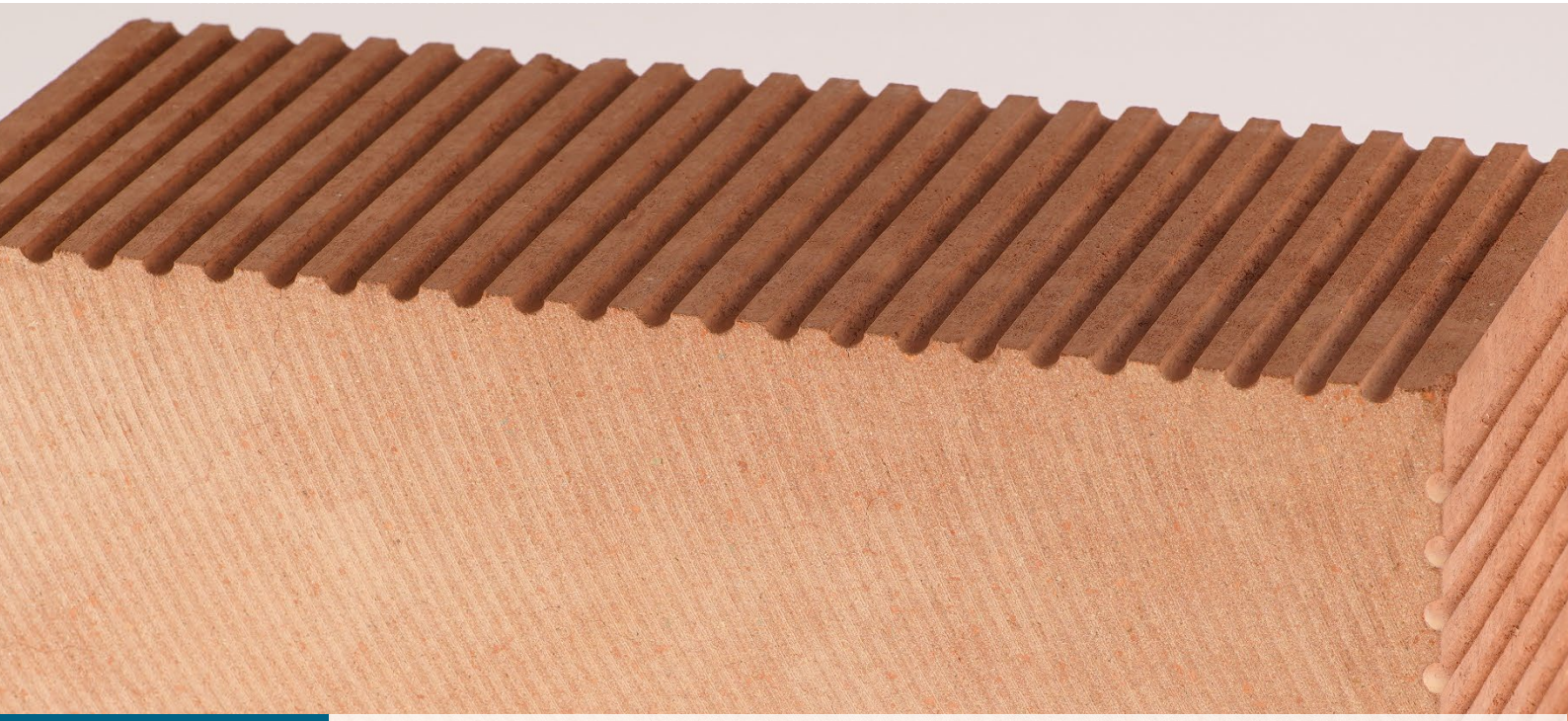
ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung



BBSR-
Online-Publikation
16/2023

Großtechnische Herstellung eines Recyclingfunktions-Wandbaustoffs

von

Dr. Valentin Heizinger
Dr. Christian Iffelsberger
Dr. Matthias Heigl
Simon Schneider
Julius Greim

Großtechnische Herstellung eines Recyclingfunktions-Wandbaustoffs

Durchführbarkeitsstudie mit Fokus auf Fertigungsprozess, Stoffströme, Marktpotenzial, Logistik und bilanzielle Betrachtungen

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.
Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.10
Projektlaufzeit: 07.2021 bis 12.2022

IMPRESSUM

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

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

Autoren
Leipfinger-Bader GmbH, Vatersdorf
Dr. Valentin Heizinger (Projektleitung)
valentin.heizinger@leipfinger-bader.de

Dr.-Ing. Matthias Heigl
matthias.heigl@leipfinger-bader.de

Simon Schneider
simon.schneider@leipfinger-bader.de

HeiQ RAS AG, Regensburg
Dr. Christian Iffelsberger
christian.iffelsberger@heiq.com

Julius Greim
julius.greim@heiq.com

Redaktion
Leipfinger-Bader GmbH, Vatersdorf
Dr. Valentin Heizinger

Stand
Dezember 2022

Gestaltung
Leipfinger-Bader GmbH, Vatersdorf
Dr. Valentin Heizinger

Bildnachweis
Titelbild: Leipfinger-Bader GmbH

Vervielfältigung
Alle Rechte vorbehalten

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

Zitierweise
Heizinger, Valentin; Iffelsberger, Christian; Heigl, Matthias; Schneider, Simon; Greim, Julius, 2023: Großtechnische Herstellung eines Recyclingfunktions-Wandbaustoffs: Durchführbarkeitsstudie mit Fokus auf Fertigungsprozess, Stoffströme, Marktpotenzial, Logistik und bilanzielle Betrachtungen. BBSR-Online-Publikation 16/2023, Bonn.

ISSN 1868-0097 Bonn 2023

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung 5

Abstract 6

Einleitung 7

Untersuchungsgegenstand 7

Problemstellung 8

Stand der Forschung/Baupraxis 8

Zielstellung 12

Konkrete Projektziele 12

Übergeordnete Ziele und der Beitrag des Projekts dazu 12

Forschungsdesign 13

Arbeitshypothese 13

Methodischer Ansatz 13

Projektteam und Organisation, Kooperationspartner 13

Arbeitspakete und Meilensteine 13

Projektverlauf – Methodik 14

Darstellung der durchgeführten Arbeiten und der Erkenntnisse daraus (inkl. Zwischenergebnisse und Meilensteine) 14

Arbeitspaket 1: Projektkoordination 14

Arbeitspaket 2: Materialien und Stoffströme 14

Arbeitspaket 3: Marktanalyse und Marktpotential 20

Arbeitspaket 4: Fertigungsprozess 23

Arbeitspaket 5: Bilanzierung 24

Arbeitspaket 6: Abschlussarbeiten 27

Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse 28

Zusammenführung der Zwischenergebnisse zum Endergebnis 28

Fazit und Ausblick 29

Literaturverzeichnis 30

Abbildungsverzeichnis 31

Tabellenverzeichnis 32

Kurzfassung

Gegenstand des Projektes ist die Erstellung einer Durchführbarkeitsstudie zur großtechnischen Herstellung eines innovativen Wandbaustoffs. Dieser zeichnet sich in seiner Zusammensetzung durch hohe Anteile an rezyklierten Materialien bei sehr guten bauphysikalischen Eigenschaften aus. Im Rahmen der Durchführbarkeitsstudie werden relevante Fragestellungen in Hinblick auf eine großtechnische Herstellbarkeit bearbeitet. Die Versorgung mit den benötigten Ausgangsmaterialien steht dabei ebenso im Fokus wie zugehörige Fertigungsprozesse und die Marktsituation unter Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Faktoren. Es wird gezeigt, dass die grundlegenden Rahmenbedingungen günstige Voraussetzungen für den Markteintritt des Kaltziegels und damit verbunden den Aufbau einer großtechnischen Produktion bieten. In die Gesamtbetrachtung müssen jedoch auch limitierende Faktoren einbezogen werden, wie die gegenwärtig schwer zu kalkulierenden Beeinträchtigungen in der Planbarkeit von umfangreichen Investitionsvorhaben.

Abstract

The object of the project is the preparation of a feasibility study for the large-scale production of an innovative wall-building material. The composition of this material is characterized by a high proportion of recycled materials and very good physical properties. Within the framework of the feasibility study, relevant issues are being addressed with regard to large-scale manufacturability. The focus is on the supply of the required starting materials as well as the associated manufacturing processes and the market situation, taking into account economic and ecological factors. It will be shown that the basic conditions are favorable for the market entry of cold bricks and the associated establishment of large-scale production. However, limiting factors must also be included in the overall analysis, such as the current difficulty in calculating the planning feasibility of extensive investment projects.

Einleitung

Foto: Leipfinger-Bader GmbH

Abbildung 1: Ziegel-Rezyklat

Untersuchungsgegenstand

Im Rahmen des Forschungsvorhabens "Kaltziegel - ein Recyclingfunktionswerkstoff" im "Bayerischen Programm Neue Werkstoffe" des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie wurde im Zeitraum 2016 bis 2020 ein Recyclingfunktions-Wandbaustoff, der sog. "Kaltziegel" entwickelt. Dieser ist nicht gebrannt und zeichnet sich in seiner Zusammensetzung durch einen hohen Anteil an rezyklierten Ziegelmaterialien aus, bei einem niedrigen Gehalt an Bindemittel-Compound. Bauphysikalische Untersuchungen ergeben sehr gute Schalldämmeigenschaften und hohe Druckfestigkeiten. In Verbindung mit einem geringen Energieeinsatz im Prozess und der Bereitstellung der Ausgangsstoffe stellt das Neuprodukt eine ressourceneffiziente Alternative zu bestehenden Wandbaustoffen, gerade im Bereich tragender Innenwände mit hohen Lasten und hohen Schallschutzanforderungen, dar. Die großtechnische Herstellung umfasst weitergehende Fragestellungen, die bisher nicht Gegenstand der Forschungsarbeit waren. Die Herstellung kann nicht in bestehende Prozesse eingegliedert werden. Folglich ist der Aufbau eines neuen Produktionsstandorts mit neuen Fertigungsverfahren erforderlich. Neben der technischen Konzepterstellung besteht die Herausforderung vor allem darin, alle relevanten Rahmenbedingungen und Einflussgrößen zu erfassen und zu bewerten. Die Analyse vorhandener Stoffströme rezyklierter Ziegelmaterialien muss den Anforderungen an die Ausgangsstoffe gegenübergestellt werden. Nicht tolerierbare Inhaltsstoffe (Störstoffe) der Sekundärrohstoffe müssen genau identifiziert und Grenzwerte quantifiziert werden. In Verbindung mit der Ermittlung des vorhandenen Marktpotentials kann eine Auslegung der Produktionskapazitäten erfolgen. Folgende Kernthese kann formuliert werden: Die großtechnische Herstellung des "Kaltziegels" ist unter Berücksichtigung des Absatzmarktes und der Verfügbarkeit von Basismaterialien ökonomisch und ökologisch sinnvoll möglich.

Problemstellung

In Deutschland fallen jährlich etwa 214,6 Mio. Tonnen mineralische Bauabfälle an. Knapp 90 Mio. Tonnen bestehen aus Bauschutt, Straßenaufbruch, Gips- und Baustellenabfällen. Stoffströme mit hohen Ziegelanteilen sind je nach Herkunft sehr unterschiedlich zu bewerten. Beim Rückbau und Abbruch von Mauerwerk fällt mengenmäßig mit geschätzten 10 Mio. Tonnen pro Jahr der größte Anteil an recycelfähigem, ziegelreichem Material an. Neben einem hohen Ziegelanteil sind im Mauerwerksbruch auch Mörtel und Putz enthalten. Mit dem Ziel einer möglichst hochwertigen Verwertung wird dieses Material in der Regel einem Aufbereitungsverfahren zugeführt. Die dabei erzeugten rezyklierten Gesteinskörnungen können je nach Zusammensetzung unterschiedlichen Anwendungen zugeführt werden und werden z. B. für die Herstellung gebundener oder ungebundener Oberbauschichten im Straßenbau verwendet. Großes Potenzial steckt auch im Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung für ressourcenschonenden Beton, sogenanntem R-Beton. Die stoffliche Wiederverwertung von sortenreinem Ziegelbruch (Produktionsausschuss / Brennbruch, Rücknahme von der Baustelle, Dachumdeckungen) erfordert vergleichsweise geringen technischen Aufwand. Die Anwendung erfolgt als Füll- und Befestigungsmaterial im Straßen-, Wege-, Tennis- und Sportplatzbau sowie als Pflanzensubstrat im Vegetationsbau. Details sind der Broschüre RE-USE UND RECYCLING VON ZIEGELN zu entnehmen [1]. Während in den oben genannten Anwendungen hauptsächlich Gesteinskörnungen > 1 mm Verwendung finden, fußt die gegenständliche Durchführbarkeitsstudie auf den Ergebnissen des vorangegangenen Projekts „Kaltziegel“. Ziel dieses Vorhabens war die Herstellung eines massiven Mauerziegels mit Hilfe feiner Ziegelsande und einem mineralischen Bindemittel. Durch den erfolgreichen Abschluss des Projekts konnte eine hochwertige Möglichkeit zu Wiederverwendung für feine Ziegelrezyklatbestandteile gefunden werden (Ziegelsande, Ziegelstäube, Brechsande).

Stand der Forschung/Baupraxis

Kaum ein Industriezweig kommt heute noch umhin, im Sinne einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft und Ressourcenschonung darzulegen, mit welchen Optionen die Produkte nach der ersten Nutzungsphase in den Verwertungskreislauf zurückgeführt werden. Hierfür müssen bereits bei der Entwicklung Vorkehrungen im Design getroffen werden, die einen sortenreinen Rückbau und eine einfache Trennung in Einzelkomponenten ermöglichen.

Stoffströme mit hohen Ziegelanteilen sind je nach Herkunft sehr unterschiedlich zu bewerten. Wie bereits erläutert bietet abgebrochenes Mauerwerk ein großes Potential an recyclingfähigem Material für unterschiedliche Bereiche der Wiederverwertung, je nach aufbereiteter Korngrößen. So werden rezyklierte Bruchbestandteile und Gesteinskörnungen mit Korngrößen > 4 Millimeter unter anderem für die Herstellung gebundener oder ungebundener Oberbauschichten im Straßenbau verwendet.

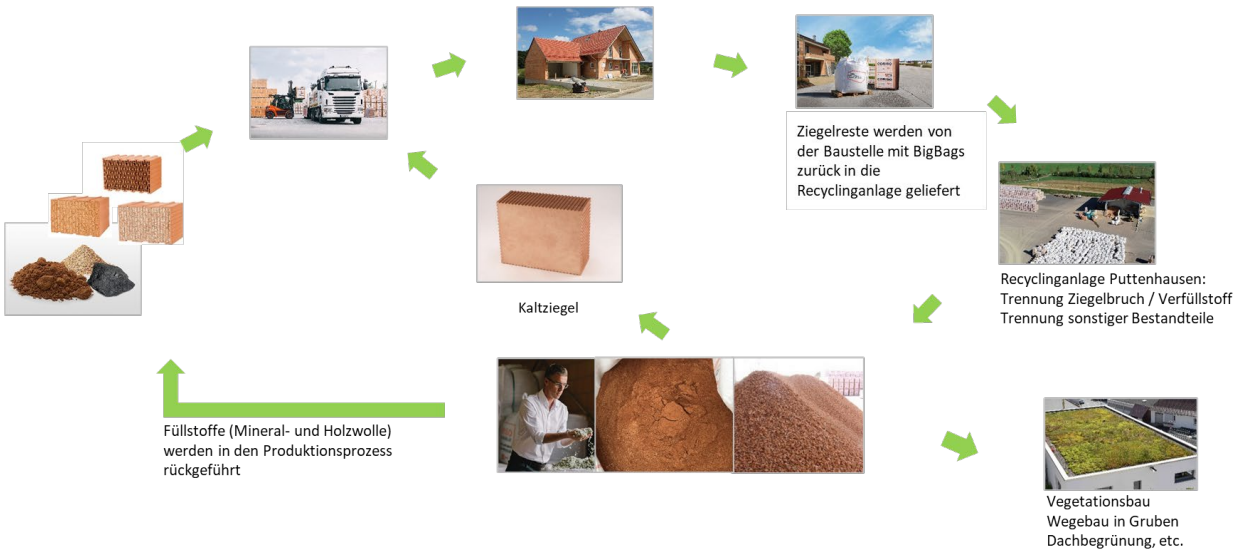
Bei der Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen für ressourcenschonenden R-Beton werden Primärrohstoffe wie Kies oder gebrochenes Primärgestein durch eine aufbereitete RC-Gesteinskörnung ersetzt. Diese kann, abhängig von Anwendungsbereich und Liefertyp, 2 bis 10 Volumenprozent an aufbereitetem Ziegelbruch enthalten.

Bei der stofflichen Wiederverwertung von sortenreinem Ziegelbruch (Produktionsausschuss, Brennbruch, Baustellenrücknahme etc.) ist in der Aufbereitung eine Zerkleinerung, beispielsweise durch Backenbrecheranlagen, und eine Fraktionierung des Brechgutes erforderlich. Die Anwendung erfolgt als Füll- und Befestigungsmaterial im Straßen-, Wege-, Tennis- und Sportplatzbau sowie als Pflanzensubstrat im Vegetationsbau. Dies entspricht einem Downcycling des Materials, was es grundsätzlich zu vermeiden gilt.

Das Aufkommen an Brennbruch wird ungefähr mit 1 bis 3 Prozent der Produktion bei Dachziegeln und Mauerziegeln geschätzt. In Summe entspricht das etwa 200.000 bis 300.000 Tonnen. Der Hauptanteil der Abfälle aus der Produktion wird als Brennbruch erneut der Herstellung zugeführt.

Sortenreine Abbruchziegel werden zum Beispiel bei Dachumdeckungen oder durch Vorsortierung aus Mauerwerkbruch gewonnen. Beim Abbruch von reinem Ziegelmauerwerk fällt ein Keramikanteil von bis zu 80 bis 95 Masseprozent an.

In den Bereichen Ressourceneffizienz und Ziegelrecycling hat Leipfinger-Bader eine Vorreiterrolle inne. Das Konzept der geschlossenen Stoffkreisläufe wurde 2022 mit dem Innovationspreis TOP100 ausgezeichnet. Dem Kaltziegel kommt dabei eine zentrale Rolle zu, indem der Stoffkreislauf für Ziegelmaterialien mit geringer Korngröße geschlossen wird.



Quelle: Leipfinger-Bader GmbH

Abbildung 2: Geschlossene Kreisläufe Ziegelrecycling; System Leipfinger-Bader

Hauptanwendungsbereich des Kaltziegels sind tragende Innenwände mit hohen Anforderungen an Statik und Schallschutz. Demensprechend wurde im Rahmen der Entwicklungen ein Format gewählt, das in Länge und Breite zwei gängige Wandstärken abdeckt (24 cm und 30 cm). Die Höhe ist angelehnt an das Rastermaß in der Planziegelverarbeitung von 25 cm. Die Kaltziegel werden mit einer Höhe von 12,4 cm produziert. Bei 1 mm Fugenstärke (Verarbeitung im Dünnbettmörtel-Verfahren) beträgt die Höhe einer Lage des Kaltziegels inklusive Fuge 12,5 cm, was exakt der Hälfte des Rastermaßes für Planziegel entspricht. In der getätigten Entwicklung wird davon ausgegangen, dass Wände aus Kaltziegeln nicht als Sichtmauerwerk errichtet und im Nachgang verputzt werden. Um eine möglichst gute Putzhaftung zu erzielen, wurde zur Vergrößerung Oberfläche seitlich eine Rillierung vorgesehen. In nachfolgender Abbildung ist die Geometrie dargestellt.

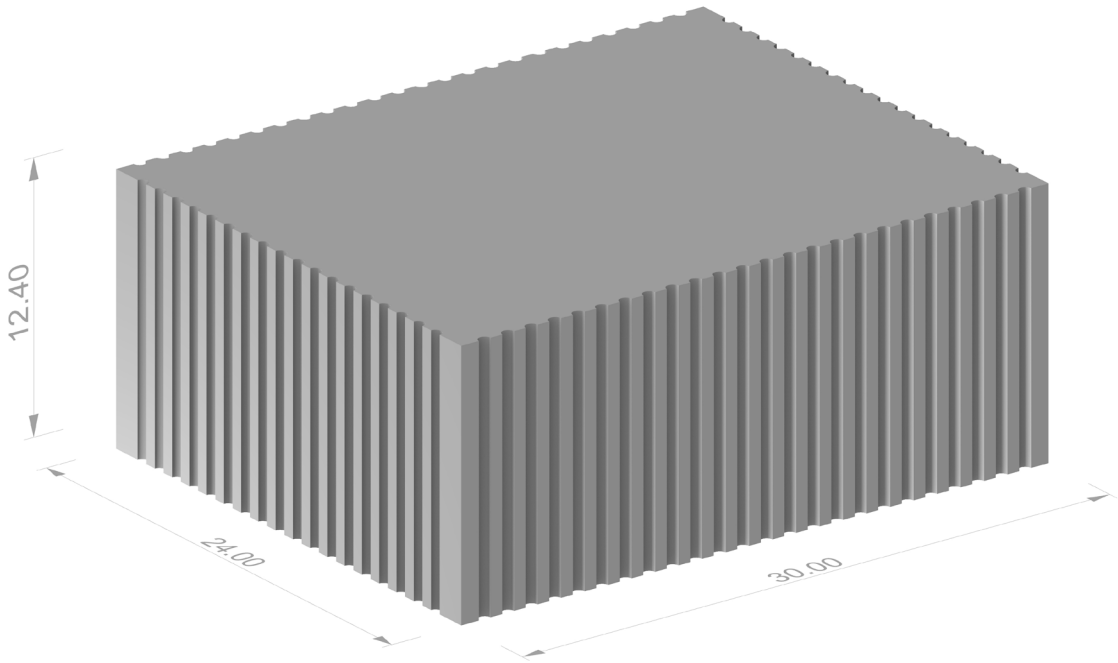


Abbildung: Leipfinger-Bader GmbH

Abbildung 3: Kaltziegel-Geometrie mit Bemaßung in cm

Die beschriebene Flexibilität in der Verarbeitung, wodurch mit einem Format zwei Wandstärken möglich sind, erlaubt keine Verzahnung in Wandlänge. Deshalb ist es bei dieser Geometrie erforderlich, die Stoßfugen ebenfalls mit Dünnbettmörtel zu vermörteln. Nachfolgende Abbildung zeigt die Kaltziegel-Verarbeitung während der Errichtung einer Prüfwand.

Foto: Leipfinger-Bader GmbH

Abbildung 4: Kaltziegel-Verarbeitung beim Aufbau einer Prüfwand

Neben der Verarbeitbarkeit des Kaltziegels sind hinsichtlich künftiger Marktchancen insbesondere auch die bauphysikalischen Eigenschaften entscheidend, welche umfangreich untersucht wurden. Nachfolgende Tabelle enthält die wichtigsten Ergebnisse. Dabei gilt es zu beachten, dass es sich bei der beschriebenen Entwicklung um einen systemischen Ansatz handelt, bei dem unterschiedliche Rohstoffe in unterschiedlichen Rezepturen zum Einsatz kommen können.

Tabelle 1: Bauphysikalische Eigenschaften

Eigenschaft	**Wert**
Schalldämmmaß	59 dB
Rohdichte	Ca. 2,0 kg/dm^3
Druckfestigkeit	Bis > 40 N/mm^2
Wärmespeicherkapazität	0,89 kJ/kg
Frost-Tau-Beständigkeit	100 Frost-Tau-Wechsel

Zielstellung

Ziel des Projekts ist die Erstellung einer Durchführbarkeitsstudie zur großtechnischen Herstellung eines innovativen Wandbaustoffs. Kernaussage wird die Beantwortung der Frage sein, ob unter Berücksichtigung von Absatzmarkt und Verfügbarkeit von Basismaterialien eine großtechnische Herstellung wirtschaftlich und ökobilanziell sinnvoll darstellbar ist. Der Projektfortschritt kann dabei anhand der definierten Meilensteine gemessen werden. Diese sind im Projektplan terminiert.

Konkrete Projektziele

Untergliedert in mehrere Arbeitspakete sind unterschiedliche konkrete Arbeitsergebnisse zu ermitteln:

- Stoffströme und deren Verfügbarkeit, Störstoffe,
- Bindemittel-Alternativen,
- Herstellungsprozesse,
- Produktionskosten,
- Marktpotential und
- Bilanzierung ökonomischer und umweltrelevanter Aspekte.

Übergeordnete Ziele und der Beitrag des Projekts dazu

Die Durchführbarkeitsstudie bildet die Grundlage für eine spätere Investitionsentscheidung hinsichtlich einer großtechnischen Herstellung des neuartigen Wandbaustoffs. Die Studie kann dabei in zweierlei Tendenzen als erfolgreich eingestuft werden. Einerseits, falls im Rahmen der Studie ein realisierbarer Weg erarbeitet werden kann, der das Investment in den Aufbau entsprechender Produktionsanlagen rechtfertigt. Andererseits wäre es auch als erfolgreich zu bewerten, falls konkrete Hemmnisse für eine Fortführung des Vorhabens im großtechnischen Maßstab identifiziert werden würden.

Forschungsdesign

Arbeitshypothese

Dem Vorhaben zu Grunde liegt die Hypothese, dass eine großtechnische Herstellung des innovativen Wandbaustoffs technologisch möglich und sowohl ökonomisch als auch ökologisch sinnvoll ist.

Methodischer Ansatz

Für die Beantwortung der Forschungsfragen sind unterschiedliche methodische Vorgehensweisen erforderlich. Der Bereich Stoffströme wird über ein mehrstufiges Vorgehen abgedeckt: Detaillierte Recherche vorhandener Daten, direkte Kommunikation auf institutioneller und Verbands-Ebene, direkte Kommunikation mit Anlagenbetreibern und Probennahme aussichtsreicher Materialien. Im Bereich Prozess- und Anlagentechnik müssen in Zusammenarbeit mit Anlagenbauern konkrete technische Konzepte erstellt und diese mit Angeboten belegt werden. Marktbetrachtungen und die Ermittlung des Marktpotentials sollen sowohl bezogen auf den eigenen Vertrieb sowie übergreifend im unipor-Verband und im Bundesverband Ziegel erfolgen. Die Analyse und Bewertung von möglichen Störstoffen in den Ausgangsstoffen sowie die Frage nach möglichen Bindemittelalternativen wird im Rahmen eines Unterauftrags bearbeitet. Bilanzielle Betrachtungen werden nach etablierten Methoden durchgeführt.

Projektteam und Organisation, Kooperationspartner

Die Projektdurchführung erfolgt im Wesentlichen durch die FuE-Abteilung von Leipfinger-Bader. Zusätzlich wird für die Identifizierung von Störstoffen und die Erarbeitung von Bindemittelalternativen ein Unterauftrag vergeben. Materialanalysen potenziell geeigneter Ausgangsstoffe erfolgen extern.

Arbeitspakete und Meilensteine

Die inhaltliche und zeitliche Struktur des Projekts ist nachfolgender Übersicht zu entnehmen. Insgesamt erstrecken sich sechs Arbeitspakete und vier Meilensteine über eine Projektlaufzeit von 18 Monaten.

		Projektlaufzeit 01.07.2021 bis 31.12.2022																	
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18
AP 1	**Projektkoordination**																		
AP 2	**Materialien und Stoffströme**																		
MS1	*Qualitativ geeignete Materialien und deren Mengenaufkommen sind bestimmt*																		
AP 3	**Marktanalyse und Marktpotential**																		
MS2	*Zielgröße jährliche Produktionsleistung ist bestimmt*																		
AP 4	**Fertigungsprozess**																		
MS3	*Prozesstechnik inkl. Kostenstruktur ist bestimmt*																		
AP 5	**Bilanzierung**																		
MS4	*Bilanzielle Betrachtungen sind abgeschlossen*																		
AP 6	**Abschlussarbeiten**																		

Abbildung 5: Projektstruktur

Projektverlauf – Methodik

Mit dem Projekt wurde gemäß der Projektlaufzeiten begonnen. Der ursprüngliche Zeitplan konnte eingehalten werden und auch die vorgegebenen Meilensteine konnten fristgerecht erfüllt werden.

Darstellung der durchgeführten Arbeiten und der Erkenntnisse daraus (inkl. Zwischenergebnisse und Meilensteine)

Arbeitspaket 1: Projektkoordination

Die Projektkoordination beinhaltet die inhaltliche und zeitliche Organisation aller enthaltenen Arbeitsaufgaben und erstreckt sich über den gesamten zeitlichen Verlauf des Projekts. Diese Aufgaben wurden von der Leipfinger-Bader GmbH durch Projektleiter Dr. Valentin Heizinger übernommen, inklusive inhaltlicher und administrativer Abstimmung mit dem BBSR.

Arbeitspaket 2: Materialien und Stoffströme

Grundsätzlich können für den Einsatz im Kaltziegel unterschiedliche Materialien verwendet werden. Dem Gesamtansatz folgend werden insbesondere Sekundärmaterialien in Betracht gezogen. Diese können ihren Ursprung in der Rohstoffgewinnung (z. B. Naturstein), in der Produktion von Bauprodukten (z. B. Ziegelproduktion) oder dem Baustoffrecycling (z. B. Brechsande) entstammen.
Durch Expertengespräche wurden potenziell in Frage kommende Stoffe identifiziert und Materialproben gesammelt und in Versuchsreihen auf deren Eignung getestet.

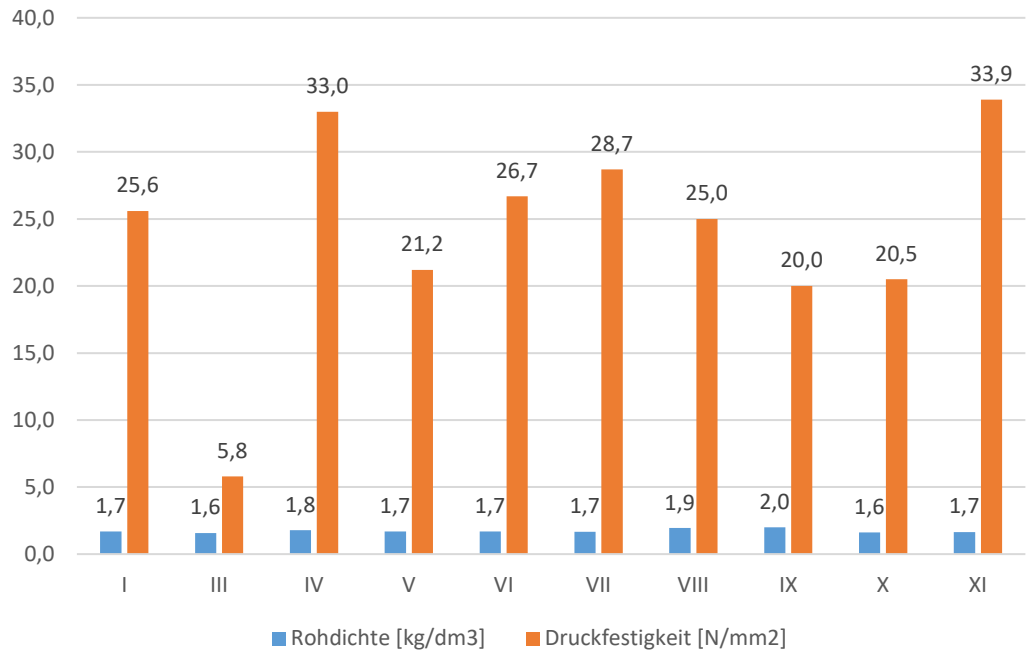
Fotos: Leipfinger-Bader GmbH

Abbildung 6: Erstellung von Probekörper im Labormaßstab

Foto: Ceramix

Abbildung 7: Probekörper nach der Vorbereitung für die Prüfung

Die Probekörper wurden hinsichtlich erreichter Rohdichte und Druckfestigkeit bewertet. Mit Ausnahme von Variante III, der ein Dosierfehler zu Grunde lag, wurde mit allen getesteten Varianten eine Druckfestigkeit von mindestens 20 N/mm2 erreicht.



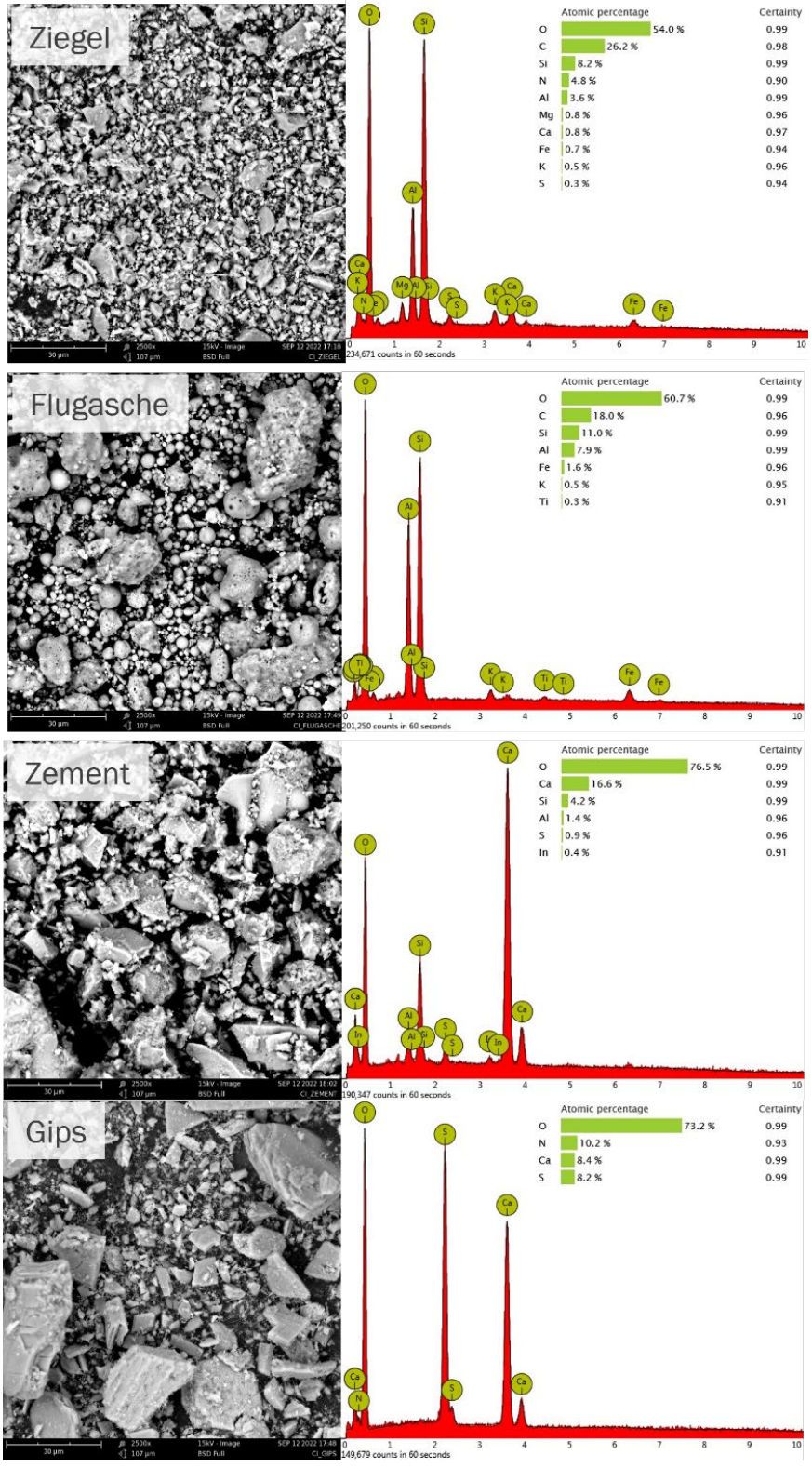
Quelle: Leipfinger-Bader GmbH

Abbildung 8: Ergebnisauswertung unterschiedlicher Materialtests

Die Verfügbarkeit von Sekundärmaterialien ist in großem Maße gewährleistet. Deren Eignung ist über ein Qualitätsmanagementsystem, insbesondere hinsichtlich Konstanz und Störstoffen, sicherzustellen. Dies muss für den Einzelfall detailliert erarbeitet werden.

Als wichtige Störstoffe für die Produktion von Ziegeln aus Rezyklat-Material wurden hauptsächlich Gips, aber auch organische Störstoffe und Asbest, identifiziert. Es wurden physikochemische Charakterisierungen von im Rezyklat enthaltenen Bestandteilen mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDS) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 gezeigt. Die REM-Aufnahmen zeigen morphologische Unterschiede der Ausgangsstoffe. Während Gips, Zement und Ziegel vorwiegend aus kantigen Partikeln bestehen ist die Flugasche zum größten Teil aus abgerundeten und kugelförmigen Partikeln aufgebaut. Die EDS-Analysen zeigen die Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung auf. In

allen Spektren ist Sauerstoff mit über 50 at. % das häufigste Element. Das EDS-Spektrum für gemahlenen Ziegel zeigt neben Sauerstoff auch Silizium, Aluminium, Magnesium, Calcium und Eisen an. In der untersuchten Flugasche wurden die Elemente Silizium, Aluminium und Eisen gefunden, jedoch nicht Calcium und Magnesium. Im Zement wurde vorwiegend Calcium, aber auch kleinere Mengen Aluminium und Silizium gefunden. In Gips (Calciumsulfat) sind wie erwartet Calcium und Schwefel in großer Menge vorhanden. Somit können größere Mengen Schwefel in Kombination mit Calcium auf das Vorhandensein von Gips hinweisen.



Fotos: HeiQ RAS AG

Abbildung 9: Physikochemische Charakterisierung von rezyklierten Ausgangsstoffen für die Ziegel Produktion. Links: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen. Rechts: EDS-Spektren der Materialien mit der tabellierten chemischen Zusammensetzung.

Um Störstoffe aus dem Rezyklat zu entfernen ist eine Sortierung notwendig. Eine Zusammenfassung möglicher Sensorsysteme zur Differenzierung von Sortiergut ist in der Tabelle 2 gezeigt.

Tabelle 2: Aufzählung möglicher Sensorsysteme zur Differenzierung von Sortiergut

Sensorik	Trennkriterium	Sortierung
Farbkameras	Farbe, Helligkeit, Transparenz, Glanz	Farbsortierung Altglas, Kunststoffe, NE-Metallgemischen und Elektroschrott
Nahinfrarot-Spektrometer	Molekulare Zusammensetzung an der Oberfläche	Verpackungsmaterial (Getränkekartons, Papier, Pappe, Holz, Textilien), Bauschutt, Industriemineralien
Induktive Detektoren	Elektrische Leitfähigkeit	Metalle und Edelstähle
Röntgendetektoren	Dichte	Aluminium aus NE-Metallgemischen, Elektronikkleingeräte aus Leichtverpackung, PVC und Gummi aus Shredder-Rückständen
Laserinduzierte Plasmaspektroskopie	Chemische Zusammensetzung	Kohle, Stückerzen, Bauxit, Kies, Kalkstein, Dolomit, Ilmenit, Olivin Pellets, Sinter, Feuerfestmaterialien aus Ofenausbrüchen

Quelle: [2] Müller, A. "Baustoffrecycling." Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft 63.11 (2011): 224-230.

Als besonders vielversprechend für eine erfolgreiche Sortierung werden die optischen Verfahren mittels Farbkameras und Nahinfrarotspektroskopie angesehen. Die Farbsortierung bietet sich vor allem für die Trennung von Bestandteilen unterschiedlicher Farbe wie z. B. rotem Ziegel und grauem Beton an. Innerhalb einer farblichen Gruppe sind weitere Unterscheidungen mittels Nahinfrarotsensoren möglich und es können Baustoffgemische aus Beton, Porenbeton, Kalksandstein, Ziegel und Gips anhand ihrer Nahinfrarotspektren gut voneinander unterschieden werden. Jedoch ist eine Unterscheidung verschiedener Betonarten oder verschiedener Ziegelvarianten untereinander nicht möglich. Im Allgemeinen kann eine stufenweise Sortierung die Trennung verbessern.

Eine wichtige Tatsache für eine erfolgreiche Sortierung mittels der optischen Methoden ist, dass bei der Erkennung anhand der Farbe oder der Nahinfrarotspektren von der detektierten Oberfläche auf das gesamte Partikel geschlossen wird. Aus diesem Grund müssen die Partikeloberflächen vor der Sortierung durch Reinigung frei von Verschmutzungen sein. Dies kann durch eine Wäsche oder durch eine trockene bzw. nasse Attrition erreicht werden. Weiter müssen die Partikel eine ausreichende Größe aufweisen um erfolgreich erkannt, klassifiziert und letztendlich sortiert zu werden.

Alternative Bindemittelsysteme:

Unter den alternativen Bindemitteln sind einige vielversprechende Kandidaten, jedoch handelt es sich immer noch um Nischenprodukte für Spezialanwendungen. Für eine Anwendung in größerem Maßstab (z. B. stahlbewehrter Konstruktionsbeton) ist neben Fragen der Verfügbarkeit und der Wirtschaftlichkeit insbesondere ein erheblicher Forschungsbedarf an den Materialien selbst vorhanden.

Für alternative Bindemittel müssen u. U. andere Mischkonzepte angewendet werden. Betonzusatzmittel für herkömmliche Betone haben eventuell eingeschränkte andere oder gar keine Wirksamkeit. Letzteres ist z. B. der Fall bei alkaliaktivierten Bindemitteln, bei denen z. B. herkömmliche Fließmittel praktisch nicht wirken. Für solche Produkte müssten neue Betonzusatzmittel entwickelt werden. Aufgrund unterschiedlicher rheologischer Eigenschaften können bei alternativen Bindemitteln auch andere Mischverfahren erforderlich sein.

Das heutige Normenwesen mit seinen Materialgesetzen wurde für portlandzementgebundene Betone entworfen. Diese Materialgesetze gelten u. U. nicht für alternative Bindemittel. Es fehlen auch viele Kennwerte in der Literatur zu Parametern wie Kriechen, Schwinden oder E-Modul [3].

Hinsichtlich Dauerhaftigkeit gibt es 150 Jahre Erfahrungen mit herkömmlichem Beton. Diese Langzeiterfahrungen z. B. in Bezug auf Carbonatisierung, Frostwiderstand, Chloridwiderstand oder chemische Dauerhaftigkeit liegen bei alternativen Bindemitteln nicht oder nur unvollständig vor. Ein besonders wichtiger Punkt ist hierbei der Carbonatisierungswiderstand, da der weitaus größte Teil des Zementes für stahlbewehrten Beton verwendet wird. Untersuchungen haben gezeigt, dass die CO_2-Pufferkapazität des Bindemittels, welche mit steigendem verfügbarem Calciumoxidgehalt im Bindemittel größer wird, eine entscheidende Rolle bei der Carbonatisierung spielt. Da die alternativen Bindemittel geringere Anteile an verfügbarem Calciumoxid enthalten, kann der Carbonatisierungswiderstand bei alternativen Bindemitteln u. U. geringer sein als bei portlandzementgebundenen, es sei denn die Dichtigkeit der alternativen Baustoffe wäre wesentlich höher. Ein weiterer Punkt ist die Korrosion der Stahlbewehrung, welcher bei hohem pH-Wert des Betons verhindert wird (Passivierung). Einige der alternativen Bindemittel erreichen nicht die hohen pH-Werte von Portlandzement, so dass der Stahl möglicherweise nicht vor Korrosion geschützt ist. Es stellt sich zudem die Frage, ob die gegenwärtigen Prüfverfahren auch für die alternativen Bindemittel anwendbar sind. Diese Fragestellung wird derzeit auf dem Gebiet der alkaliaktivierten Bindemittel vom Technischen Komitee TC DTA (durability testing of alkali-activated materials) der RILEM (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures) bearbeitet.

Portlandzement wird in den nächsten Jahrzehnten das wichtigste Bindemittel bleiben. Es ist aber zu erwarten, dass seine Zusammensetzung komplexer und vielfältiger werden wird. Zukünftig wird es vermutlich mehr Kompositzemente, auch mit bislang wenig oder noch nicht verwendeten Zusatzstoffen, geben. In diesem Zusammenhang sind insbesondere die calcinierten Tone zu nennen. Alternative Bindemittel sind (noch) ein Nischenprodukt, und etliche dieser Produkte kämpfen u. a. mit Problemen bei der großtechnischen Umsetzung. Viele Fragestellungen hinsichtlich Hydratationsmechanismen, Betontechnologie, struktureller Eigenschaften und Dauerhaftigkeit müssen noch gelöst werden. Alle diese Punkte müssen auch in das internationale Normenwerk einfließen, um bei entsprechender Eignung eine Anwendung im stahlbewehrten Beton zu ermöglichen, sofern die Anwendung in strukturellem Beton nicht über nationale oder europäische Zulassungen geregelt werden. Daneben muss zudem eine Marktakzeptanz geschaffen werden, bei der auch andere Faktoren wie Verfügbarkeit (Rohmaterialien), Wirtschaftlichkeit (Kosten) und Ästhetik (z. B. Farbe) eine Rolle spielen. Gerade die Verfügbarkeit der Rohstoffe zur Herstellung der alternativen Bindemittel ist ein kritischer Punkt. So wird der am Markt verfügbare Hüttensand bereits weitgehend für Portlandzement verwendet. Es steht nicht viel zusätzliches Material zur Verfügung, um alkaliaktivierten Hüttensand zu produzieren. Ähnliches gilt für Calciumsulfoaluminatzemente, welche für ihre Herstellung eine kostengünstige Quelle von Al_2O_3 benötigen.

Andererseits werden alternative Bindemittel durchaus erfolgreich für Nischenanwendungen eingesetzt, speziell dort, wo ihre Eigenschaften denen des Portlandzementes überlegen sind (z. B. alkali-aktivierte Bindemittel bei Säureangriff). Auch Beispiele für strukturelle Anwendungen im Betonbereich sind z. B. für alkaliaktivierte Bindemittel und für Calciumsulfoaluminatzemente bekannt. Die Zukunft wird eine größere Vielfalt innerhalb der verwendeten Bindemittel bringen, unter Einbeziehung von lokalen Lösungen auf Basis von in der Nähe verfügbaren Primär- und Sekundärrohstoffen. Dieser Umgang mit einer größeren Diversität von Materialien wird eine Erhöhung der Anforderungen an das Knowhow der Bindemittelhersteller erfordern.

Alternative Bindemittelsysteme können alkaliaktivierte Bindemittel wie Geopolymere, und Alumosilikatische Polymere, Calcinierte Tone (Calciumsilikathydraten), oder Magnesiumverbindungen sein [4]. Bei Geopolymeren wird in der Regel eine druckwasserdichte Silikatmatrix gebildet, welche einen ausgezeichneten Randschluss zum eingebetteten Füllstoffkorn bildet. Calcinierte Tone basieren ebenfalls auf der Bildung von Quarz und/oder geeigneter Silikate, Branntkalk und Wasser. Im Gegensatz zu Portlandit wird kein Überschuss an Calciumoxid eingesetzt, was eine geringere CO_2 Abspaltung bei der Hydratation zur Folge hat. Magnesiumverbindungen wie die Magnesiumphospatzement eignen sich vorwiegend für

Nischenanwendungen. Ein bekannter Vertreter ist der so genannte Sorel-Zement (Magnesiumchlorid und Magnesiumoxid) [5].

Geopolymere sind 2-Komponentensysteme bestehend aus einem reaktiven Feststoff der Silizium- und Aluminiumoxide enthält (Metakaolin oder z.B. Ziegelmehl) und einem basischen Aktivator wie Alkalihydroxiden oder -silikaten, gelöst in Wasser (z. B. Wasserglas). Steine aus Geopolymeren weisen hohe Druckfestigkeiten (von bis zu 131 N/mm^2), gute Druckwasserdichtigkeiten, hohe Wasserdampfdurchlässigkeiten, geringe Porenwassergehalte und gute Brandschutzeigenschaften auf. Darüber hinaus haften sie auf beinahe allen Oberflächen und haben, im Vergleich zur Zementhydratation, eine schnelle Festigkeitsentwicklung. Die Endfestigkeit kann im Idealfall bereits nach 1 h erreicht werden. Wie in Abbildung 10 gezeigt konnten erfolgreich Ziegelsteine mit verschiedenen Zusammensetzungen und Geopolymeren als Bindemittel hergestellt werden.

Quelle: HeiQ RAS AG

Abbildung 10: Bilder von Probekörpern mit Geopolymer als alternatives Bindersystem. Links: Stein aus Compound, Ziegelmehl, Sand, Wasser und Geopolymer als Aktivator. Mitte: Stein aus Sand, Ziegelmehl, Geopolymer und Natronlauge als Aktivator. Rechts: Stein aus Ziegelmehl und Geopolymer als Aktivator. Anmerkung: Weiße Ausblühungen des verwendeten Geopolymers sind sichtbar.

Insgesamt handelt es sich bei den meisten, am Markt befindlichen Bindemittelalternativen im Wesentlichen um kalksteinmehlarme Rezepturen oder um Rezepturen, bei denen Zementklinker durch andere reaktive Stoffe ersetzt wird (k-Wert Äquivalent). Dies führt zu einer Reduktion der ausgestoßenen Menge an CO_2/cm^3. Eine wichtige Einschränkung ist, dass die Eigenschaften des Endprodukts stark von der verwendeten Rezeptur abhängig sind. Aus diesem Grund können die Rezepturen nicht beliebig geändert werden. Weiterhin müssen auch bei alternativen Bindemitteln ggf. die CO_2-Quellen genau betrachtet werden, da auch bei deren Herstellung CO_2 freigesetzt wird. So ist zum Beispiel die Herstellung von Geopolymer (z. B.: Wasserglas) sehr energieintensiv und auch die verwendeten reaktiven Feststoffe sind oftmals Abfallstoffe aus energieintensiven Produktionen. Bei calciniertem Ton ist die CO_2-Bilanz stark abhängig von der Zusammensetzung des Ausgangstones, so weisen z. B. kalkhaltige Tone eine deutlich schlechtere Bilanz auf. Dennoch stellen die angegebenen Alternativen insgesamt und die Geopolymere im Besonderen vielversprechende Kandidaten dar.

Die Ergebnisse zeigen, dass Meilenstein 1 innerhalb dieses Arbeitspaketes erreicht wurde.

Arbeitspaket 3: Marktanalyse und Marktpotential

Dieses Arbeitspaket bündelt die Aktivitäten und Analysen, die im Zusammenhang mit dem Marktpotential des innovativen Wandbaustoffs stehen. Bereits im Herbst 2020 wurde die Entscheidung getroffen, die erfolgreiche Entwicklung des Kaltziegels im Rahmen des Forschungsvorhabens "Kaltziegel – ein Recyclingfunktionswerkstoff" im "Bayerischen Programm neue Werkstoffe" des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie (Durchführungszeitraum 08/2016 bis 01/2020) in Form einer Pressemitteilung zu kommunizieren. Dies fand großen Anklang und die Inhalte wurden in unterschiedlichen Medien publiziert. Dies führte zu einer großen Resonanz mit zahlreichen Anfragen an das

Unternehmen. Im Rahmen des gegenständlichen Vorhabens wurden die Anfragen systematisch erfasst. Das breite Interesse am Markt ist im Folgenden anhand mehrerer Beispiele ausgeführt.

BR-Dokumentation „Gut zu wissen – Bauen ohne Beton“

Im Rahmen der Dokumentationsreihe „Gut zu wissen“ des Bayerischen Rundfunks wurden in einer zweiteiligen Serie „Bauen ohne Beton“ Baustoffe näher betrachtet, die als Alternative zu Beton fungieren können und deren Einsatz insbesondere zum nachhaltigen Bauen beiträgt. Als regionaler Baustoff ist Ziegel hierbei besonders im Fokus. In einem umfangreichen Projekt hat der Bayerische Rundfunk die gesamte Produktionskette des Ziegels vom Rohstoffabbau bis zur Auslieferung an den Kunden dokumentiert. Als Alleinstellungsmerkmal in der Branche ist insbesondere auch das Recycling-Konzept von Leipfinger-Bader für Ziegel Bestandteil der Dokumentation. Die Entwicklung des Kaltziegels schließt dabei den Stoffkreislauf für rezyklierte Ziegelfeinmaterialien. Die Dokumentation kann in unterschiedlichen Mediatheken abgerufen werden. Zahlreiche Anfragen ans Unternehmen zeugen von einer sehr breiten Resonanz.

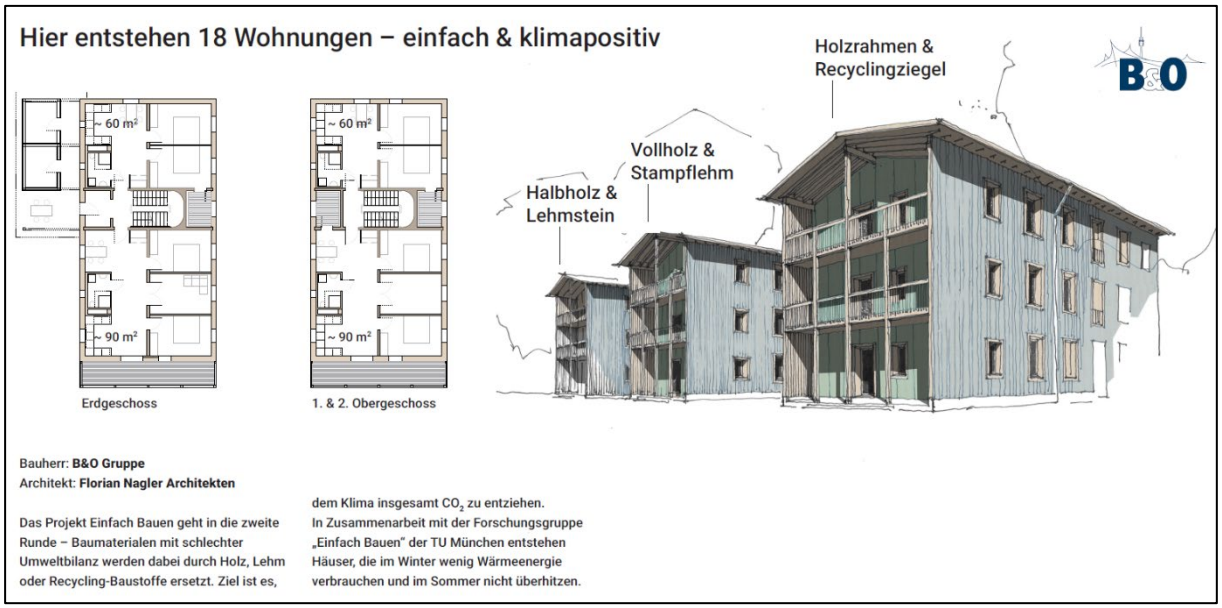
Foto: Leipfinger-Bader GmbH

Abbildung 11: Interview bei Leipfinger-Bader an einer Kaltziegel-Demonstrationswand

Forschungshäuser 2 Bad Aibling

Basierend auf der Initiative „Einfach Bauen“ unter der Führung von Prof. Florian Nagler wurden in Bad Aibling durch die B&O Gruppe drei Forschungshäuser errichtet. Dabei wurden unterschiedliche baukonstruktive Konzepte umgesetzt. Ein zentraler Aspekt des Gesamtkonzepts ist die wissenschaftliche Begleitung und Bewertung der Varianten.

Die Errichtung drei weiterer Häuser am Standort Bad Aibling ist die Fortführung des erfolgreichen Konzepts (Forschungshäuser 2). Für eine der Varianten ist der Kaltziegel als Baustoff für die Innenwände vorgesehen. Die Umsetzung ist für 2024 vorgesehen. Nachfolgende Abbildung zeigt das Konzept.



Quelle: Florian Nagler Architekten

Abbildung 12: Bautafel zu „Forschungshäuser 2"

Ausstellung Raumortpraxis, Hombroich

Auf dem Gelände der „Raketenstation" der Stiftung Insel Hombroich findet ab September 2022 die Ausstellung „Raumortpraxis: Impulse für neue Lebensentwürfe" des Architekturbüros Hoidn Wang Partner aus Berlin statt. Dort werden Ideen und Konzepte zu den Themen Renaturierung, Umnutzung und nachhaltige Siedlungsformen ausgestellt. Als innovativer, ressourceneffizienter Baustoff wurde dort auch die Installation einer Anordnung aus Kaltziegel umgesetzt.

Foto: Leipfinger-Bader GmbH

Abbildung 13: Kaltziegel-Installation auf der Terrasse des Siza-Pavillons, Raketenstation Hombroich

Die aufgeführten Beispiele zeigen exemplarisch das große Interesse an der Produkt-Neuentwicklung. Weitere Anfragen für konkrete Projekte liegen vor. Insbesondere bei Bau-Projekten mit besonderem Fokus auf Ressourceneffizienz und Innovation wird der Einsatz in Betracht gezogen.

Arbeitspaket 4: Fertigungsprozess

Der Herstellungsprozess des Kaltziegels besteht aus nachfolgenden Teilschritten:

- Annahme und Zwischenlagerung von Rohstoffen,
- Dosieren und Mischen der Rezeptur-Komponenten,
- Formgebung,
- Aushärtung,
- Nachbearbeitung (optional) und
- Paketierung, Verpackung, Lagerung.

Im Rahmen der Projektarbeit wurde eine umfassende Recherche nach geeigneten Anlagenbauern durchgeführt. Mit den aussichtsreichsten potenziellen Partnern wurden detaillierte Beratungsgespräche abgehalten.

Folgende Konzepte sind daraus hervorgegangen:

- Drei Komplettangebote „grüne Wiese“; Großserie,
- Ein individuelles Anlagenkonzept Bestandsgebäude; Großserie,
- Ein individuelles Anlagenkonzept mit Fokus Trocknung, Nachbearbeitung; Großserie und
- Ein Angebot Kleinserienanlage (beauftragt).

Ebenfalls wurde die Zielgröße der jährlichen Produktionskapazität mit den Experten des Anlagenbaus erarbeitet. Je nach Schichtsystem sind die Anlagenkonzepte im großtechnischen Maßstab für einen relativ großen Bereich von ca. 50.000 t bis ca. 100.000 t pro Jahr ausgerichtet. Die erhaltenen Konzepte unterschieden sich hierbei wenig.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die gegenwärtige Situation im Anlagenbau, auch bedingt durch die unsichere geopolitische Lage, eine große Herausforderung für alle Seiten darstellt, insbesondere für sehr umfangreiche Vorhaben. Die derzeitigen Kapazitäten sind nahezu vollständig ausgeschöpft. Für die Abarbeitung möglicher Neuaufträge muss meist ein Vorlauf von mehr als 12 Monaten eingeplant werden. Liefertermine und Preise sind von großer Volatilität gekennzeichnet. Daraus resultierend wurde eine Kleinserienanlage mit vergleichsweise geringer Lieferzeit detailliert projektiert. Diese Anlage kann modular erweitert werden und ist in den zentralen Produktionsschritten mit der Großserie vergleichbar. Je nach Ausbaustufe und Betriebsweise lassen sich so mehrere tausend Tonnen Endprodukt pro Jahr produzieren. Hinsichtlich der geographischen Vorortung steht dem Unternehmen ein Erweiterungsstandort zur Verfügung, der logistisch günstig zu den Produktionsstandorten für Hintermauerziegel und den süddeutschen Ballungsräumen gelegen ist.

Anhand der vorliegenden Angebote ist festzustellen, dass eine Produktionskapazität von 100.000 t pro Jahr technisch umsetzbar ist. Die Kostenstrukturen hierfür liegen vor (Meilenstein 2 und 3).

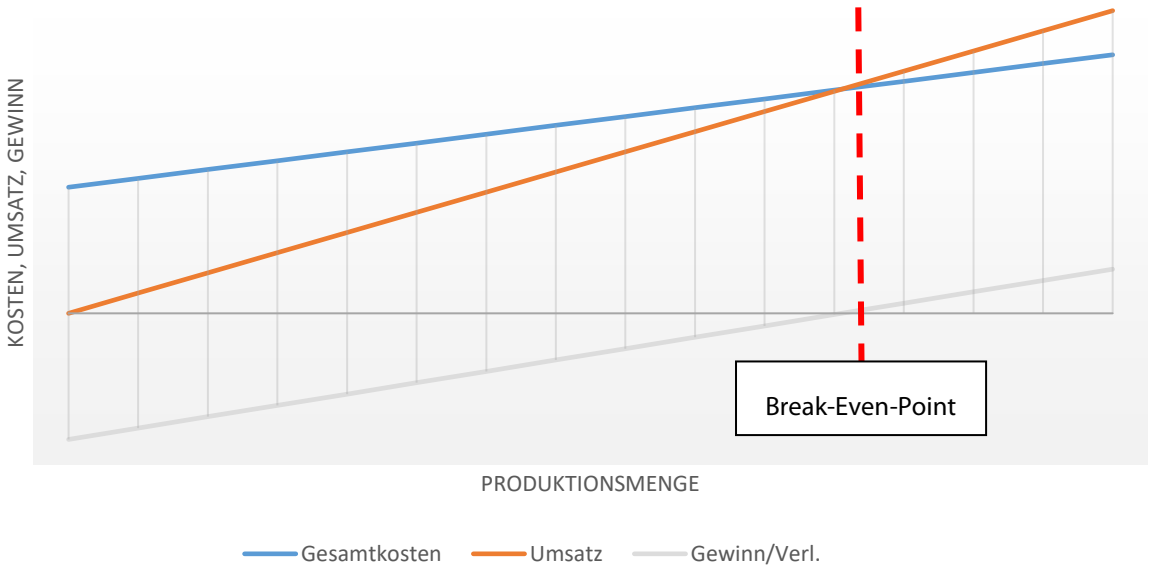
Die Ergebnisse aus Arbeitspaket 4 fließen in die Bilanzierungen des folgenden Arbeitspakets ein.

Arbeitspaket 5: Bilanzierung

Das Arbeitspaket betrachtet sowohl ökonomische wie auch ökologische Aspekte.

<u>Ökonomische Bilanzierung</u>

Hier wird die Methode der Break-Even-Point-Analyse angewendet. Dabei werden alle Kostenfaktoren ermittelt (fixe Anteile, wie auch variable Bestandteile) und den produktionsmengenabhängigen Umsatzerlösen gegenübergestellt. Bezugszeitraum ist ein Geschäftsjahr. Die Differenz der Gesamtkosten und der Umsatzerlöse bildet den Gewinn. Der Break-Even-Point bezeichnet diejenige jährliche Produktionsmenge, ab der ein Gewinn erreicht wird. In nachfolgender Abbildung ist die Systematik grafisch dargestellt. Die rote Linie zeigt die Lage des Break Even-Points.



Quelle: Leipfinger-Bader GmbH

Abbildung 14: Grafische Darstellung der Break-Even-Point-Analyse

Nachfolgende Tabelle untergliedert die wichtigsten Kostenpositionen. Fixkosten, sofern sie nicht turnusmäßig anfallen, fließen über die entsprechenden jährlichen Abschreibungen in die Berechnung der jährlichen Gesamtkosten ein. Variable Bestandteile werden in diesem linearen Ansatz produktionsmengenabhängig hinzugezogen. Jährliche Gesamtkosten können somit in Abhängigkeit der Produktionsmenge ermittelt werden.

Tabelle 3: Fixe und variable Kostenpositionen

Fix	**Variabel**
Grundstück inkl. Planung und Erschließung	Roh-, Hilfs-, Betriebsstoffe
Gebäudeerrichtung	Energiekosten
Produktionsanlagen	Fahrzeugkosten (Leasing)
Personalkosten	Vertriebs- und Verwaltungskosten
Sonstiges / Unvorhergesehenes	Sonstiges / Unvorhergesehenes

Die Investition in Produktionstechnologie ist mit einer gewissen jährlichen Produktionsmenge verbunden. Anhand der Lage des Break-Even-Points kann bewertet werden, ob eine Investitionsentscheidung als ökonomisch sinnvoll erachtet werden kann:

- Break-Even-Point geringer als technische Produktionskapazität → positive Indikation für Investitionsentscheidung und
- Break-Even-Point größer als technische Produktionskapazität → negative Indikation für Investitionsentscheidung.

Singuläre Parameterkonstellationen ergeben in den seltensten Fällen belastbare Entscheidungsgrundlagen. Bei wiederholter Anwendung der dargestellten Methode kann vergleichsweise unkompliziert der Effekt von Veränderungen in den Eingangsdaten untersucht werden und somit eine Aussage zu den besonders einflussreichen Eingangsparametern getroffen werden.

Die als Angebot erhaltenen Anlagenkonzepte sind im Schichtbetrieb für eine technische Produktionskapazität von ca. 100.000 t pro Jahr ausgelegt. Nach Durchführung der Analysen liegt der Break-Even-Point bei ca. 85.000 t pro Jahr. Oben genanntes Entscheidungskriterium zu Gunsten einer Investition ist somit erfüllt. Gleichzeitig zeigt sich über die Modellierung der Unsicherheiten, dass bereits ab einer Kostensteigerung von ca. 7 % dieses Kriterium nicht mehr erfüllt ist. Dies liegt unterhalb der Inflationsrate im Jahr 2022. Eine analoge Anpassung der Umsatzerlöse gleicht diesen Effekt wieder aus. Vor dem Hintergrund steigender Zinssätze für die Baufinanzierung und dem Wegfall bestimmter Förderungen für energieeffizientes Bauen sind die konjunkturellen Erwartungen in der Baubranche gedämpft. Eine vollständige Umlage der Kostensteigerungen auf die Verkaufspreise ist tendenziell nicht zu erwarten. Zusammenfassend ist die Investitionsentscheidung daher mit einem vergleichsweise großen ökonomischen Risiko verbunden.

Umweltrelevante Aspekte/ Ökologische Bilanzierung

Die Ökobilanzierung ermöglicht es unter anderem, Produkte und Dienstleistungen bezüglich ihrer Auswirkungen auf die Umwelt quantitativ zu bewerten. In den in der Baustoffbranche verbreiteten Umweltproduktdeklarationen wird auf dieses Instrumentarium zurückgegriffen. Gleichzeitig bieten diese Deklarationen eine breite Vergleichsbasis für die Bewertung des Kaltziegels. Die Auswirkungen erstrecken sich auf verschiedene Umweltwirkungskategorien (Treibhauspotential in CO_2-Äquivalenten je Produkteinheit, Ozonabbaupotential in CFC11-Äquivalenten je Produkteinheit, usw.) sowie Lebenszyklusabschnitte (A1: Rohstoffbereitstellung, A2: Transport zum Hersteller, A3: Herstellung).

Produktionsstadium			Stadium der Errichtung des Bauwerks		Nutzungsstadium							Entsorgungsstadium				Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenzen
Rohstoffversorgung	Transport	Herstellung	Transport vom Hersteller zum Verwendungsort	Montage	Nutzung/Anwendung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Erneuerung	Energieeinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Wassereinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Rückbau/Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Beseitigung	Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- oder Recyclingpotenzial
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D

Quelle: Leipfinger-Bader nach Vorlage EPD

Abbildung 15: Lebenszyklusabschnitte

Für die Herstellung des Kaltziegels wurden diverse Mischungen erarbeitet, die sich auch unter ökobilanzieller Betrachtung in ihren Umweltauswirkungen unterscheiden. Aufgrund dieser Varianz erfolgt zunächst eine verstärkte methodische Auseinandersetzung mit dem Sachverhalt.

Es sollen primär dem Produkt direkt zurechenbare Auswirkungen ermittelt werden, also die Lebenszyklusabschnitte A1-A3. Motivation hierfür ist die breite Vergleichsbasis für diese Abschnitte, sowie die unmittelbare Zuordnung zum Produzenten.

In diesem Entwicklungsstadium, in dem die endgültige Ausprägung des Produktionsverfahrens noch nicht vorliegt, ist die Modellierung der Verfahren von entscheidender Bedeutung. Unterschiedliche Rezepturen liegen demgegenüber aus der Entwicklungstätigkeit bereits vor.

In der ökobilanziellen Betrachtung werden die wesentlichen Rezeptur-Bestandteile Ziegelrezyklat, (RC-) Sande, Bindemittel-Compound und Wasser berücksichtigt. Für die Bereitstellung (Rohstoffabbau und nachgelagerte Prozesse) von Sanden, Bindemitteln und Wasser werden zur Bilanzierung vorhandene Kennwerte verwendet. Rezyklate haben als Sekundärmaterialien keinen Beitrag. Für alle Feststoffe muss zusätzlich auch der Transport berücksichtigt werden.

Für den Produktionsprozess müssen allen Prozessschritten entsprechende Energieverbräuche zugeordnet werden. Da für die Produktion keine thermische Energie erforderlich ist, reduziert sich die Betrachtung auf die

Ermittlung der Stromverbrauchsmengen im Produktionsprozess. Dazu können Abschätzungen an Hand der installierten Leistungen der Aggregate gemäß den vorhandenen Angeboten herangezogen werden und mit zu erwartenden Auslastungen verknüpft werden. Für bestimmte Teilprozesse (z. B. Planschleifen) können Erfahrungswerte aus der Ziegelproduktion übertragen werden.

Verschiedene Rezepturen führen zu sehr unterschiedlichen Emissionswerten. Der ermittelte Wertebereich liegt bei ca. 35 – 65 kg CO_2eq pro t Kaltziegel. Im Vergleich zu anderen Baustoffen kann dieser Wertebereich als vergleichsweise niedrig angesehen werden. Dies ist technisch begründbar. Insbesondere feine Ziegelmaterialien wie Schleifstaub weisen puzzolanische Eigenschaften auf und können einen positiven Beitrag zu Festigkeitsentwicklung leisten. Die Berechnungen zeigen auch, dass das Gesamtergebnis maßgeblich durch den Anteil an Bindemittel-Compound beeinflusst wird. Der Anteil der Emissionen, der dem Bindemittel zuzuordnen ist, beträgt rezepturabhängig mehr als 70 %. Der Bindemittel-Anteil kann allerdings nicht beliebig reduziert werden. Einerseits werden dadurch die Produkteigenschaften, insbesondere Druckfestigkeit, beeinflusst. Andererseits gibt es Wechselwirkungen zu relevanten Produktions-Parametern, beispielsweise der Zeitdauer, ab wann das Produkt frühestens palettiert werden kann.

Arbeitspaket 6: Abschlussarbeiten

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden abschließende Tätigkeiten im Projekt durchgeführt. Insbesondere ist hier auf die Erstellung des Endberichtes zu verweisen.

Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Die Ergebnisse der Durchführbarkeitsstudie können wie folgt zusammengefasst werden:

Die Analyse der Stoffströme hat gezeigt, dass unterschiedliche Sekundärmaterialien für den Einsatz im Kaltziegel zur Verfügung stehen. Diese erstrecken sich über einen breiten Bereich von sehr homogenen Materialien aus Produktionsprozessen (z. B. Schleifstaub) bis sehr heterogene Materialien, deren Qualitätskontrolle entsprechend hohe Aufwände nach sich zieht. Methoden zur Qualitätssicherung wurden identifiziert. Die praktische Umsetzung für den konkreten Einzelfall ist zu ermitteln.

Das Konzept des Kaltziegels ist für unterschiedliche Bindemittel geeignet. Alternativen zu mineralischen Bindemitteln auf zementärer Basis wurden identifiziert und exemplarisch im Versuch getestet. In der Baupraxis sind sie noch wenig vertreten. Es bietet sich daher ein Stufenmodell an, bei dem im Produktionsprozess je nach Verfügbarkeit, Preis und technischen Eigenschaften etablierte Bindemittel durch möglichst nachhaltige Alternativen ersetzt werden.

Die Produktionsprozesse konnten mit Hilfe von Anlagenbauern geplant und mit einer groben Kostenstruktur hinterlegt werden. Die technische Umsetzbarkeit ist nach aktuellem Kenntnisstand gegeben. Limitierend wirkt sich die aktuelle Auftragslage im Maschinenbau mit langen Lieferzeiten und nicht kalkulierbaren Preisentwicklungen aus. Als Zwischenlösung ist daher der Aufbau einer Kleinserienproduktion vorgesehen.

Sehr positiv ist das große öffentliche Interesse zu sehen. Das Marktpotential wird durch konkrete Anfragen bestätigt. Mit einer gewissen Unsicherheit ist belegt, ob und in welchen Maß die Anfrage zu tatsächlichen Aufträgen werden.

Zusammenführung der Zwischenergebnisse zum Endergebnis

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass im Rahmen der Durchführbarkeitsstudie keine grundsätzlichen Hemmnisse für das Konzept identifiziert wurden. Aufgrund der aktuellen Unsicherheit vor allem in der Kostenstruktur ist der Aufbau einer Kleinserienproduktion als Zwischenlösung als sinnvoll zu bewerten.

Fazit und Ausblick

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die grundlegenden Rahmenbedingungen günstige Voraussetzungen für den Markteintritt des Kaltziegels und damit verbunden den Aufbau einer großtechnischen Produktion bieten. Insbesondere die zunehmende Relevanz von ressourceneffizienten Produktlösungen bei der Umsetzung von Bauvorhaben begünstigt diese Entwicklung.

Wie die Betrachtung von Stoffströmen und Bindemittelalternativen zeigt, handelt es sich um ein sehr flexibles Produktkonzept, das keineswegs auf einzelne Rohstoffe und deren Verfügbarkeit beschränkt ist. Zukünftig soll es einen wesentlichen Beitrag zur hochwertigen Kreislaufführung von diversen Sekundärrohstoffen im Gebäudesektor liefern. Hinsichtlich der Skalierung der Produktion sind neben stationären Lösungen auch mobile Konzepte denkbar, wodurch der logistische Aufwand für den Materialumschlag auf ein Mindestmaß reduziert werden könnte.

In die Gesamtbetrachtung müssen jedoch auch limitierende Faktoren einbezogen werden. Die gegenwärtige instabile geopolitische Lage mit Einschränkungen bei Materialverfügbarkeit, ausgeschöpften Kapazitäten im Maschinenbau und schwer zu kalkulierenden Preisentwicklungen beeinträchtigen die Planbarkeit insbesondere von umfangreichen Investitionsvorhaben erheblich.

Fotos: Leipfinger-Bader GmbH

Abbildung 16: Kaltziegel mit unterschiedlichen Rezepturen

Literaturverzeichnis

[1] N. N.: RE-USE UND RECYCLING VON ZIEGELN. Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V., 2020

[2] Müller, Anette. Baustoffrecycling: Entstehung-Aufbereitung-Verwertung. Springer-Verlag, 2018.

[3] Winnefeld, F., Leemann, A.: Nachhaltige Betone mit alternativen Bindemittelsystemen – was wird die Zukunft bringen? Konferenz: FSKB-Seminar "Am Puls der Betontechnologie – neue Erkenntnisse", Dagmersellen (CH), 25.04.2017

[4] Provis, John L., and Jannie SJ Van Deventer, eds. Alkali activated materials: state-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM. Vol. 13. Springer Science & Business Media, 2013.

[5] Walling, Sam A., and John L. Provis. "Magnesia-based cements: a journey of 150 years, and cements for the future?." Chemical reviews 116.7 (2016): 4170-4204.Sam A. Walling and John L. Provis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ziegel-Rezyklat 7

Abbildung 2: Geschlossene Kreisläufe Ziegelrecycling; System Leipfinger-Bader 9

Abbildung 3: Kaltziegel-Geometrie mit Bemaßung in cm 10

Abbildung 4: Kaltziegel-Verarbeitung beim Aufbau einer Prüfwand 10

Abbildung 5: Projektstruktur 13

Abbildung 6: Erstellung von Probekörper im Labormaßstab 14

Abbildung 7: Probekörper nach der Vorbereitung für die Prüfung 15

Abbildung 8: Ergebnisauswertung unterschiedlicher Materialtests 15

Abbildung 9: Physikochemische Charakterisierung von rezyklierten Ausgangsstoffen für die Ziegel Produktion. Links: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen. Rechts: EDS-Spektren der Materialien mit der tabellierten chemischen Zusammensetzung. 17

Abbildung 10: Bilder von Probekörpern mit Geopolymer als alternatives Bindersystem. Links: Stein aus Compound, Ziegelmehl, Sand, Wasser und Geopolymer als Aktivator. Mitte: Stein aus Sand, Ziegelmehl, Geopolymer und Natronlauge als Aktivator. Rechts: Stein aus Ziegelmehl und Geopolymer als Aktivator. Anmerkung: Weiße Ausblühungen des verwendeten Geopolymers sind sichtbar. 20

Abbildung 11: Interview bei Leipfinger-Bader an einer Kaltziegel-Demonstrationswand 21

Abbildung 12: Bautafel zu „Forschungshäuser 2“ 22

Abbildung 13: Kaltziegel-Installation auf der Terrasse des Siza-Pavillons, Raketenstation Hombroich 23

Abbildung 14: Grafische Darstellung der Break-Even-Point-Analyse 25

Abbildung 15: Lebenszyklusabschnitte 26

Abbildung 16: Kaltziegel mit unterschiedlichen Rezepturen 29

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bauphysikalische Eigenschaften 11
Tabelle 2: Aufzählung möglicher Sensorsysteme zur Differenzierung von Sortiergut 18
Tabelle 3: Fixe und variable Kostenpositionen 25