlecht kristallinen und weniger stabilen Phasen sowie zur Kristallisation von Melilith bei hohen Temperaturen.

Raman-Spektroskopie bzw. Imaging bestätigt die hoch-Temperatur Bildung von Ternesit, Anhydrit und C<sub>2</sub>S 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 C<sub>2</sub>S und Ellestadit durch den Einsatz von CaCl<sub>2</sub> als Mineralisator deutlich gesteigert werden kann. Alle mit CaCl<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> Mineralisator.

Die Eignung von Natriumcarbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) als Flussmittel für die Herstellung von Dicalciumsilikat (C<sub>2</sub>S) haben frühere Untersuchungen bestätigt [7]. Unter Einsatz von 3 % und 5 % Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> wurde in der sulfatreichen Probe bei 1000 °C ein Umsatz von CaO zu C<sub>2</sub>S (kristallin und amorph) und Ellestadit von 92 bis 94 % erzielt. Dieser ist höher als bei vergleichbaren Synthesen mit CaCl<sub>2</sub> als Mineralisator. Zudem begünstigt die Zugabe von Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> die Raum-Temperatur Stabilität von α'-H-C<sub>2</sub>S, was einen positiven Effekt auf die hydraulische Reaktivität haben sollte. Unabhängig vom Sulfatgehalt enthält keine der Proben größere Mengen Ternesit. Stattdessen gibt es hier eine Vielzahl von Nebenphasen. Natrium und Sulfat finden sich in Form von Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Anhydrit und Combeit.

Die Kombination der Ergebnisse aus einzelnen Messmethoden (XRD, TG, RFA, Raman Spektroskopie) ermöglicht die Analyse und Bilanzierung der eingesetzten Stoffströme und bildet die Grundlage der Energie- und Stoffbilanzen in AP 2-3.

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt den Meilenstein

- M = Analyse und Bilanzierung aller Stoffströme

## 2. Applikationstests

Für die Synthesen mit  $\text{CaCl}_2$  als Mineralisator bildet die Einbindung von Chlor in die Ellestadit-Struktur die Voraussetzung der Eignung des NT-BZK für den Einsatz in einem hydrothermalen Prozess. Andernfalls wird Chlor in andere, weniger stabile Minerale eingebaut und kann bei der Hydrothermalbehandlung frei werden.

In einer detaillierten Untersuchung der Ellestadit Struktur mittels Röntgendiffraktometrie (Rietveld Verfeinerung) und Ramanspektroskopie wurde die Zusammensetzung von Ellestadit in Abhängigkeit von der Synthesetemperatur verfolgt [8]. Hierbei zeigt sich die Bildung eines nicht-stöchiometrischen Chlorellestadits bei niedrigen Temperaturen. Dieser Ellestadit kristallisiert ähnlich wie Hydroxylellestadit in monokliner Symmetrie. Das Auftreten von Chlor- und Calcium Fehlstellen sowie der teilweise Ersatz von Sulfat gegen  $\text{CO}_3^{2-}$  wurde im Temperaturbereich von 800 °C bis 900 °C nachgewiesen. Wie auch in Apatiten führt der Einbau von  $\text{CO}_3^{2-}$  zu einer Verkleinerung der Einheitszelle. Erst ab 950 °C bildet sich karbonatfreier Chlorellestadit entsprechend der idealen Stöchiometrie.

Die Stabilität von Chlorellestadit wurde in einem Berghof Autoklaven (Highpreactor BR500) unter hydrothermalen Bedingungen bei 190 °C untersucht.

Bei der Untersuchung der Chlorgehalte von den Ausgangsmischungen bis zur hydrothermal behandelten Probe konnte gezeigt werden, dass, im Gegensatz zu den sulfatarmen Proben, die Chlorgehalte der sulfatreichen Probe bis zu einer hydrothermalen Behandlung von 6h im ursprünglichen Bereich bleiben. Erst ab einer Aufenthaltsdauer im Autoklaven von 12 Stunden verliert auch die sulfatreiche Probe Chlor. Röntgenographische Untersuchungen zeigen zudem, dass sich bei längerem Aufenthalt im Autoklaven unerwünschte Nebenphasen wie Scawtit ( $\text{Ca}_7(\text{Si}_3\text{O}_9)_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) und  $\alpha\text{-C}_2\text{SH}$  bilden.

Insgesamt zeigt sich aber, dass in  $\text{C}_2\text{S}$ -Zement Klinkern, die aus sulfatreichen Rohmaterialien bei Temperaturen um 1000 °C gebrannt werden, die als Mineralisator eingesetzte Chlormenge von ca. 0,95–1,25 M-% in Form von Chlorellestadit fixiert werden kann.

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt den Meilenstein

- M = Applikationstests

### 2.1.3.2 AP 2-2: Prozessanpassung, Formulierung, und Kalzinierung

Im Rahmen dieses Teilarbeitspakets wurden ein Abbruchmaterial und das Produktionsrestmaterial aus der Porenbetonindustrie für weitere Untersuchungen ausgewählt.

Als Brenntemperatur im Labordrehrohr wurden 1000 °C gewählt, der Materialfeed auf 200 g/h. eingestellt. Die Transportgeschwindigkeit durch das Labordrehrohr betrug 1,4 mm/s. Die Aufenthaltsdauer in der Zone > 900°C berechnet sich auf ca. 5 Minuten. Variiert wurden die Flussmittelkonzentration und die CO<sub>2</sub>-Atmosphäre im Drehrohr.

Die Drehrohrversuche bestätigen die Voruntersuchungen im Muffelofen bezüglich der im Syntheseprodukt vorliegenden Mineralphasen. Die Umsetzung des Rohmaterials zu Belitklinker wurde auch hier anhand der Ausbeute bewertet. Sie berechnet sich aus den CaO-Anteilen in der Summe von potenziell hydraulisch reaktivem Material ( $\alpha'$ -H-C<sub>2</sub>S+ $\beta$ -C<sub>2</sub>S+C<sub>2</sub>S<sub>amorph</sub>) und Ellestadit.

Beim Einsatz von CaCl<sub>2</sub> ist Ausbeute im Vergleich zu den Versuchen im Muffelofen etwas geringer (72 %). Es bildet sich bevorzugt Larnit und nur in geringen Mengen  $\alpha'$ -H-C<sub>2</sub>S. Chlor wird substantiell in Ellestadit fixiert.

Bei den Testbränden mit Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (Flussmittel) und CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Atmosphäre im Drehrohr wird eine gute Umsetzung zu potentiell reaktivem Material erreicht. Die Ausbeute nimmt wie bei den mit CaCl<sub>2</sub> synthetisierten Proben im Vergleich zu den Versuchen im Muffelofen ab (79–82 %). Allerdings ist der Gehalt an  $\alpha'$ -H-C<sub>2</sub>S höher. Dieser erhöht sich in der sulfatreichen Probe mit der Steigerung der Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> Zugabe von 3 % auf 5 % weiter, während die Gehalte an nicht umgesetzten Material (SiO<sub>2</sub>, CaO, CaCO<sub>3</sub>) abnehmen.

Die Versuche zeigen die Abhängigkeit der Ausbeute von der Verfahrensführung. Sie liegt aber in allen Testbränden aus dem Drehrohr bei über 70 %.

Ursprünglich war im Arbeitsplan die Rückgewinnung von Natriumcarbonat durch Waschen des gebrannten NT-BZK vorgesehen. Neben technischen Gründen war diese Frage auch aus wirtschaftlichen Gründen interessant. Mit der vorgesehenen Zugabe von 3–5 M.-% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> als Mineralisator weicht das Produkt NT-BZK von den für Standardzemente vorgegebenen Grenzen des Na<sub>2</sub>O-Äquivalents ab (CEM I bis CEM V: ≤ 0,6 M.-%) ab. Zudem ist durch die Verwendung von Natriumkarbonat als Reinigungs- und Bleichmittel aber auch in der Lebensmittelindustrie der Einsatz von Natriumcarbonat sehr kostenintensiv. Eine Rückgewinnung ist dadurch von wirtschaftlichem Interesse.

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zeigen aber, dass eine vollständige Rückgewinnung des eingesetzten Natriumcarbonats nicht möglich ist. Nur mit großem Aufwand gelingt es mehr als 50 % des eingesetzten Flussmittels wieder zu gewinnen. Die Alkaliwäsche erweist sich aktuell als wirtschaftlich nicht darstellbar. Aus diesem Grund wurde in weiteren Tests entweder der Anteil Natriumkarbonat reduziert oder  $\text{CaCl}_2$  als Mineralisator eingesetzt.

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt den Meilenstein

- M = Prozessanpassung, Formulierung, Kalzinierung

### **1. Erweiterung des AP 2-2: Bereitstellen von NT- Belitzementklinker**

Der schnelle Projektfortschritt erlaubte es, Großversuche beim Projektpartner Xella T&F zum Ersatz von Portlandzement durch NT-BZK durchzuführen. Dazu wurden 100 kg NT-BZK benötigt. Diese Menge wurde aus einem Testbrand zur Verfügung gestellt, der im Vorfeld des Projektes REPOST bei der Firma IBU-Tec in Weimar durchgeführt wurde. Als Silikatquelle wurde ein Abbruchbeton verwendet, der mit  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  als Fließmittelkomponente vermahlen und mit  $\text{CaCO}_3$  auf ein Verhältnis von  $C/S = 2$  abgemischt wurde. Um den gewünschten Belitanteil zu erreichen, wurde die erste Produktcharge einer Nachbrennkampagne im Drehrohr unter kontrollierter Atmosphäre unterzogen.

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt den Meilenstein

- M = Bereitstellung von technischen Mengen für den Projektpartner

### **2.1.3.3 AP 2-3: Grobe Stoff- und Energiebilanz einer NT-BZK Anlage mit 50.000 t/a Durchsatz für unterschiedliche Betriebsweisen des Drehrohrofens**

Aus den in AP 2-1 und AP 2-2 ermittelten Daten wurden Stoffbilanzen (insbesondere mit Bezug auf den Verbleib von qualitätsrelevanten Störstoffen) und eine Energiebilanz des Prozesses abgeleitet. Zudem wurde auf Basis von [9] eine Anlagenkonfiguration für die Rohstoffqualitäten entwickelt. Diese beinhaltet insbesondere eine Trocknung des

Rohmehls durch Abwärmenutzung aus dem Rohgas und dem Klinkerkühler bei einem Betrieb in reinem CO<sub>2</sub>.

Aus den Stoffbilanzen wurde der theoretische chemische Energiebedarf der Klinkerherstellung mit Hilfe des Programms FactSage [10] berechnet. Einzelne thermodynamische Datensätze wurden auf Basis von Literaturdaten zu einer eigenen Datenbank ergänzt [11].

Für die Stoff- und Energiebilanz kommt der zur Beheizung des Drehrohrofens eingesetzten Technologie eine überragende Bedeutung zu. Die verschiedenen Optionen sind allerdings bisher nicht skalierbar. In Abänderung des ursprünglichen Arbeitsplans wurde daher die Hochskalierung einer NT-BZK Anlage nicht betrachtet. Stattdessen wurden für eine Anlagengröße von 50.000 t/a Durchsatz, Wirkungsgrade für einzelne Anlagenkomponenten bei unterschiedliche Betriebsweisen des Drehrohrs (Verbrennung mit und ohne Oxyfuel, elektrische Beheizung) abgeschätzt. Der gewählte Durchsatz wurde als Kompromiss zwischen dem Bedarf der Porenbetonindustrie und den Transportdistanzen der Abfallfraktion gewählt [12]. Für die Mahlung des Rohmehls und des Klinkers sowie für die Anlagensteuerung und Regelungen wurden Bedarfe an elektrischer Energie analog zur Portlandzementherstellung angenommen [13].

Insgesamt ergibt sich für die Herstellung von NT-BZK aus Porenbetonabfall eine Reduktion der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen um bis zu 55 % im Vergleich zu Portlandzementklinker [12, 13]. Diese Reduktion wird erreicht, wenn das Drehrohr elektrisch mit regenerativem Strom beheizt wird.

Die Integration der ermittelten Daten in die ökonomisch-ökologische Gesamtbetrachtung der verschiedenen Verwertungsansätze im Projekt erfolgen in enger Abstimmung mit IIP.

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt den im Projektverlauf modifizierten Meilenstein

- M = Grobe Stoff- und Energiebilanz einer NT-BZK Anlage mit 50.000 t/a Durchsatz für unterschiedliche Betriebsweisen des Drehrohrofens



## **2.1.4 AP 3: Entwicklung von Porenbeton unter Verwendung von (1) Mehl und (2) NT-BZK aus Altporenbeton**

Porenbeton der Druckfestigkeits-/Rohdichteklassen PP2-0,35 (Rohdichte 300–350 kg/m<sup>3</sup>), PP4-0,50 (450–500 kg/m<sup>3</sup>) und PP4-0,55 (500–550 kg/m<sup>3</sup>) machen etwa 90 % des Produktionsvolumens der Xella Deutschland aus. Um das größtmögliche Marktpotential für die zu entwickelnden REPOST-Produkte zu erschließen, erfolgte die Entwicklung von Porenbetonrezepturen mit dem Fokus auf diese drei Produktgruppen.

### **2.1.4.1 AP 3-1: Entwicklung von Rezepten mit bis zu 40 M.-% Porenbetonmehl (Kleintechnikumsmaßstab)**

Die Rezepturentwicklung für Porenbeton unter Verwendung von zerkleinertem Altporenbeton (Sieblinie 0–1 mm, im Folgenden als „Porenbetonmehl“ bezeichnet) wurde auf Laborebene abgeschlossen. Dazu wurden 75 Kleinversuchsgießungen durchgeführt. Das Volumen einer Kleinversuchsgießung betrug jeweils 0,018 m<sup>3</sup>.

Erste Versuchsreihen erfolgten unter Verwendung von repräsentativen Produktionsrezepturen. Dabei wurden die generischen Ausgangsstoffe Portlandzement, Branntkalk, Anhydrit, reiner Quarzsand sowie verschiedene Gehalte an Altporenbetonmehl (Quelle: Otto Dörner GmbH, AP 1) eingesetzt. Aufgrund des hohen Wasseranspruchs des Altporenbetonmehls ließen sich Zugabemengen größer 20 M.-% nur mit erhöhten Wasser/Feststoffverhältnissen umsetzen.

Es zeigte sich, dass die Zielwerte für die Druckfestigkeit gemäß der in Deutschland anzuwendenden Produktnormen für Porenbeton DIN EN 771-4, DIN 20000-404 bzw. der Allgemeiner bauaufsichtlichen Zulassung Z-17.1-540 in den zulässigen Rohdichtebereichen bei Zugabemengen von bis zu 20 M.-% (Güteklasse PP2-0,35, Mindest-Druckfestigkeit am Würfel = 2,76 N/mm<sup>2</sup>) bzw. 30 M.-% (Güteklassen PP4-0,50 und -0,55, Mindest-Druckfestigkeit = 4,6 N/mm<sup>2</sup>) ohne Mühe erreicht werden können. Die schrittweise, weitere Erhöhung der Zugabemengen war mit sinkenden Festigkeitswerten korreliert. Bei Mehlanteilen  $\geq$  40 M.-% ließ sich kein norm- bzw. zulassungsgerechter Porenbeton mehr herstellen.

Die Anforderungen an die Wärmeleitfähigkeit wurden durchgehend erreicht. Als Kontrolle wurden Versuche mit frischem Porenbetonmehl durchgeführt. Es zeigte sich, dass Rezepturen mit Altporenbeton hoher Sortenreinheit zu vergleichbaren Materialkennwerten führen wie Rezepturen mit Mehl aus frisch produziertem Porenbeton. Um ausreichende Sortenreinheit zu gewährleisten, wurde in Abstimmung mit Otto Dörner

ein Anforderungsprofil definiert (s. AP 1-1): Fremdanteile dürfen eine Gesamtmenge von drei Volumenprozent nicht überschreiten. Mineralische Putze/Kleber/Mörtel sind für die Herstellung von Porenbeton unproblematisch. Es werden nur Materialien akzeptiert, die frei von Asbest und anderen WHO-Fasern sind.

Nach Abschluss dieser Grundlagenuntersuchungen im Kleintechnikum erfolgte die Vorbereitung für die Hochskalierung (AP 3-4). Ausgewählte Rezepturen wurden unter Verwendung repräsentativer Produktionsrohstoffe – zunächst wieder im Kleintechnikum – validiert. Dies betraf in erster Linie den  $\text{SiO}_2$ -Träger: Quarzmehl wurde durch werksseitig vermahlene Rohsand („Sandschlamm“) in zwei Mahlfineinheiten (grob bzw. fein) ersetzt. Die im Vergleich zum reinen Quarzsand niedrigeren Quarzgehalte und Mahlfineinheiten führten zu Einbußen im Festigkeitsniveau im Produkt PP2, sodass die Mindestwerte bereits bei einer Zugabemenge von 10 M.-% Mehl aus Altporenbeton nicht mehr erreicht wurden. Durch Rezepturanpassungen bezüglich des  $\text{CaO/SiO}_2$ -Verhältnisses konnte die ursprüngliche Endfestigkeit nahezu vollständig wiederhergestellt werden, sodass bei Abschluss von AP 3-1 Rezepturen zur Verfügung standen, die auch unter Verwendung von aufbereitetem Rohsand das Erreichen den Mindest-Druckfestigkeiten für die Güteklasse PP2-0,35 bei 20 M.-% Mehllanteil bzw. für die Güteklasse PP4,0,50/-0,55 bei 30 M.-% Mehllanteil ermöglichten.

Weiterführende Untersuchungen zur Auswirkung erhöhter Mehlmengen wurden im Rahmen von AP 3.4 (Abschnitt 2.1.4.4) durchgeführt.

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt die Meilensteine

- M = Abschluss Machbarkeitsstudie, Prototyp(en) im Labormaßstab
- M = Übergabe eines Anforderungsprofils für die Sortenreinheit an Otto Dörner

### **2.1.4.2 AP 3-2: Entwicklung von Rezepten mit NT-BZK aus Altporenbeton**

Die Rezepturenentwicklung für Porenbeton unter Verwendung von Niedertemperatur Belitzementklinker (NT-BZK) aus Altporenbeton wurde auf Laborebene abgeschlossen. Dafür wurden 45 Kleinversuchsgießungen durchgeführt.

Im Verlauf der Projektbearbeitung hat der Projektpartner KIT-ITC fünf Chargen NT-BZK von jeweils 20 kg bereitgestellt. Ausgangsmaterialien für die NT-BZK Synthese waren

sowohl Altporenbeton in verschiedenen Sortenreinheiten, als auch frisch produzierter Porenbeton. Als Mineralisatoren kamen sowohl  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , als auch  $\text{CaCl}_2$  zum Einsatz (s. AP 2). Anhand generischer Porenbetonrezepturen für die Rohdichte-/Druckfestigkeitsklassen PP2-0,35 und PP4-0,50 bzw. 0,55 wurde im Kleintechnikum der Xella T&F die Eignung von NT-BZK als Substitut für Portlandzement untersucht: Für beide Rohdichte-/Druckfestigkeitsklassen ließen sich bis zu 50 M.-% Portlandzement durch NT-BZK ersetzen – unabhängig vom Ausgangsmaterial bzw. Mineralisator. Normrelevante Materialkennwerte wurden auch hier ohne Mühe erreicht. Die Mineralphasenzusammensetzung entsprach Referenzwerten von mit Portlandzement hergestelltem Porenbeton. Allerdings nahm mit steigender Substitutionsrate die Frühfestigkeit („Grünfestigkeit“) der Prototypen ab: Bei einer Substitutionsrate von 25 % verringerte sich die Frühfestigkeit im Vergleich zur Referenz um knapp 40 %. Bei einer 50 %-igen Substitution wurde nach gegebener Standzeit nur die Hälfte der ursprünglichen Frühfestigkeit erreicht. Eine verzögerte Entwicklung der Frühfestigkeit bedeutet längere Standzeiten zwischen Gießen und Entschalen des halbfertigen Porenbetons vor dem Autoklavierungsschritt, der für die finale Festigkeit erforderlich ist. Das bedeutet längere Umlaufzeiten und somit verringerte Produktivität. Um dem entgegenzuwirken, schlossen sich Versuche mit Erhärtungsbeschleunigern an

Die Rezepturentwicklung wurde somit im Bearbeitungszeitraum abgeschlossen. Die Materialkennwerte der fertigen Produkte wurden durch Zugabe der Beschleuniger nicht erkennbar beeinträchtigt.

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt den Meilenstein

- M = Abschluss Machbarkeitsstudie, Prototyp(en) im Labormaßstab

#### **2.1.4.3 AP 3-3: Zusammenführung von AP 3-1 und 3-2**

Es wurden ausschließlich Versuche zur Rohdichte-/Druckfestigkeitsklasse PP2-0,35 durchgeführt. Die Versuche fanden zunächst im Kleinversuchsmaßstab statt. Die Substitution von 50 % Portlandzement durch NT-BZK (AP 3-2) bei gleichzeitiger Zugabe von bis zu 10 % Mehl aus Altporenbeton war im Kleinversuchsmaßstab ohne Einbußen bei den Materialeigenschaften möglich.

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt den Meilenstein

- M = Abschluss Machbarkeitsstudie, Prototyp(en) im Labormaßstab

#### **2.1.4.4 AP 3-4: Upscaling (Großtechnikum) von Rezepturen mit Sekundärporenbeton mit bzw. ohne NT-BZK**

##### **1. Versuche mit Sekundärporenbeton und ohne NT-BZK**

Die grundlegenden Eigenschaftskennwerte für mit hohen Mehlanteilen hergestellten Porenbeton wurden in AP 3-1 ermittelt. Für weiterführende Versuche wurden ausgewählte Rezepturen im Großtechnikum der Xella T&F mittels Hochskalierung auf typische Produktionsvolumina ( $5 \text{ m}^3$ ) reproduziert. Dafür wurden Rezepturen einer Rohdichte von  $300\text{--}350 \text{ kg/m}^3$  (PP2-0,35) mit Zugabemengen von 10, 20 und 25 M.-% Mehl bzw. Rezepturen der Rohdichte  $500\pm 50 \text{ kg/m}^3$  (PP4-0,50/-0,55) mit Mehlanteilen von 20, 30 und 40 M.-% Mehl hergestellt. Auch hier mussten bei Rezepturen mit mehr als 20 M.-% Mehlanteil die Wasserzugabe erhöht werden, um ausreichende Fließfähigkeit der Rohstoffmischung zu gewährleisten. Alle Rezepturen waren gießtechnisch problemlos umzusetzen. Rezepturanpassungen waren somit nicht erforderlich.

Mit den dargestellten Materialmengen sollte weiterführend untersucht werden, welche Eigenschaften das Mehl auf die mechanischen und hygrischen Produkteigenschaften hat. Darüber hinaus sollte geklärt werden, ob sekundärer Porenbeton während der Dampfhärtung chemisch reaktiv ist und wie sich das Porenbetonmehl in die gebildete Feststoffmatrix integriert. Untersucht wurden Druckfestigkeit, Trockenrohddichte, Zugfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, Biegezugfestigkeit, Dauerstandfestigkeit, hygrisches Schwinden, Sorptionsfeuchte, kapillare Wasseraufnahme, Frost-/Tau-Widerstand sowie chemische und mineralogische Zusammensetzung. Darüber hinaus wurden elektronenmikroskopische Untersuchungen an der Feststoffmatrix durchgeführt.

Bei einer Rohdichte von  $300\text{--}350 \text{ kg/m}^3$  war die Zugabe von Porenbetonmehl bis zu 25 M.-% möglich, ohne normative oder Xella-interne Grenzwerte zu verletzen: Trockenrohddichte und die Druckfestigkeit erfüllten die deklarierten Werte entsprechend der Leistungserklärung. Die ermittelten Werte entsprachen den Vorgaben für Mauersteine der Kategorie I gemäß DIN EN 771-4 bzw. DIN 20000-404.

Demgegenüber zeigte sich für Porenbeton mit einer Rohdichte von  $500 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ , dass die Zugabemenge von Porenbetonpulver auf maximal 20 M.-% begrenzt werden muss.

Mineralogische Untersuchungen zeigten, dass während die Mineralphasenzusammensetzung von Porenbetonmehl während der Hydrothermalbehandlung konstant bleibt – das Mehl ist chemisch inert. Demgemäß lag auch die Mineralphasenzusammensetzung im erwarteten Bereich und war vergleichbar mit Standard-Porenbeton. Elektronenmikroskopische Untersuchungen zeigten, dass Porenbetonmehl im Produktionsprozess vollständig in die neu gebildete Feststoffmatrix integriert wird.

Auf Basis von AP 3-4 wurde Xella-intern festgelegt, dass Rezepturen mit bis zu 25 M.-% Mehlanteil (Rohdichte 300–350 kg/m<sup>3</sup>) bzw. 20 M.-% (Rohdichte 500±50 kg/m<sup>3</sup>) material- und anwendungstechnisch grundsätzlich als sicher angesehen werden müssen. Generische Basisrezepturen wurden als neue Produktkategorie in Xella's Freigaberichtlinie aufgenommen, und Produktionsaufnahmen in den Werken unterliegen dem regulären Freigabeprozess. Dieser beinhaltet die Prüfung von Rohdichte, Druckfestigkeit, hygri-schem Schwinden, Sorptionsfeuchte, Zugfestigkeit (für Rohdichten ≤ 350 kg/m<sup>3</sup>), chemischer Zusammensetzung und mineralogischem Phasenbestand. Die übliche Gesamtdauer der Freigabeprüfungen beträgt 12 Wochen.

Die Validierung von in AP 3-1 entwickelten Rezepten mittels Hochskalierung im Großtechnikum der Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft wurde somit in AP 3-4 erfolgreich abgeschlossen.

## **2. Versuche mit Sekundärporenbeton und mit NT-BZK**

Für einen Großversuch zum Ersatz von Portlandzement durch NT-BZK wurden 100 kg NT-BZK benötigt. Da diese Materialgrößenordnung beim Projektpartner KIT-ITC nicht im Labormaßstab dargestellt werden konnte, wurde Material aus einem Testbrand zur Verfügung gestellt, der im Vorfeld des Projektes REPOST bei der Firma IBU-Tec in Weimar durchgeführt wurde. Als Silikatquelle wurde ein Abbruchbeton verwendet, der mit Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> als Fließmittelkomponente vermahlen und mit CaCO<sub>3</sub> auf ein Verhältnis von C/S = 2 abgemischt wurde (siehe Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die Substitutionsrate OPC/NT-BZK = 25 %. Darüber hinaus enthielt die Rezeptur eine Anteil von 20 M.-% Porenbetonmehl. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Mehl aus Altporenbeton, wurde für diesen Versuch auf frisches Porenbetonmehl zurückgegriffen.

Die Herstellung von 5 m<sup>3</sup> Porenbeton der Güteklasse PP2-0,35 im Großtechnikum der Xella T&F verlief gießtechnisch ohne Probleme. Gießviskosität, Vergusstemperatur, maximale Blocktemperatur und Treibvolumen der Versuchsmischung unterschied sich lediglich hinsichtlich einer geringfügig verzögerten Frühfestigkeitsentwicklung von

Referenzwerten. Dennoch war die zum Entschalen und Schneiden erforderliche Festigkeit nach einer unkritischen Standzeit von 3 Stunden erreicht.

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt den Meilenstein

- M = Abschluss Rezepturanpassungen

#### **2.1.4.5 AP 3-5 und AP 3-6: Testproduktion in ausgewählten Xella-Werken, Produktionsfreigabe und -aufnahme**

Die Testproduktion im Werk Freistett mit einer Rezeptur mit einem Porenbetonmehl-Anteil von 17,5 M.-% verlief ohne Beanstandung (AP 3-5). Ein höherer Mehlannteil war aufgrund der im Werk Freistett begrenzten Wiegekapazität für Mehl nicht möglich. Die produzierten Plansteine PP2-0,35 erfüllten alle normativen und Xella-internen Vorgaben. Die Produktionsfreigabe und -aufnahme erfolgte im Juni 2023 (AP 3-6).

Weiteres Material aus Probeproduktionen der Xella Porenbetonwerke in Brück, Schrobhausen, Rotenburg/Wümme und Wedel befindet sich derzeit im internen Freigabeprozess.

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt die Meilensteine

- M = Abschluss der Werksversuche, Bereitstellung einer Startrezeptur für die Produktion
- M = Abschluss der Probeproduktion, Xella-interne Produktfreigabe

### **2.1.5 AP 4: Kalksandstein mit Mehl aus Altporenbeton**

#### **2.1.5.1 AP 4-1: Rezepturentwicklung (Kleintechnikum)**

Zielstellung war die Herstellung eines Kalksandsteins mit Mehl aus Altporenbeton, der die Anforderungen an die Druckfestigkeitsklasse (SFK) 12 in den Rohdichteklassen 1,8 oder 2,0 erfüllt. Im Kleintechnikum der Xella T&F wurden dazu vier Versuchsreihen mit

in Summe 45 Rezepturvarianten durchgeführt. Die für die Kalksandstein-Herstellung benötigten Ausgangsstoffe Natursand und Kalk bzw. Kalkhydrat wurden aus den beabsichtigten zukünftigen Produktionswerken Colbitz und Eisendorf bereitgestellt. Die Auswahl der beiden Werke erfolgte in Abstimmung mit der Produktionssteuerung der Xella Deutschland GmbH.

#### **2.1.5.2 AP 4-2: Testproduktion in ausgewählten Xella-Werken**

Im Oktober 2021 wurden im Xella Granulatwerk Rotenburg 12 t Porenbetonmehl aus Altporenbeton von Otto Dörner hergestellt (s. AP 1-4). Intern und extern durchgeführte Schadstoffanalysen (siehe Abschnitt 2.1.2.3) und Fremdkörperanalysen waren ohne Beanstandung, sodass das Produkt für die Durchführung von Werksversuchen an den Standorten Colbitz und Eisendorf freigegeben wurde. Aufgrund externer (COVID-19) und interner Umstände (fehlende Versuchskapazitäten in den Kalksandsteinwerken aufgrund hoher Produktionsauslastung) wurde die für 2020 geplante Rezepturvalidierung bzw. -optimierung mehrfach verschoben und war letztlich im Rahmen der Projektbearbeitung nicht mehr möglich.

Der Meilenstein

- M = Abschluss der Werksversuche, Bereitstellung einer Startrezeptur für die Produktion

wurde nicht erfüllt.

#### **2.1.5.3 AP 4-3: Produktionsfreigabe und -aufnahme in ausgewählten Xella-Werken**

Der Abschluss von AP 4-3 war gemäß Projektplanung terminiert für 2022. Da die Testproduktion in AP 4-2 nicht wie geplant durchgeführt und abgeschlossen werden konnte, konnte keine Produktionsfreigabe und -aufnahme erfolgen.

Der Meilenstein

- M = Abschluss der Probeproduktion, Xella-interne Produktfreigabe

wurde nicht erfüllt

## **2.1.6 AP 6: Systemanalyse und techno-ökonomische und ökologische Bewertung (KIT-IIP)**

### **2.1.6.1 AP 6.1: Integrierte optimierende Standort- und Kapazitätsplanung mit einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der zugehörigen Logistik**

#### **1. Analyse des regionalen Porenbeton-Abfallaufkommens, sowie Recherchen zu Marktinformationen (Rohstoffpreise, Nachfragen, Prognosen, etc.)**

In diesem Teilarbeitspaket wurden Recherchen von Veröffentlichungen und Statistiken zum derzeitigen Bestand an Porenbeton in Deutschland, sowie zum derzeitigen und zukünftigen Abfallaufkommen von Porenbeton in Deutschland durchgeführt. Um zukünftige Abfallmengen an Porenbeton aus Rückbau und Abbruch abzuschätzen, wurden entsprechende Methoden entwickelt, auf Deutschland angewandt und die Ergebnisse veröffentlicht [14, 15]. In den wissenschaftlichen Veröffentlichungen wurden mittels statistischer Produktionsdaten die Porenbeton-Produktion in der BRD und DDR seit 1950 und im wiedervereinigten Deutschland seit 1990 bestimmt. Darauf aufbauend wurde eine Abschätzung der vergangenen und eine Prognose der zukünftigen Porenbeton-Nachfrage auf Basis der Bautätigkeit durchgeführt. Ebenso wurde eine Methode zur Abschätzung des vergangenen und eine Prognose des zukünftigen, regionalisierten Aufkommens an Altporenbeton aus dem Abbruch und Rückbau von Gebäuden entwickelt. Diese basiert auf der Porenbeton-Produktion und aus der Literatur abgeleiteter Lebensdauerfunktionen für Gebäude. Anhand dessen wurde die regionale Verteilung des Porenbeton-Aufkommens deutschlandweit auf Landkreisebene jährlich bis 2050 ermittelt. Das Ergebnis dient als Grundlage für die folgende Standort- und Kapazitätsplanung (AP 6-1, Punkt 4).

Die Studien zeigen, dass die Mengen an Altporenbeton in Deutschland zu Beginn des 21. Jahrhunderts erheblich zu steigen beginnen und voraussichtlich die nächsten Jahrzehnte weiter stark ansteigen werden. Bis 2050 wird erwartet, dass die Menge an Altporenbeton im Vergleich zu 2020 voraussichtlich um den Faktor 3,5 von 1,2 Mio. m<sup>3</sup> auf 4,2 Mio. m<sup>3</sup> zunehmen wird. Der Gesamtbestand an Porenbeton in Deutschland (kumulierte Produktion abzüglich der kumulierten Menge an Altporenbeton) beträgt im Jahr 2020 etwa 226 Mio. m<sup>3</sup> und könnte im Jahr 2040 mit 249 Mio. m<sup>3</sup> sein Maximum erreichen. Die Ergebnisse des entwickelten Modells wurden mit zwei Validierungsansät-



zen verglichen: eine bestandsbezogene Validierung, die einen Datenpunkt ergab, sowie eine abfallbezogene Validierung, die vier Datenpunkte lieferte. Es wurde festgestellt, dass das Modellergebnis zwischen diesen fünf aus der Literatur abgeleiteten Datenpunkten liegt und somit angemessen erscheint. Außerdem wurde eine Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass insbesondere die angenommene Lebensdauer von Gebäuden die höchste Sensitivität aller untersuchten Parameter aufweist. Die hohe Sensitivität ist auf den starken Anstieg der Aufkommen an Altporenbeton zurückzuführen, der je nach Lebensdauer schneller oder langsamer stattfindet. Bei konstantem Aufkommen würde die Sensitivität der Ergebnisse hinsichtlich der Gebäude-Lebensdauer vermutlich deutlich geringer ausfallen. Zudem zeigt auch eine Variation des Anteils von Porenbeton in Wohn-/Nichtwohngebäuden eine signifikante Veränderung des Altporenbetonvolumens pro Jahr. Das lässt sich mit der längeren Lebensdauer von Wohngebäuden im Vergleich zu Nichtwohngebäuden begründen, sodass auch diese Sensitivität indirekt auf die Lebensdauer-Sensitivität zurückzuführen ist.

Die Ergebnisse der Abschätzung des regionalen Aufkommens auf Landkreisebene zeigen zudem eine signifikante Korrelation zwischen den Standorten der Porenbetonproduktionsanlagen und der erwarteten Menge an Altporenbeton. So sind bspw. Porenbetonwerke in unmittelbarer Nähe einiger deutscher Großstädte, die besonders hohe vorhergesagte Altporenbetonmengen aufweisen, zu finden. Beispiele sind Berlin, Hamburg, München, Bremen und Hannover. Ähnliches gilt für die Regionen um Köln, das Emsland und die nördliche Hälfte Baden-Württembergs um Stuttgart. Insgesamt werden besonders hohe Mengen an Altporenbeton in Norddeutschland und Baden-Württemberg erwartet.

Da im europäischen Abfallkatalog ebenfalls kein Porenbeton-spezifischer Code und daher keine entsprechende Abfallstatistik vorhanden ist, wurde eine ähnliche Aufkommensanalyse für Altporenbeton für die Aggregationsebene Europa durchgeführt und veröffentlicht [16]. Dabei wurde das erwartete Altporenbeton-Aufkommen auf nationaler Ebene ermittelt. Hierfür wurden die gleiche Modellannahmen bzgl. der Lebensdauer von Wohn- und Nichtwohngebäuden verwendet. Allerdings ist kritisch anzumerken, dass die Lebensdauern von Gebäuden in Europa sich deutlich stärker unterscheiden können als in Deutschland, bspw. aufgrund der unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse, der Bauweisen/Baukultur, oder der Nutzung der Gebäude. Aufgrund der unterschiedlichen Datenverfügbarkeit in europäischen Ländern basieren die Länderprognosen insgesamt auf drei verschiedenen Ansätzen (sortiert nach abnehmender Datenverfügbarkeit):

- historische Produktionsdaten und Gebäudelebensdauer (wie zuvor für Deutschland ausführlich erläutert);
- aktuelle Marktgröße und durchschnittliches Altporenbetonaufkommen relativ zur Marktgröße;
- geschätzte aktuelle Marktgröße und durchschnittliches Altporenbetonaufkommen relativ zur Marktgröße.

Neben Deutschland wurde auch für das Vereinigte Königreich der erste Ansatz gewählt, da historische Produktionsdaten vorhanden sind. Die Schätzung des zukünftigen Altporenbetonaufkommens auf Basis der aktuellen Marktgröße und des durchschnittlichen Altporenbetonaufkommens relativ zur Marktgröße (zweiter Ansatz) wurde für die Länder Österreich, Belgien, Italien, Tschechien, Dänemark, Ungarn, Norwegen, Niederlande, Polen, Russland, Slowakei und Schweden durchgeführt. Ergebnisse für alle anderen europäischen Länder sind mit dem dritten Ansatz ermittelt worden. Die Resultate zeigen, dass neben Deutschland insbesondere in Russland, Polen, dem Vereinigten Königreich und der Ukraine mit hohem Altporenbetonaufkommen zu rechnen ist. Zudem ist in ganz Europa der Trend des starken Anstiegs der Aufkommen in den nächsten Jahrzehnten ebenfalls erkennbar. Das erwartete Volumen an Altporenbeton steigt allein von 2020 bis 2030 von gut 12 Mio. m<sup>3</sup> auf fast 22 Mio. m<sup>3</sup>.

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt den Meilenstein

- M = Analyse Aufkommen

### **2. Recherche alternativer Verwertungsoptionen für Porenbetonbruch**

In diesem Teilarbeitspaket wurde eine Recherche der wissenschaftlichen Veröffentlichungen zur Verwertung von Porenbetonbruch, sowie eine systematische Recherche von in der Praxis genutzten Verwertungsmöglichkeiten von Porenbetonbruch durchgeführt. Die Vollständigkeit der Rechercheergebnisse wurde durch die Projektpartner validiert. Die Auswertung der Literatur zeigt, dass derzeit die direkte Wiederverwendung von alten Porenbeton-Mauersteinen aufgrund der hohen Kosten eines vorsichtigen Rückbauprozesses [17] sowie begrenzter Einsatzmöglichkeiten aufgrund höherer Anforderungen (z.B. beim Wärmeschutz) in der Praxis nicht möglich ist. Die bestehenden

Verwertungsmöglichkeiten setzen daher bei gebrochenem Altporenbeton an. Sie können in *closed-loop* und *open-loop* Recycling-Möglichkeiten unterteilt werden.

*Closed-loop* Recycling umfasst dabei die Substitution von Primärressourcen der Porenbetonproduktion selbst, sodass ein tatsächlich geschlossener Ressourcen-Kreislauf innerhalb einer Wertschöpfungskette entsteht. Konkret kann der Einsatz der Primärmaterialien Sand, Zement, Kalk und Anhydrit in der Porenbetonproduktion um einen gewissen Anteil reduziert werden (abhängig vom konkreten Porenbeton-Produkt, insbesondere von der Dichteklasse, siehe AP 3). Ebenfalls möglich ist die Herstellung von Belitzementklinker aus Altporenbeton (siehe AP 2), der wiederum primären Zement in der Porenbetonproduktion substituieren kann.

*Open-loop* Konzepte hingegen bieten darüber hinaus noch einige weitere Optionen zur Verwertung von Porenbetonbruch. Dazu gehört der mögliche Einsatz von Porenbetonmehl (Korngröße < 1 mm) als Füllstoff oder Zusatzmaterial in Beton [17], zur Herstellung von Leichtmörtel [18] sowie in Kombination mit Porenbeton-Granulat (Korngröße > 1mm) in Estrichen als Ersatz für Sand [19] und in Leichtbeton [18]. Schließlich kann Porenbeton-Granulat auch als Grundlage für Beton ohne feine Zuschläge dienen, der beispielsweise für Schalungssteine genutzt werden kann [17].

Verwertungsmöglichkeiten außerhalb des Bausektors umfassen u.a. die Methanemissionsminderung in Deponien, indem Porenbeton-Granulat eine Lebensgrundlage für methanoxidierende Bakterien bildet [20], als Filtermaterial für phosphorhaltige Abwässer [21] sowie als Düngemittel [22, 23]. Zudem wird Porenbeton-Granulat in der Praxis als Tierstreu oder Chemikalienbinder genutzt. Aufgrund mangelnder vergleichbarer Primärprodukte wurden diese Recyclingoptionen jedoch in der vergleichenden Analyse [24] nicht weiter betrachtet und nicht mit in die Bilanzierung im Rahmen der ökologischen Analyse aufgenommen (siehe nächster Punkt).

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt den Meilenstein

- M = Analyse alternative Verwertung

### **3. Techno-ökonomische und ökologische Analyse alternativer Verwertungsoptionen für Porenbetonbruch**

Als Basis der techno-ökonomischen und ökologischen Analyse dienen die Erkenntnisse des Meilensteins „Analyse alternative Verwertung“, bei dem sämtliche Recyclingmöglichkeiten recherchiert wurden. Grundlage der ökologischen Analyse ist das Heranziehen der Rezepturen der Recyclingprodukte inklusive der Feststellung, welche Anteile an Altporenbeton in den jeweiligen Produkten recycelt werden kann. Zudem wurde die Analyse um Rezepturen des Projektpartners Xella unter Nutzung von Altporenbeton in der Porenbetonproduktion erweitert. Für die *closed-loop* Herstellung neuer Porenbeton-Steine unter Einsatz von Recyclingmaterial wurden in Abstimmung mit den Projektpartnern die in den anderen Arbeitspaketen entwickelten Rezepturen herangezogen. Dies beinhaltet auch Szenarien in Form von unterschiedlicher Höhe des Einsatzes von Recyclinggut (= Substitutionsraten) und dem Herstellen von Porenbeton-Steinen unterschiedlicher Dichte. Damit ein Vergleich sämtlicher Recyclingmöglichkeiten untereinander und mit der Deponierung hinsichtlich ökologischer Kriterien möglich ist, wurde zudem ein passender Ökobilanzierungs-Ansatz erarbeitet, durchgeführt und veröffentlicht [24, 25]. Kernelemente dieses Ansatzes ist die Fokussierung auf 1 kg Altporenbeton als funktionelle Einheit (Basis für die Normierung der Ergebnisse), das Ausklammern von Aufwänden aus der vergangenen Produktion und Nutzung des nun als Altporenbeton anfallenden Materials („*zero burden approach*“ [26]) und das Gewähren von Gutschriften für durch das Recyclingmaterial eingesparte primäre Ressourcen („*avoided burden approach*“ [26]). Dabei wurden neben der Gesamtauswirkung auf den Klimawandel zudem die Auswirkungen auf die Versauerung des Süßwassers und des Bodens, die Ökotoxizität des Süßwassers, die Eutrophierung des Süßwassers, die Gesundheitsauswirkungen auf Menschen (krebserregend), die Gesundheitsauswirkungen auf Menschen (nicht krebserregend), den Abbau der Ozonschicht, die photochemische Ozonbildung sowie auf den fossilen Ressourcenabbau untersucht. Die Ergebnisse der durchgeführten Ökobilanz zeigen, dass die unterschiedlichen Recyclingoptionen im Vergleich zur aktuell durchgeführten Deponierung bei fast allen Umweltauswirkungen signifikant besser dastehen. So kann beispielsweise durch den Einsatz von Altporenbeton in der Porenbetonherstellung bei den derzeit technisch möglichen und erprobten Einsatzmengen bis zu 0,5 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro kg Altporenbeton im Vergleich zur Deponierung eingespart werden. Dies ist insbesondere auf die mit dem Altporenbeton-Einsatz einhergehenden Reduktion der Primärrohstoffe zurückzuführen. Höchste Einsparungen lassen sich erreichen, wenn Zement oder Branntkalk eingespart werden können, da diese beiden Primärmaterialien einen sehr hohen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck haben. Weitere vorteilhafte Recyclingoptionen sind die Herstellung von Leichtmörtel, Leichtbeton und Schalungssteinen aus Grobbeton. Bei solchen Schalungssteinen kann primärer Blähton durch Altporenbeton-Granulat substituiert werden, was zu einer signifikanten Einsparung von 0,42 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro kg Altporenbeton führen kann. Insgesamt sind durch Altporenbeton-Recycling Einspa-

rungen im Vergleich zur Deponierung in Höhe von bis zu 7 MJ fossile Ressourcen, 0,005 mol H<sup>+</sup>-Äquivalenten (Versauerung), 0,17 CTU (Süßwasser-Ökotoxizität), 0,2 g P-Äquivalenten (Süßwasser-Eutrophierung),  $5,2 \times 10^{-9}$  CTUh (Gesundheitsauswirkungen auf Menschen (krebserregend)),  $4,4 \times 10^{-8}$  CTUh (Gesundheitsauswirkungen auf Menschen (nicht krebserregend)),  $2,5 \times 10^{-5}$  g CFC-11-Äquivalenten (Abbau der Ozonschicht) und 1,6 g NMVOC-Äquivalenten (photochemische Ozonbildung) möglich.

Die ökobilanzielle Analyse der ebenfalls im Projekt untersuchten Herstellung von Dicalciumsilikat (Belitzementklinker) aus Altporenbeton zur weiteren Verwendung in unterschiedlichen Bauprodukten (u.a. Porenbeton) wurde gemeinsam mit den Projektpartnern durchgeführt und befindet sich aktuell im Veröffentlichungsprozess. Der Aufwand für die Verarbeitung und den Transport von Altporenbeton fällt relativ gering aus. Am stärksten werden die Ergebnisse durch den Energieaufwand der Herstellung des Belitzementklinkers aus Altporenbeton beeinflusst. Daher wurden bei der Ökobilanzierung unterschiedliche Szenarien der Energiebereitstellung betrachtet: elektrischer Strom mit dem derzeitigen deutschen Energiemix, elektrischer Strom aus 100% erneuerbaren Quellen, Erdgas und Oxyfuel-Verbrennung. Erwartungsgemäß weist die Verwendung von erneuerbarem Strom zur Energieversorgung eines Drehrohrofens die geringsten Auswirkungen für alle betrachteten Szenarien auf. In diesem Fall beträgt das Treibhauspotenzial der Herstellung von Belitzementklinker aus Altporenbeton lediglich 0,40 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kg. Dieser Wert liegt deutlich unter dem Treibhauspotential von primärem Portlandzement (0,88 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kg), der üblicherweise auch in der Porenbetonproduktion eingesetzt wird. Bei einer 50 %igen Substitution von Portlandzement mit Belitzement in der Porenbetonproduktion können deshalb Einsparungen von bis zu 0,76 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kg Altporenbeton erreicht werden. Die weiteren Szenarien stehen gegenüber der Nutzung von 100 % erneuerbarem Strom deutlich schlechter da, jedoch können nach wie vor Einsparungen in der Porenbetonproduktion im Vergleich zur reinen Nutzung von Portlandzement verzeichnet werden. Die höchste Einsparung bei den übrigen Szenarien ist bei Belitzementherstellung mit Oxyfuel-Verbrennung (0,34 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kg Altporenbeton) zu erreichen, gefolgt von der Erdgas-Befuerung und dem Strommix.

Die ökonomische Analyse des Porenbeton-Recyclings basiert auf den für das Recycling benötigten Schritten und Maschinen, um die Gesamtkosten des Prozesses zu ermitteln. Die Berechnung der Gesamtkosten für das Altporenbeton-Recycling und die Belitproduktion folgt der Methodik von [27], die die Gesamtkosten in die Kategorien variable Kosten, Fixkosten, Gemeinkosten und allgemeine Kosten aufteilen. Variable Kosten

beinhalten dabei u.a. Arbeitskosten, Energie und Wartung, wo hingegen die Fixkosten Positionen wie Annuitätenzahlungen (Zins und Tilgung/Abschreibung) für die Investition in das Errichten der Recyclinganlage, sowie Steuern und Versicherungen berücksichtigen. Nach Auswertung der techno-ökonomischen Analyse liegen die Gesamtkosten für ein Recyclingwerk für die Aufbereitung von Altporenbeton (ohne Belitproduktion) bei ausreichend hoher Inputkapazität (ca. 25.000 t/a) unterhalb der durchschnittlichen Deponiegebühren für Altporenbeton in Deutschland von 100 €/t. Unterschiedliche Kapazitäten des Recyclingwerks können die erwarteten Kosten aufgrund von Skaleneffekten deutlich beeinflussen. So könnten die Aufbereitungskosten für Altporenbeton bei sehr kleinen Anlagen (unter 10.000 t/a) die durchschnittlichen Deponiegebühren auch deutlich übersteigen. Kostentreiber sind dabei insbesondere die Kosten für Arbeit, Strom, Wartung und Overhead, sowie die Annuitätzahlungen. Die variablen Kosten sind mit einem Beitrag von ca. 50 % die Kostenkategorie mit dem größten Anteil an den Gesamtkosten. Den Kosten gegenüber stehen potentielle Einnahmen durch den Verkauf der Recycling-Produkte. Aufgrund eines bisher nicht existenten Markts für Recyclingkörnungen aus Altporenbeton ist der genaue Erlös nicht zu ermitteln. Es lässt sich lediglich ein möglicher Preis von etwa 10 €/t auf Basis anderer Recyclingprodukte aus Beton oder ähnlichen Baustoffen vermuten. Das Recycling von Altporenbeton erscheint somit – insbesondere aufgrund hoher Deponiegebühren – auch aus ökonomischer Sicht sinnvoll. Eine wissenschaftliche Veröffentlichung dieser Ergebnisse der ökonomischen Analyse befindet sich aktuell noch im Veröffentlichungsprozess. Wichtige Vorarbeiten und Recherchen für die finale Analyse wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit geleistet.

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt den Meilenstein

- M = techno-ökonomische Analyse aller Verwertungsoptionen

#### **4. Integrierte, optimierende Standort- und Kapazitätsplanung sowie Logistikoptimierung (zentrale versus dezentrale Verwertung)**

In diesem Teilarbeitspaket wurde ein mathematisch-theoretisches Optimierungsmodell entworfen, um eine optimierende Standort-, Kapazitäts- und Logistikplanung für ein Altporenbeton-Recycling-Netzwerk durchführen zu können. Das entwickelte mathematische Modell berücksichtigt mehrere Verarbeitungsschritte des Altporenbetons, Verarbeitungseffizienzen der technischen Anlagen, Kapazitätsbeschränkungen (hierbei werden unterschiedliche Szenarien genutzt, siehe Meilenstein M = Szenariendefinition), die

Wahlmöglichkeit unterschiedlicher Standortgrößen, fixe und variable Kosten für Verarbeitung und Transport, Angebotsmengen (basierend auf den Ergebnissen der Aufkommensanalyse, vgl. Meilenstein M = Analyse Aufkommen) und Bedarfsmengen an Recyclingmaterial an Standorten von Porenbetonwerken. Zudem werden auch die Ergebnisse aus der techno-ökonomischen und ökologischen Analyse als Inputdaten genutzt. Damit stellt das Modell ein potentiell Recyclingnetzwerk für Porenbeton realistisch dar.

Dieses Modell wurde mittels der Programmiersprache Python implementiert und kann mit dem mathematischen Solver IBM CPLEX gelöst werden. Das Modell wurde sowohl für die Optimierung eines deutschen als auch eines europäischen Recyclingnetzwerks für Altporenbeton herangezogen. Zur Entwicklung des mathematischen Modells, dem Finden einer geeigneten Programmiersprache und eines geeigneten Solvers und der Programmierung wurden insgesamt 2 Masterarbeiten, 3 Bachelorarbeiten und ein Seminar mit 6 Studierenden durchgeführt.

Die Ergebnisse des kostenoptimierten europäischen Recyclingnetzwerks wurden auf einer internationalen wissenschaftlichen Konferenz vorgestellt und veröffentlicht [28]. Sie zeigen, dass für das Jahr 2020 viele kleinere Recyclinganlagen (46 Anlagen im Optimum) gegenüber wenigen größeren (eine Anlage im Optimum) bevorzugt werden, um die Transportwege zu verkürzen. Allerdings wurden in diesem Anwendungsfall auch nur zwei Kapazitäten (100.000 t/a und 200.000 t/a berücksichtigt). Die Platzierung der Anlagen führt zu einem dezentralen Netzwerkdesign, welches auf eine Kosteneinsparung durch kürzere Transportwege abzielt. Länder und Regionen mit geringeren Altporenbetonmengen, wie Spanien, Frankreich, Italien und Südosteuropa, haben in der optimalen Lösung auch nur ein paar wenige Recyclinganlagen. Hier verarbeitet eine kleine Recyclinganlage Abfälle aus mehreren Regionen, wodurch sich die Sammelgebiete auf bis zu 400 km vergrößern können. Im Gegensatz dazu weisen Regionen mit hohen Mengen an Altporenbeton, wie beispielsweise im Vereinigten Königreich, Deutschland, Polen, der Tschechischen Republik, der Slowakei und Rumänien, ein dichteres Netz an Recyclinganlagen auf, deren Altporenbeton-Sammelgebiete folglich eher klein ausfallen. Basierend auf der europäischen Aufkommensprognose an Altporenbeton für die zukünftigen Jahre wurde das Modell des Recycling-Netzwerk bis inkl. 2050 optimiert. Es wird ersichtlich, dass durch den deutlichen Anstieg der Altporenbetonmenge von 4.645 kt im Jahr 2025 auf voraussichtlich 11.010 kt im Jahr 2050 für ganz Europa sich auch das kostenoptimierte Recyclingnetzwerk über die Zeit deutlich ändern wird. Zum einen wird bis zum Jahr 2050 die Anzahl an Recyclinganlagen deutlich anwachsen. Zum anderen wird aufgrund des starken Anstiegs an Altporenbetons in Polen und Rumänien die Zahl der großen Recyclinganlagen dort deutlich zunehmen, um die anfallenden Mengen bearbeiten zu können. Das Grunddesign wird jedoch nach wie vor eine dezentrale

Struktur aufweisen und die Transportdistanzen bleiben zumeist sehr kurz. Überdies beträgt die deponierte Menge an Altporenbeton im optimierten Recyclingnetzwerk stets weniger als 3 %, was nochmals zeigt, dass das Recycling von Altporenbeton ökonomisch rentabel sein kann.

Für den deutschen Anwendungsfall konnte die Modellierung des Recyclingnetzwerks nochmals präzisiert werden. Es konnte mit verfeinerten Daten und zusätzlichen Nebenbedingungen gearbeitet werden. Beispielsweise wurden der Modellierung weitere Kapazitätsklassen hinzugefügt. Auch in diesem Fall zeigt sich, dass die Transportdistanzen zumeist geringgehalten werden. Außerdem wird nur eine geringe Menge deponiert und der Großteil des Altporenbetons dem Recycling zugeführt. Aufgrund hoher Kosten der Herstellung von Belitzementklinker wird diese jedoch nicht in größerem Maßstab umgesetzt und der Fokus liegt auf der Aufbereitung des Altporenbetons zu Mehl und Granulat. Für die prognostizierten hohen Aufkommen an Altporenbeton in den nächsten Dekaden wird das optimierte Recyclingnetzwerk um einige neue Werke erweitert. Aktuell wird eine Veröffentlichung über diesen Anwendungsfall erarbeitet und zeitnah bei einer wissenschaftlichen Fachzeitschrift eingereicht.

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt den Meilenstein

- M = Modellierung Kreislaufsystem Porenbeton

### **2.1.6.2 AP 6-2: Untersuchung aktueller und möglicher Rahmenbedingungen (Szenariendefinition mit Beteiligung aller Projektpartner) und Szenarioanalyse**

#### **1. Recherche aktueller und möglicher zukünftiger technischer, ökonomischer, ökologischer oder rechtlicher Rahmenbedingungen**

In diesem Teilpaket erfolgte zu Projektbeginn als Basis der weiteren Forschungsarbeit eine Recherche relevanter DIN-Normen, relevanter EU-Verordnungen und -Richtlinien. Des Weiteren wurden wichtige Zielwerte der EU und Deutschlands sowie der Baubranche bezüglich der zukünftigen Treibhausgasemissionen recherchiert und ökonomische und ökologische Einflussfaktoren auf die Produktion und das Recycling von Porenbeton identifiziert.



Für Porenbeton existieren zahlreiche DIN-Normen, die unterschiedliche technische Anforderungen formulieren. Neben zahlreichen spezifischen Normen ist hier insbesondere die Norm DIN EN 771-4 zu nennen, die unterschiedliche Bereiche von den Ausgangsstoffen über die Maße und die Dichte des Porenbetons bis hin zu Prüfverfahren abdeckt. Die Anforderungen der DIN-Norm sind insbesondere auch von den im Forschungsprojekt entwickelten Porenbeton-Steinen mit Recyclinganteil zu erfüllen.

Auf europäischer Ebene wurde einerseits die Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung) identifiziert. Allerdings gibt es nach dieser Verordnung keine eigene Kennung für Porenbeton, was insbesondere die Arbeiten zum Meilenstein M = „Analyse Aufkommen“ notwendig gemacht hat. Andererseits wurde die Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 als relevant für das Forschungsprojekt eingestuft. In dieser Richtlinie wird gefordert, dass bei nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfällen (zu denen Porenbeton gehört) mindestens 70 % der Vorbereitung zur Wiederverwendung, dem Recycling oder der sonstigen stofflichen Verwertung zugeführt werden. Beim Porenbeton, der aktuell zum größten Teil deponiert wird, sind somit noch Anstrengungen notwendig, um diese Quote einzuhalten. Da die Deponierung momentan die übliche Behandlung von Altporenbeton darstellt, wurden ökonomische und ökologische Aspekte der Porenbeton-Deponierung ermittelt. Diese dienen als Vergleichswert für den Recyclingprozess bzw. als potentielle Gutschrift, wenn durch das Recycling eine Deponierung vermieden werden kann. Deponiegebühren für Altporenbeton weisen dabei regional starke Unterschiede auf. Im Durchschnitt kann von etwa 100 €/t ausgegangen werden. Ökologische Aspekte der Deponierung konnten aus einem entsprechenden Datensatz abgeleitet werden. Abseits von variierenden Transportaufwänden je nach Entfernung zu Deponie gibt es jedoch nur geringfügige Aufwände des Deponiebaus und -managements. Die Deponierung eines Kilogramms Altporenbeton verursacht Treibhausgasemissionen von lediglich etwa 0,01 kg CO<sub>2</sub> Äquivalenten.

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt den Meilenstein

- M = Rahmenbedingungen

## **2. Definition von wahrscheinlichen Szenarien mit Beteiligung aller Projektpartner**

Für die techno-ökonomische Analyse wurden wie zuvor beschrieben Szenarien für die geschlossene Kreislaufführung von Porenbeton definiert. Dies umfasste insbesondere die Einsatzkriterien und -mengen von Altporenbeton in der Herstellung von neuem

Porenbeton und Szenarien bei der Herstellung von Belit-Zement, bspw. unterschiedliche Feuerungsarten. Konkret werden hinsichtlich des Porenbetons drei unterschiedliche Rohdichteklassen ( $300\text{--}350\text{ kg/m}^3$  (PP2-0,35),  $450\text{--}500\text{ kg/m}^3$  (PP4-0,50) und  $500\text{--}550\text{ kg/m}^3$  (PP4-0,55) mit unterschiedlichen Produktionsrezepturen untersucht. Zudem wurde jeweils eine geringere (technisch leicht umsetzbare) sowie eine höhere (maximale) Substitution von primären Ressourcen durch Recyclingmaterial betrachtet. Diese Szenarien sind in direkter Abstimmung mit den Projektpartnern entstanden und spiegeln die im Rahmen von REPOST entwickelten Recyclingrezepturen wider.

Für die techno-ökonomische Analyse und die Modellierung des Kreislaufsystems wurden Szenarien hinsichtlich der Inputkapazität der Recyclingwerke definiert. Die Szenarien reichen von für Bauschuttrecycling relativ geringen Kapazitäten von  $10.000\text{ t/a}$  bis hin zu sehr großen Anlagen mit  $250.000\text{ t/a}$ . Die unterschiedlichen Kapazitäten ermöglichen eine differenzierte Betrachtung der Kosten des Recyclings und seiner Skaleneffekte. Außerdem wird für die Modellierung ein höherer Freiheitsgrad erreicht, was präzisere Schlussfolgerungen bei der Interpretation der Ergebnisse insbesondere hinsichtlich der Kapazitätsplanung erlaubt.

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt den Meilenstein

- M = Szenariendefinition

### 3. Szenarioanalyse

Sämtliche definierte Szenarien für die techno-ökonomische Analyse wurden bei der Ökobilanzierung berücksichtigt und ausgewertet [24, 25]. Eine Erkenntnis ist, dass eine höhere Substitution primärer Ressourcen durch Recyclingmaterial zu proportional steigenden Einsparungen führt. Ziel sollte also stets sein, die Substitution von Primärmaterial durch Recyclinggut so hoch wie möglich anzusetzen. Zudem kann Porenbeton geringerer Dichte aufgrund des höheren Anteils an Kalk- und Zement an der gesamten Inputmasse höhere Einsparungen beim Recycling verbuchen als Porenbeton höherer Dichte. Allerdings sollte festgehalten werden, dass insbesondere aufgrund des erwarteten starken Anstiegs an Altporenbeton in den kommenden Jahren und Jahrzehnten voraussichtlich Porenbeton sämtlicher Dichteklassen genutzt werden sollte, um möglichst viel Altporenbeton im geschlossenen Recyclingkreislauf unterzubringen.

Die Betrachtung der unterschiedlichen Kapazitäten von Recyclingwerken für Altporenbeton zeigt, dass Skaleneffekte sehr ausgeprägt sind und die Kosten bei größeren Anlagen deutlich sinken. Dem gegenüber steht jedoch eine steigende Transportdistanz, da größere Recyclingwerke den Altporenbeton aus einem größeren Radius um das Werk verarbeiten. Längere Transporte können zu deutlich erhöhten Kosten und auch stark zunehmenden ökologischen Auswirkungen führen – insbesondere bei Produkten und Stoffen mit geringer Wertdichte wie Bauschutt bzw. Altporenbeton. Ein Trade-off zwischen hohen Kapazitäten und möglichst geringer Transportdistanz wird in der Modellierung und Optimierung des Recyclingnetzwerks durchgeführt (siehe AP 6-1, M = Modellierung Kreislaufsystem Porenbeton)

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt den Meilenstein

- M = Szenarioanalyse

### **2.1.6.3 AP 6-3: Empfehlungen zu möglichen, ressourcenschonenden politischen Handlungsoptionen zur Systemänderung**

#### **1. Ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung**

Die ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung wurde anhand einer Ökobilanzierung in Kombination mit einer techno-ökonomischen Analyse durchgeführt. Aus dieser lässt sich ableiten, dass verschiedene Recyclingmöglichkeiten signifikant besser dastehen als die Deponierung und damit unbedingt etabliert werden sollten, um die Nachhaltigkeit im Umgang mit Altporenbeton zu verbessern. Insbesondere das Recycling im geschlossenen Kreislauf (*closed-loop*) – also die Nutzung von Altporenbeton in der Produktion von neuem Porenbeton – zeigt hohe ökologische Vorteile in verschiedenen Wirkungskategorien. Für eine bestmögliche Etablierung eines solchen Altporenbeton-Recyclings sind zunächst eine bessere Erfassung, Sammlung, Sortierung und Getrennthaltung notwendig. Dies erhöht Planungssicherheit und Produktqualität im Recycling. Zudem würde eine Information der Stakeholder über neue Recycling-Optionen hilfreich sein. Außerdem könnten finanzielle Anreize geschaffen werden. Zwar wurde gezeigt, dass sich das Altporenbeton-Recycling ökonomisch lohnen kann, jedoch gilt dies erst für Werke ab gewisser Größe und bei der Durchsetzung hoher Annahmepreise. Zuletzt sollte auch die Recyclingquoten von Altporenbeton überprüft werden, um bei Bedarf weitere Maßnahmen durchführen zu können.

Bei der Produktion von Belit aus Altporenbeton ist besonders bei Nutzung von erneuerbarem Strom zu Energiebereitstellung für den Prozess von sehr hohen ökologischen Einsparungen auszugehen. Aber auch bei konventioneller Energiebereitstellung durch Erdgas, Oxyfuel-Verbrennung oder durch den deutschen Strommix steht der Prozess noch deutlich besser da als die Deponierung. Der große Vorteil der Belitproduktion – unabhängig von der Energiebereitstellung – ist, dass die genutzte Altporenbetonmenge zusätzlich zum Recycling in der Porenbetonproduktion weiter gesteigert werden kann. Somit kann insbesondere auch den hohen Aufkommen der Zukunft besser begegnet werden. Für die hohen erwarteten Altporenbetonaufkommen der 2030er und 40er Jahre sind außerdem einige Recyclingmöglichkeiten in anderen Anwendungen notwendig, da das Aufkommen sogar die Porenbetonproduktion übertreffen wird, sollte diese auf aktuellem Niveau bleiben. Von den untersuchten Möglichkeiten zeigen sich insbesondere bei dem Recycling in Leichtmörtel, Leichtbeton und in Beton ohne feine Zuschläge deutliche ökologische Vorteile gegenüber der Deponierung. Insgesamt gibt es also ausreichend Ansätze, um Altporenbeton zu recyceln und es können signifikante Verbesserungen der Nachhaltigkeit erreicht werden.

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt den Meilenstein

- M = Nachhaltigkeitsbewertung

### **2. Ausarbeitung der Substitutionspotenziale**

Die Substitutionspotenziale von Primärressourcen kann in unterschiedlichem Ausmaß in den verschiedenen Porenbeton-Varianten umgesetzt werden. Dabei teilen sich die Anteile der relevantesten Varianten an der gesamten Porenbetonproduktion folgendermaßen auf: 45 % Porenbeton PP2-0,35, 20 % PP4-0,50 und 10 % PP4-0,55. Es können zusätzlich zum bereits innerhalb der Produktion zurückgeführten Produktionsbruch beim PP2-0,35 7 %, beim PP4-0,50 ebenfalls 7 % und beim PP4-0,55 10 % Altporenbeton eingesetzt werden. Dabei wird von hoher (maximaler) Substitution ausgegangen.

Belit kann darüber hinaus sogar bis zu 50 % des Zements in der Porenbetonproduktion aller Dichteklassen ersetzen. Zusätzlich dazu kann wie in vorherigen Abschnitten erwähnt Altporenbeton im Rahmen von weiteren Recyclingoptionen Inputressourcen anderer Produktionen ersetzen. Die möglichen Inputanteile von Altporenbeton für diese Recyclingoptionen sind um einiges höher als für das Recycling in Porenbeton und belau-

fen sich auf bis zu 61 % (Leichtmörtel), 81 % (Leichtbeton) und 36 % (Schalungsblock aus Beton ohne feine Zuschläge). Diese Angaben können jedoch aufgrund unterschiedlicher Rezepturen und unterschiedlicher Produktqualitäten und -anforderungen je nach Hersteller variieren und müssen sich erst noch bei höherskalierten Produktionsversuchen und in der Praxis beweisen.

Bei optimaler Recyclingstrategie und flächendeckender Umsetzung in Deutschland belaufen sich die potenziellen Treibhausgaseinsparungen durch das Altporenbeton-Recycling im Jahr 2022 auf mehr als 280.000 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Zusätzlich könnten Deponiekapazitäten in Höhe von knapp 1,4 Mio. m<sup>3</sup> bzw. 700.000 t eingespart werden. Entsprechend der Ergebnisse der Abschätzung des zukünftigen Aufkommens an Altporenbeton werden sich die möglichen Einsparungen in Zukunft nochmals deutlich erhöhen.

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt den Meilenstein

- M = Substitutionspotenziale

### **3. Ausarbeitung der Handlungsoptionen und Handlungsempfehlungen**

Handlungsoptionen und Handlungsempfehlungen konnten auf Basis sämtlicher Vorarbeiten abgeleitet werden. Als Fazit des Arbeitspakets zur Aufkommensanalyse kann festgehalten werden, dass die zukünftig stark steigenden Aufkommen an Altporenbeton eine zeitnahe Etablierung von Recyclingmöglichkeiten unabdingbar machen. Außer es werden Maßnahmen zur Vermeidung von Altporenbeton-Abfall ergriffen, bspw. durch eine Verringerung des Rückbaus und Erhöhung des Bauens im Bestand. Weiterhin sollte ein Abfallschlüssel für die Erfassung von Altporenbeton eingeführt werden, um die Mengen dieses Stoffstroms statistisch zu erheben.

Aus ökologischer Sicht hinsichtlich Treibhausgasemissionen und Ressourcenschonung, aber auch aus ökonomischer Sicht ist eine Deponierung der hohen zukünftig erwarteten Altporenbetonaufkommen nicht hinnehmbar. Durch ein etabliertes Recycling von Altporenbeton lassen sich signifikante CO<sub>2</sub>-Emissionen einsparen, die Umweltauswirkungen in zahlreichen anderen Wirkungskategorien reduzieren und gleichzeitig deutliche ökonomische Einsparungen verwirklichen lassen.

Um das Recycling von Altporenbeton weiter voranzutreiben, bedarf es der Fortsetzung von Erprobungen und Umsetzungen unterschiedlicher Ansätze sowie des Scaling-up der derzeit entwickelten Technologien wie der Belit-Produktion aus Altporenbeton und der Substitution von Portlandzement durch Belit. Das *closed-loop* Recycling sollte aufgrund seines hohen ökologischen und ökonomischen Nutzens ebenfalls in höher skalierten Anlagen erprobt werden, um langfristig in der Herstellung von Porenbeton etabliert zu werden. Zudem sollte auch eine Umsetzung der vielversprechendsten *open-loop* Recyclingmöglichkeiten – Leichtmörtel, Leichtbeton und Schalungsblock ohne feine Zuschläge – unter Produktionsbedingungen überprüft werden.

Die in AP 6 identifizierten Potentiale werden sich in der Praxis jedoch nur umsetzen lassen, wenn Baustoffe mit Anteil an Sekundärmaterial in der Gesellschaft nicht nur als ökologisch überlegen, sondern auch als technisch gleichwertig anerkannt werden. Öffentliche Bauvorhaben könnten hier ein wichtiger Vorreiter für eine umfassendere Akzeptanz bilden. Zudem wird die Ausbildung von Stakeholdern eine wichtige Rolle spielen. Insbesondere Architekten sollten die Vorteile des Einsatzes von Porenbeton mit Recyclinganteil dargelegt werden. Außerdem könnte das Know-How in Abbruchunternehmen bzgl. der Getrennthaltung des Bauschutts (insbesondere des Altporenbetons von anderen Gipsabfällen) und der Recycling-Möglichkeiten von Altporenbeton erhöht werden.

Dieses Teilarbeitspaket erfüllt den Meilenstein

- M = Handlungsempfehlungen

## 2.2 Zielerreichung

In Tabelle 1 werden die in den Arbeitspaketen gemäß Vorhabenbeschreibung vorgesehenen Arbeiten in Form von Teilzielen zusammengefasst und hinsichtlich ihrer Zielerreichung bewertet.

Tabelle 1: Übersicht über die Zielerreichung des Forschungsvorhabens

Arbeitspaket	Teilziel	Ziel erreicht?	Beschreibung der Arbeiten in...
AP 1-1	Sortieranlage Otto Dörner (aus gemischtem Bauschutt)	Ja	Abschnitt 2.1.2.1
AP 1-2	Separierung und Nachsortierung von Monofractionen von Baustellen	Nein	Abschnitt 2.1.2.2
AP 1-3	VERTRAULICH		
AP 1-4	Materialbereitstellung für die Projektpartner, analytische Untersuchungen, Qualitätssicherung	Ja	Abschnitt 2.1.2.3
AP 2-1	Analyse und Bilanzierung aller Stoffströme und Applikationstests	Ja	Abschnitt 2.1.3.1
AP 2-2	Prozessanpassung, Formulierung, Kalzinierung, Bereitstellung von NT-BZK für Großversuche.	Ja	Abschnitt 2.1.3.2
AP 2-3	Grobe Stoff- und Energiebilanz einer NT-BZK Anlage mit 50.000 t/a Durchsatz für unterschiedliche Betriebsweisen des Drehrohrofens	Ja	Abschnitt 2.1.3.3
AP 3-1	Rezeptentwicklung Porenbeton mit bis zu 40 M-% Porenbeton-Mehl (Kleintechnikum)	Ja	Abschnitt 2.1.4.1
AP 3-2	Entwicklung von Rezepten mit LT-BZK aus Altporenbeton	Ja	Abschnitt 2.1.4.2
AP 3-3	Zusammenführung von AP 3-1 und 3-2	Ja	Abschnitt 2.1.4.3
AP 3-4	Upscaling (Großtechnikum) von Rezepturen mit Sekundärporenbeton mit bzw. ohne NT-BZK	Ja	Abschnitt 2.1.4.4
AP 3-5	Testproduktion in ausgewählten Xella-Werken	Ja	Abschnitt 2.1.4.5
AP 3-6	Produktionsfreigabe und -aufnahme	Ja	Abschnitt 2.1.4.5
AP 4-1	Rezeptentwicklung Kalksandstein mit Mehl aus Altporenbeton (Kleintechnikum)	Ja	Abschnitt 2.1.5.1
AP 4-2	Testproduktion in ausgewählten Xella-Werken	Nein	Abschnitt 2.1.5.2
AP 4-3	Produktionsfreigabe und -aufnahme in ausgewählten Xella-Werken	Nein	Abschnitt 2.1.5.3
AP 5-1	VERTRAULICH		

AP 5-2	VERTRAULICH		
AP 5-3	VERTRAULICH		
AP 5-4	VERTRAULICH		
AP 6-1	Regionale Aufkommensanalyse von Altporenbeton, techno-ökonomische Analyse alternativer Verwertungsoptionen für Porenbetonbruch und optimierende Standort-, Kapazitäts- und Logistikplanung	Ja	Abschnitt 2.1.6.1
AP 6-2	Untersuchung aktueller und möglicher zukünftiger Rahmenbedingungen, Szenariendefinition und Szenarioanalyse	Ja	Abschnitt 2.1.6.2
AP 6-3	Ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung, Ausarbeitung der Substitutionspotentiale und Ausarbeitung von Handlungsoptionen und Handlungsempfehlungen	Ja	Abschnitt 2.1.6.3

Insgesamt wird das Gesamtziel des Verbundvorhabens, neue Optionen für eine ressourceneffiziente, qualitativ hochwertige und wirtschaftliche Wiederverwertung von Porenbetonresten aus dem Abbruch von Gebäuden, als erfüllt angesehen.

Das technische Arbeitsziel des Verbundvorhabens wird ebenfalls als erfüllt angesehen.

Das Erreichen des wissenschaftlichen Arbeitsziels wird mit den in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgelisteten Veröffentlichungen belegt. Im Rahmen des Verbundvorhabens wurde die wissenschaftliche Qualifikation eines Promovierenden ermöglicht. Daneben wurden sieben Bachelor- und Masterarbeiten betreut und erfolgreich abgeschlossen. Darin wurden folgende Themen bearbeitet:

- Entwicklung des mathematischen Modells für das Abbilden eines Recyclingkreislaufs
- Entwicklung kapazitierter und dynamischer Netzwerkmodelle am Beispiel des Porenbetonrecyclings
- Programmierung eines Netzwerkmodells für das Recycling von Porenbeton
- Kostenbewertung eines Recyclingkreislaufs für Porenbeton
- Synthese von Bindemittel aus Produktionsausschuss und Rückbaumaterial am Beispiel Porenbeton



Zusätzlich haben sechs Studierende erfolgreich an einem Seminar des Studiengangs Wirtschaftsingenieurwesen am KIT mit dem Titel “Software Challenge: Multikriterielle Standort- und Kapazitätsoptimierung in Python” teilgenommen und eigenständige Seminararbeiten verfasst. Auch in die Lehrveranstaltung „Grundlagen der Produktionswirtschaft“ (KIT Wirtschaftsingenieurwesen) sind Erfahrungen und praktische Beispiele des Verbundvorhabens eingeflossen. Sämtliche beschriebenen Forschungs- und Lehraktivitäten leisteten einen Beitrag zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses und der Hochschulforschung.

## **2.3 Zahlenmäßiger Nachweis**

Der in der Vorhabenbeschreibung angegebene Kostenrahmen wurde eingehalten. Die ursprünglich vorgesehene Zeitplanung wurde um sechs Monate überschritten. Es wurde ein gemeinsamer Antrag für eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung (bis 31.12.2022) gestellt, der bewilligt wurde.

## **2.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten ist den im vorliegenden Bericht beschriebenen Projektergebnissen zu entnehmen. Abweichungen von der ursprünglichen Meilensteinplanung betrafen Arbeitspakete 4 und 5. Die Testproduktion und Produktionsaufnahme von Kalksandsteinen mit Mehl aus Altporenbeton konnte aufgrund fehlender Kapazitäten in den in Frage kommenden Werken nicht bearbeitet werden. Bereits im Bearbeitungszeitraum 2019 wurde festgestellt, dass über die geplanten REPOST-Aktivitäten hinaus Maßnahmen erarbeitet werden müssen, um Kapazitäten für die Aufnahme von Altporenbeton bei Xella zu schaffen.

Die ursprünglich geplante „Entwicklung von Leichtbetonblöcken mit Splitt aus Altporenbeton“ wurde in Abstimmung mit dem Projektträger nicht bearbeitet.

## **2.5 Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Die wissenschaftliche Verwertung ist mit den abgeschlossenen Veröffentlichungen zu einem großen Teil erfolgt und wird mit den noch ausstehenden Veröffentlichungen fortgeführt (vgl. Abschnitt 2.7).

Nachfolgend werden die individuellen Verwertungsaussichten je Projektpartner dargelegt.

### **Otto Dörner Entsorgung GmbH**

VERTRAULICH

### **Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion**

Aus wissenschaftlicher Sicht sieht das KIT großen Nutzen in den Ergebnissen des REPOST-Verbundvorhabens. Mit Bearbeitung des Vorhabens konnte das am IIP in dessen Forschungsgruppe „Projekt- und Ressourcenmanagement in der bebauten Umwelt“ vorhandene Fachwissen zur Kreislaufwirtschaft sowie Methoden des life cycle assessment, der techno-ökonomischen Analyse und der Netzwerkmodellierung ausgeweitet werden. Insbesondere die positiven Erfahrungen aus der Zusammenarbeit mit den Projektpartnern sind eine wertvolle Motivation für die Beantragung zukünftiger Forschungsvorhaben, die auf eine industrielle Anwendung wissenschaftlicher Modelle abzielen. Mit der Erforschung neuer Ansätze bei der Porenbeton-Aufkommensabschätzung und der Entwicklung einer umfassenden Modellierung eines Recycling-Netzwerks erweitert das IIP außerdem seine Palette an Entscheidungsunterstützungswerkzeugen im Bereich des Ressourcenmanagements und der Kreislaufwirtschaft.

### **Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH**

Die erarbeiteten Rezepturen für die wichtigsten Porenbetonprodukte in Deutschland gewährleisten die sichere Einhaltung von norm- und zulassungsrelevanten Materialkennwerten unter Einsatz maximal möglicher Mengen an Altporenbeton. Insbesondere die hinsichtlich AP 3 ermittelten ökonomischen Einsparpotentiale für Primärrohstoffe bzw. deren produktionsbedingte Treibhausgasemissionen (Scope-3-Emissionen) machen die Projektergebnisse zu einem Erfolgsmodell bei Xella. Produktionsfreigaben erfolgen seit 2022 sukzessive in den deutschen und europäischen Porenbetonwerken von Xella. Simultan erfolgt der Aufbau von Lieferantennetzwerken für Altporenbeton, da der Projektpartner Otto Dörner nur Werke in Norddeutschland beliefern kann, und sich aufgrund technischer Gegebenheiten (Zerkleinerungstechnik) für jedes Werk neue Wertschöpfungsszenarien ergeben. Darüber hinaus sind abfallrechtliche Fragestellungen derzeit immer auf lokaler Ebene zu klären.

### **Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technische Chemie**

Durch die Arbeiten der Abteilung "Technische Mineralogie" des ITC gelang es aus separierten Porenbetonfraktionen NT-Belitzementklinker herzustellen, die in der Porenbetonindustrie Verwendung finden. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass sowohl  $\text{CaCl}_2$  als auch  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  geeignete Mineralisatoren für den Kalzinierungsprozess sind. Es gelang kritische lösliche Stoffe (Chlor) in stabile Mineralstrukturen zu binden. Kombinierte Analytik ermöglicht die Bestimmung der Ausbeute von CaO in Belit und anderen Produktphasen.

Die erfolgten Veröffentlichungen dienen dem KIT bzw. dem IIP und dem ITC als Ausweis seiner wissenschaftlichen Exzellenz und Leistungsfähigkeit.

Durch die erfolgreichen Arbeiten wurde mit dem Bau einer durch das Umweltministerium Baden-Württemberg im Projekt "R-Zement: CO<sub>2</sub>-arme Herstellung des Klinkerminerals Dicalciumsilikat aus Recycling - Baustoffen" geförderten Pilotanlage begonnen (L7521115. BWPLUS – Baden-Württemberg Programm, 2021-2024).

## **2.6 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Ergebnisse Dritter im Bereich Kreislaufwirtschaft von Porenbeton wurden nach Kenntnis der Autoren während der Laufzeit des Vorhabens nicht bekannt.

## 2.7 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse des Verbundvorhabens wurden von den Projektpartnern über verschiedene Kanäle veröffentlicht.

### Zeitschriftenaufsätze:

- Garbev, K., Ullrich, A., Beuchle, G., Bergfeldt, B., Stemmermann, P., 2022, Chlorellestadite (Synth): Formation, Structure, and Carbonate Substitution during Synthesis of Belite Clinker from Wastes in the presence of  $\text{CaCl}_2$  and  $\text{CO}_2$ , Minerals, 12, 1179; <https://doi.org/10.3390/min12091179>
- Steins, J. J.; Volk, R., Kreft, O., Schultmann, F., 2021, Altporenbeton aus dem Abbruch und Rückbau in Deutschland bis 2050 – eine Vorhersage, Mauerwerk 25 (4), S. 145–150. DOI: 10.1002/dama.202100009
- Steins, J. J.; Volk, R., Schultmann, F., 2021, Modelling and predicting the generation of post-demolition autoclaved aerated concrete (AAC) volumes in Germany until 2050, Resources, Conservation and Recycling, S. 105504. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105504
- Stemmermann, P.; Volk, Rebekka; Steins, J. J.; Beuchle, G., 2023, Recycling belite cement clinker from post-demolition autoclaved aerated concrete – assessing a new process. submitted to Journal of industrial Ecology
- Ullrich, K. Garbev, U. Schweike, M. Köhler, B. Bergfeldt, P. Stemmermann, 2022,  $\text{CaCl}_2$  as a Mineralizing Agent in Low-Temperature Recycling of Autoclaved Aerated Concrete: Cl-Immobilization by Formation of Chlorellestadite, Minerals, 2022, 12(9), S. 1142; <https://doi.org/10.3390/min12091142>
- Ullrich, K. Garbev, B. Bergfeldt, 2021, In Situ X-ray Diffraction at High Temperatures: Formation of  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  and Ternesite in Recycled Autoclaved Aerated Concrete, Minerals 2021, 11, S. 789. <https://doi.org/10.3390/min11080789>
- Volk, R., Steins, J. J.; Kreft, O., Schultmann, F., 2023, Life cycle assessment of post-demolition autoclaved aerated concrete (AAC) recycling options, Resources, Conservation and Recycling 188, S. 106716. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106716

- Kreft, O., Fudge, C. Walczak P., 2022, Roadmap für eine treibhausgasneutrale Porenbetonindustrie in Europa, Mauerwerk 26, H. 2, S. 77-84, <https://doi.org/10.1002/dama.202200004>

**Aufsätze in Konferenzbänden (Proceedings):**

- Steins, J. J.; Volk, R., Schultmann, F., 2022, Post-Demolition Autoclaved Aerated Concrete: Recycling Options And Volume Prediction In Europe, Ecocity World Summit 2021-22 Conference Proceedings. DOI: 10.5445/IR/1000153325.
- Steins, J. J.; Volk, R., Stallkamp, C., Schultmann, F., 2023, Designing a new recycling network for post-demolition autoclaved aerated concrete (AAC) in Europe. Presented at the conference "Sustainable built environments 2023" in Thessaloniki. In press.
- Volk, R., Steins, J. J.; Stemmermann, P., Schultmann, F., 2022, Comparison of different post-demolition autoclaved aerated concrete (AAC) recycling options, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1078 (1), S. 12074. DOI: 10.1088/1755-1315/1078/1/012074.
- Stemmermann, P., Ullrich, A., Beuchle, G., Garbev, K., Schweike, U., 2022, Belite Cement Clinker from Autoclaved Aerated Concrete Waste – a Contribution towards CO<sub>2</sub> -Reduced Circular Building Materials, International Xella Colloquium, Berlin Nov. 2022, Wiley ce/papers, DOI: 10.1002/cepa.1879
- Kreft, O., Circular economy's potential to reduce AAC carbon emissions, 2022, International Xella Colloquium, Berlin Nov. 2022, ce/papers, 5, S. 10-16, <https://doi.org/10.1002/cepa.1881>
- Kreft, O., 2023, Circular construction with AAC – recycling of an industrial hall made of Hebel elements in Munich-Puchheim, 7. International Conference on AAC, Sep. 2023, Prag, ce/papers, 2023, 6, S. 230–233, DOI: 10.1002/cepa.2215
- Stemmermann, P., Belite cement clinker from autoclaved aerated concrete waste fines with high sulfate content, 7. International Conference on AAC, Sep. 2023, Prag

**Weitere Vorträge:**

- Reddy Y. R., Beuchle, G., Stapf, D., Stemmermann, P., 2023, Circular Zero Emission Concrete: Thermodynamic Modelling of Belite Cement Clinker. Helmholtz Energy Conference. Helmholtz Gemeinschaft. Koblenz, 12.06.2023.

### 3. Literaturverzeichnis

- [1] HUNSINGER, Hans ; BEUCHLE, G. ; STEMMERMANN, Peter ; SCHWEIKE, Uwe ; WARZYCHA, K. ; GARBEV, Krassimir: *Verfahren zur Herstellung von Dicalciumsilikat*. Veröffentlichungsnr. WO 2014/019656 A1
- [2] STEMMERMANN, Peter ; HUNSINGER, Hans ; WARZYCHA, K. ; BEUCHLE, G. ; SCHWEIKE, U. ; GARBEV, Krassimir: Optimized thermal processing of belite as feedstock for hydraulic calcium hydrosilicates. In: *Ibausil 19. Internationale Baustofftagung 2015 : Tagungsbericht*, 2015, S. 899–906
- [3] ULLRICH, Angela ; GARBEV, Krassimir ; BERGFELDT, Britta: *In Situ X-ray Diffraction at High Temperatures: Formation of Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> and Ternesite in Recycled Autoclaved Aerated Concrete*. In: *Minerals* 11 (2021), Nr. 8, S. 789
- [4] ULLRICH, Angela ; GARBEV, Krassimir ; SCHWEIKE, Uwe ; KÖHLER, Michael ; BERGFELDT, Britta ; STEMMERMANN, Peter: *CaCl<sub>2</sub> as a Mineralizing Agent in Low-Temperature Recycling of Autoclaved Aerated Concrete: Cl-Immobilization by Formation of Chlorellestadite* (2022)
- [5] NEUBAUER, Jürgen: *Realisierung des Deponiekonzepts der "Inneren Barriere" für Rauchgasreinigungsrückstände aus Müllverbrennungsanlagen*. Erlangen. Dissertation. 1992
- [6] PÖLLMANN, Herbert: Immobilization of pollutants in waste disposals by forming mineral reservoirs. In: *International Congress on applied mineralogy : Proceedings*, 1991, S. 43–56
- [7] GIZIEWICZ, Karolina ; HUNSINGER, Hans: *Method for separating aluminum during calcium silicate production*. Veröffentlichungsnr. EP000003201134B1
- [8] GARBEV, Krassimir ; ULLRICH, Angela ; BEUCHLE, Günter ; BERGFELDT, Britta ; STEMMERMANN, Peter: *Chlorellestadite (Synth): Formation, Structure, and Carbonate Substitution during Synthesis of Belite Clinker from Wastes in the Presence of CaCl<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>* (2022)
- [9] HOFFMEYER, Johannes: *Energetische und techno-ökonomische Bewertung von Verfahrensvarianten der Herstellung von Dicalciumsilikat durch Kalzinierung*. Karlsruhe, Karlsruhe Institut of Technologie (KIT). Masterarbeit. 2017

- [10] BALE, C. W. ; BÉLISLE, E. ; CHARTRAND, P. ; DECTEROV, S. A. ; ERIKSSON, G. ; GHERIBI, A. E. ; HACK, K. ; JUNG, I.-H. ; KANG, Y.-B. ; MELANÇON, J. ; PELTON, A. D. ; PETERSEN, S. ; ROBELIN, C. ; SANGSTER, J. ; SPENCER, P. ; VAN ENDE, M-A.: *FactSage thermochemical software and databases, 2010–2016*. In: *CALPHAD* 54 (2016), S. 35–53 – Überprüfungsdatum 2022-06-10
- [11] REDDY YARKA REDDY, Pallavi ; BEUCHLE, Günter ; STAPF, Dieter ; STEMMERMANN, Peter: *Circular Zero Emission Concrete: Thermodynamic Modelling of Belite Cement Clinker* (Helmholtz Energy Conference). Koblenz, 12.06.2023
- [12] STEMMERMANN, Peter ; VOLK, Rebekka ; STEINS, Justus J. ; BEUCHLE, Günter: *Recycling belite cement clinker from post-demolition autoclaved aerated concrete – assessing a new process*. In: *Submitted for publication in a scientific journal* (2023)
- [13] STEMMERMANN, Peter ; ULLRICH, Angela ; BEUCHLE, Günter ; GARBEV, Krassimir ; SCHWEIKE, Uwe: *Belite cement clinker from autoclaved aerated concrete waste – A contribution towards CO<sub>2</sub>-reduced circular building materials*. In: *ce/papers* 5 (2022), Nr. 5, S. 17–26
- [14] STEINS, Justus J. ; VOLK, Rebekka ; KREFT, Oliver ; SCHULTMANN, Frank: *Altporenbeton aus dem Abbruch und Rückbau in Deutschland bis 2050 – eine Vorhersage*. In: *Mauerwerk* 25 (2021), Nr. 4, S. 145–150
- [15] STEINS, Justus J. ; VOLK, Rebekka ; SCHULTMANN, Frank: *Modelling and predicting the generation of post-demolition autoclaved aerated concrete (AAC) volumes in Germany until 2050*. In: *Resources, Conservation and Recycling* 171 (2021), S. 105504
- [16] STEINS, Justus J. ; VOLK, Rebekka ; SCHULTMANN, Frank: *Post-Demolition Autoclaved Aerated Concrete: Recycling Options And Volume Prediction In Europe*. In: *Ecocity World Summit 2021-22 Conference Proceedings* (2022). URL <https://ecocitybuilders.org/wp-content/uploads/2022/11/EWS-21-22-Proceedings.pdf> – Überprüfungsdatum 2022-12-05
- [17] GYURKÓ, Zoltán ; JANKUS, Bence ; FENYVESI, Olivér ; NEMES, Rita: *Sustainable applications for utilization the construction waste of aerated concrete*. In: *Journal of Cleaner Production* 230 (2019), S. 430–444
- [18] AYCIL, Hakan ; HLAWATSCH, Frank ; KROPP, Jörg: *Hochwertige Verwertungsmöglichkeiten für Porenbetonrezyklate [High-quality recycling possibilities for autoclaved aerated concrete recyclates]*. 2016



- [19] BERGMANS, Jef ; NIELSEN, Peter ; SNELLINGS, Ruben ; BROOS, Kris: *Recycling of autoclaved aerated concrete in floor screeds: Sulfate leaching reduction by ettringite formation*. In: *Construction and Building Materials* 111 (2016), S. 9–14
- [20] BUKOWSKI, G. ; EDEN, W. ; KUEVER, J. ; KURKOWSKI, H. ; LAU, J. ; REMESCH, M.: *Bioaktivierung von Porenbeton- und Kalksandstein-Recyclinggranulaten mit Methan oxidierenden Bakterien zur Reduktion von Methanausgasungen aus Hausmülldeponien - ein Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz – METHANOX II [Bioactivation of recycled autoclaved aerated concrete and sand-lime brick granulates with methane oxidising bacteria to reduce methane emissions from domestic waste landfills - a contribution to climate and resource protection - METHANOX II]*. Forschungsbericht Nr. 118 zum IGF-Forschungsvorhaben 16637 N [Research Report No 118 on the IGF research project 16637 N]. 2015
- [21] RENMAN, Gunno ; RENMAN, Agnieszka: Sustainable use of crushed autoclaved aerated concrete (CAAC) as a filter media in wastewater purification. In: ARM, M.; VANDECASTEELE, C.; HEYNEN, J.; SUER, P.; LIND, B. (Hrsg.): *WASCON 2012 Conference proceedings*, 2012
- [22] NIEDERSEN, Kai-Uwe ; FLICK, Gerhard ; MEMMLER, Hans-Joachim: *Porenbetonbruch als Bodenverbesserer im Landbau [Autoclaved aerated concrete breakage as soil conditioner in agriculture]*. In: *Müll und Abfall Fachzeitschrift für Behandlung und Beseitigung von Abfällen* 36 (2004), Nr. 5, S. 231–234. URL [https://www.muellundabfall.de/download/\\_sid/WMQJ-004762-FMWf/12776/mua\\_20040504.pdf](https://www.muellundabfall.de/download/_sid/WMQJ-004762-FMWf/12776/mua_20040504.pdf) – Überprüfungsdatum 2020-07-16
- [23] VOLK, J. ; SCHIRMER, P.: Bewertung der Verwendung von Porenbetonrezyklaten für die Herstellung von Bodenwertstoffen und Düngemittel [Evaluation of the use of autoclaved aerated concrete recycles for the production of soil materials and fertilisers]. In: *Tagungsband zur Fachtagung Recycling R'10 [Proceedings of the Recycling R'10 symposium]*, 2010, S. 52–53
- [24] VOLK, Rebekka ; STEINS, Justus J. ; KREFT, Oliver ; SCHULTMANN, Frank: *Life cycle assessment of post-demolition autoclaved aerated concrete (AAC) recycling options*. In: *Resources, Conservation and Recycling* 188 (2023), S. 106716. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922005493>
- [25] VOLK, Rebekka ; STEINS, Justus J. ; STEMMERMANN, Peter ; SCHULTMANN, Frank: *Comparison of different post-demolition autoclaved aerated concrete (AAC) recycling options*. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1078 (2022), Nr. 1, S. 12074

- [26] NAKATANI, Jun: *Life Cycle Inventory Analysis of Recycling: Mathematical and Graphical Frameworks*. In: *Sustainability* 6 (2014), Nr. 9, S. 6158–6169
- [27] PETERS, Max Stone ; TIMMERHAUS, Klaus D. ; WEST, Ronald E.: *Plant design and economics for chemical engineers*. 5. ed. Boston : McGraw-Hill, 2003 (McGraw-Hill chemical engineering series)
- [28] STEINS, Justus J. ; VOLK, Rebekka ; STALLKAMP, Christoph ; SCHULTMANN, Frank: *Designing a new recycling network for post-demolition autoclaved aerated concrete (AAC) in Europe*. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1196 (2023), Nr. 1, S. 12058

## PRODUKTION UND ENERGIE

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)



Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion  
Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung

---

ISSN 2194-2404

---

- Band 1** National Integrated Assessment Modelling zur Bewertung umweltpolitischer Instrumente. Entwicklung des otello-Modellsystems und dessen Anwendung auf die Bundesrepublik Deutschland. 2012  
ISBN 978-3-86644-853-7
- Band 2** Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz und Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Eisen-, Stahl- und Zinkindustrie (ERESTRE). 2013  
ISBN 978-3-86644-857-5
- Band 3** Frederik Trippe  
Techno-ökonomische Bewertung alternativer Verfahrenskonfigurationen zur Herstellung von Biomass-to-Liquid (BtL) Kraftstoffen und Chemikalien.  
ISBN 978-3-7315-0031-5
- Band 4** Dogan Keles  
Uncertainties in energy markets and their consideration in energy storage evaluation.  
ISBN 978-3-7315-0046-9
- Band 5** Heidi Ursula Heinrichs  
Analyse der langfristigen Auswirkungen von Elektromobilität auf das deutsche Energiesystem im europäischen Energieverbund.  
ISBN 978-3-7315-0131-2
- Band 6** Julian Stengel  
Akteursbasierte Simulation der energetischen Modernisierung des Wohngebäudebestands in Deutschland.  
ISBN 978-3-7315-0236-4

- Band 7** Sonja Babrowski  
**Bedarf und Verteilung elektrischer Tagesspeicher im zukünftigen deutschen Energiesystem.**  
ISBN 978-3-7315-0306-4
- Band 8** Marius Wunder  
**Integration neuer Technologien der Bitumenkalthandhabung in die Versorgungskette.**  
ISBN 978-3-7315-0319-4
- Band 9** Felix Teufel  
**Speicherbedarf und dessen Auswirkungen auf die Energiewirtschaft bei Umsetzung der politischen Ziele zur Energiewende.**  
ISBN 978-3-7315-0341-5
- Band 10** D. Keles, L. Renz, A. Bublitz, F. Zimmermann, M. Genoese, W. Fichtner, H. Höfling, F. Sensfuß, J. Winkler  
**Zukunftsfähige Designoptionen für den deutschen Strommarkt: Ein Vergleich des Energy-only-Marktes mit Kapazitätsmärkten.**  
ISBN 978-3-7315-0453-5
- Band 11** Patrick Breun  
**Ein Ansatz zur Bewertung klimapolitischer Instrumente am Beispiel der Metallerzeugung und -verarbeitung.**  
ISBN 978-3-7315-0494-8
- Band 12** P. Ringler, H. Schermeyer, M. Ruppert, M. Hayn, V. Bertsch, D. Keles, W. Fichtner  
**Decentralized Energy Systems, Market Integration, Optimization.**  
ISBN 978-3-7315-0505-1
- Band 13** Marian Hayn  
**Modellgestützte Analyse neuer Stromtarife für Haushalte unter Berücksichtigung bedarfsorientierter Versorgungssicherheitsniveaus.**  
ISBN 978-3-7315-0499-3

- Band 14** Frank Schätter  
Decision support system for a reactive management of disaster-caused supply chain disturbances.  
ISBN 978-3-7315-0530-3
- Band 15** Robert Kunze  
Techno-ökonomische Planung energetischer Wohngebäude-modernisierungen: Ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell auf Basis einer vollständigen Finanzplanung.  
ISBN 978-3-7315-0531-0
- Band 16** A. Kühlen, J. Stengel, R. Volk, F. Schultmann, M. Reinhardt, H. Schlick, S. Haghsheno, A. Mettke, S. Asmus, S. Schmidt, J. Harzheim  
ISA: Immissionsschutz beim Abbruch - Minimierung von Umweltbelastungen (Lärm, Staub, Erschütterungen) beim Abbruch von Hoch-/Tiefbauten und Schaffung hochwertiger Recyclingmöglichkeiten für Materialien aus Gebäudeabbruch.  
ISBN 978-3-7315-0534-1
- Band 17** Konrad Zimmer  
Entscheidungsunterstützung zur Auswahl und Steuerung von Lieferanten und Lieferketten unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten.  
ISBN 978-3-7315-0537-2
- Band 18** Kira Schumacher, Wolf Fichtner and Frank Schultmann (Eds.)  
Innovations for sustainable biomass utilisation in the Upper Rhine Region.  
ISBN 978-3-7315-0423-8
- Band 19** Sophia Radloff  
Modellgestützte Bewertung der Nutzung von Biokohle als Bodenzusatz in der Landwirtschaft.  
ISBN 978-3-7315-0559-4
- Band 20** Rebekka Volk  
Proactive-reactive, robust scheduling and capacity planning of deconstruction projects under uncertainty.  
ISBN 978-3-7315-0592-1

- Band 21** Erik Merkel  
**Analyse und Bewertung des Elektrizitätssystems und des Wärmesystems der Wohngebäude in Deutschland.**  
ISBN 978-3-7315-0636-2
- Band 22** Rebekka Volk (Hrsg.)  
**Entwicklung eines mobilen Systems zur Erfassung und Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen beim Rückbau von Infrastruktur und Produkten („ResourceApp“): Schlussbericht des Forschungsvorhabens.**  
ISBN 978-3-7315-0653-9
- Band 23** Thomas Kaschub  
**Batteriespeicher in Haushalten unter Berücksichtigung von Photovoltaik, Elektrofahrzeugen und Nachfragesteuerung.**  
ISBN 978-3-7315-0688-1
- Band 24** Felix Hübner, Rebekka Volk, Oktay Secer, Daniel Kühn, Peter Sahre, Reinhard Knappik, Frank Schultmann, Sascha Gentes, Petra von Both  
**Modellentwicklung eines ganzheitlichen Projektmanagementsystems für kerntechnische Rückbauprojekte (MogaMaR): Schlussbericht des Forschungsvorhabens.**  
ISBN 978-3-7315-0762-8
- Band 25** Karoline Fath  
**Technical and economic potential for photovoltaic systems on buildings.**  
ISBN 978-3-7315-0787-1
- Band 26** Ann-Kathrin Müller  
**Decision Support for Biomass Value Chains for the Production of Biochemicals Considering Uncertainties.**  
ISBN 978-3-7315-0820-5
- Band 27** Jonatan J. Gómez Vilchez  
**The Impact of Electric Cars on Oil Demand and Greenhouse Gas Emissions in Key Markets.**  
ISBN 978-3-7315-0914-1

- Band 28** Carmen Schiel  
**Real Option Based Appraisal of Environmental Investments – An Assessment of NO<sub>x</sub> Emission Control Techniques in Large Combustion Plants.**  
ISBN 978-3-7315-0925-7
- Band 29** Hannes Schwarz  
**Optimierung der Investitions- und Einsatzplanung dezentraler Energiesysteme unter Unsicherheit.**  
ISBN 978-3-7315-0919-6
- Band 30** Kai Mainzer  
**Analyse und Optimierung urbaner Energiesysteme – Entwicklung und Anwendung eines übertragbaren Modellierungswerkzeugs zur nachhaltigen Systemgestaltung.**  
ISBN 978-3-7315-0882-3
- Band 31** Rupert Hartel, Viktor Slednev, Hasan Ümitcan Yilmaz, Armin Ardone, Dogan Keles, Wolf Fichtner, Anke Eßer, Marian Klobasa, Matthias Kühnbach, Pia Manz, Joachim Globisch, Rainer Elmland, Martin Wietschel (Hrsg.)  
**Dekarbonisierung des Energiesystems durch verstärkten Einsatz erneuerbaren Stroms im Wärme-, Verkehrs- und Industriesektor bei gleichzeitigen Stilllegungen von Kraftwerken – Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit in Süddeutschland.**  
ISBN 978-3-7315-0879-3
- Band 32** Rebekka Volk, Richard Müller, Frank Schultmann, Jérémy Rimbon, Thomas Lützkendorf, Joachim Reinhardt, Florian Knappe  
**Stofffluss- und Akteursmodell als Grundlage für ein aktives Ressourcenmanagement im Bauwesen von Baden-Württemberg „StAR-Bau“ – Schlussbericht des Forschungsvorhabens.**  
ISBN 978-3-7315-0858-8
- Band 33** Felix Hübner  
**Planung und Modellierung des Rückbaus kerntechnischer Anlagen unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten – Ein Beispiel zur Planung von Großprojekten.**  
ISBN 978-3-7315-0911-0

- Band 34** Kira Schumacher  
**Public acceptance of renewable energies – an empirical investigation across countries and technologies.**  
ISBN 978-3-7315-0948-6
- Band 35** Daniel Fehrenbach  
**Modellgestützte Untersuchung des wirtschaftlichen Potenzials sektorgekoppelter Wärmeversorgung in Wohngebäuden im Kontext der Transformation des Energiesystems in Deutschland.**  
ISBN 978-3-7315-0952-3
- Band 36** Mariana Burkhardt  
**Impacts of natural disasters on supply chain performance.**  
ISBN 978-3-7315-1020-8
- Band 37** Katrin Seddig  
**Elektromobile Flotten im lokalen Energiesystem mit Photovoltaikeinspeisung unter Berücksichtigung von Unsicherheiten.**  
ISBN 978-3-7315-1031-4
- Band 38** Florian Diehlmann  
**Facility Location Planning in Relief Logistics: Decision Support for German Authorities.**  
ISBN 978-3-7315-1120-5
- Band 39** Richard Carl Müller  
**Entscheidungsunterstützung zur Planung und Bewertung nachhaltiger industrieller Wertschöpfungsketten – dargestellt am Beispiel von Fahrzeugteilen.**  
ISBN 978-3-7315-1149-6
- Band 40** Miriam Isabelle Klein  
**Cross-Border Collaboration in Disaster Management.**  
ISBN 978-3-7315-1195-3
- Band 41** David Balussou  
**An analysis of current and future electricity production from biogas in Germany.**  
ISBN 978-3-7315-1035-2



- Band 42** Rebekka Volk, Elias Naber, Frank Schultmann, Thomas Lützkendorf, Kai Mörmann, Stefan Norra, Denise Böhnke, Alice Krehl, Rainer Schuhmann, Anke Ehbrecht, Thomas Beck, Philipp Tomaszewski, Julia Hackenbruch, Sybille Rosenberg, Norbert Hacker  
**Bewertung der Ökologie, Wirtschaftlichkeit und sozialen Effekte von ressourceneffizienzsteigernden Maßnahmen auf Quartiersebene – von der volkswirtschaftlichen zur aktorenspezifischen Perspektive (NaMaRes): Schlussbericht des Forschungsvorhabens.**  
ISBN 978-3-7315-1293-6
- Band 43** Markus Lüttenberg  
**Strengthening Resilience of Supply with Essential Goods through Public-Private Emergency Collaborations: Challenges and Incentives.**  
ISBN 978-3-7315-1311-7
- Band 44** Rebekka Volk, Marco Gehring, Niklas Braun, Oliver Wagner, Peter Stängle  
**Entwicklung eines benutzerfreundlichen kostenoptimierenden Planungswerkzeugs für kerntechnische Rückbauprojekte unter Berücksichtigung von Stoffströmen zur Ressourcenplanung (NukPlaRStoR): Schlussbericht des Forschungsvorhabens.**  
ISBN 978-3-7315-1329-2

ab Band 45 nur noch online erschienen

- Band 45** Günter Beuchle, Krassimir Garbev, Oliver Kreft, Frank Schultmann, Uwe Schweike, Justus Steins, Peter Stemmermann, Angela Ullrich, Rebekka Volk, Beate Weiß  
**Recyclingcluster Porenbeton (REPOST) - Schlussbericht des Forschungsvorhabens.**



INSTITUT FÜR INDUSTRIEBETRIEBSLEHRE UND INDUSTRIELLE PRODUKTION  
DEUTSCH-FRANZÖSISCHES INSTITUT FÜR UMWELTFORSCHUNG

ISSN 2194-2404