

BBSR-
Online-Publikation
66/2024

Gipsgebundene Bauplatten aus feinem Rezyklat-Porenbeton-Brechsand

von

Hakan Aycil

Dr. Simon Eichhorn

Simon Ballüer

Yuwei Chang

Prof. Dr. Ariane Ruff

Prof. Dr.-Ing. Daniel Ufermann-Wallmeier



Gipsgebundene Bauplatten aus feinem Rezyklat-Porenbeton-Brechsand

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: 10.08.18.7-21.18

Projektlaufzeit: 10.2021 bis 09.2023

IMPRESSUM

Herausgeber

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

Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Daniel Wöffen
daniel.woeffen@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien – IWT, Bremen
Prof. Dr.-Ing. Daniel Ufermann-Wallmeier (Projektleitung 1)

Dipl.-Ing. (FH) Hakan Aycil
aycil@mpa-bremen.de

Hochschule Nordhausen/ThiWert, Nordhausen
Prof. Dr. Arianne Ruff (Projektleitung 2)

Dr. rer. nat. Simon Eichhorn
simon.eichhorn@hs-nordhausen.de

Simon Ballüer, B. Eng.
simon.ballueer@hs-nordhausen.de

Yuwei Chang, M. Sc.
yuwei.chang@hs-nordhausen.de

Redaktion

Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien – IWT, Bremen
Dipl.-Ing. (FH) Hakan Aycil

Hochschule Nordhausen/ThiWert, Nordhausen
Simon Ballüer, B. Eng.

Stand

Januar 2024

Gestaltung

Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien – IWT, Bremen
Dipl.-Ing. (FH) Hakan Aycil

Hochschule Nordhausen/ThiWert, Nordhausen
Simon Ballüer, B. Eng., Yuwei Chang, M. Sc.

Bildnachweis

Titelbild: Hakan Aycil
Hakan Aycil: S. 22–23, 82; Simon Ballüer: S. 80; Yuwei Chang: S. 27–28; Simon Eichhorn: S. 17–20, 22–23, 73–74, 77–78; Frank Schlütter: 55–69

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

Aycil, Hakan; Eichhorn, Simon; Ballüer, Simon; Chang, Yuwei; Ruff, Arianne; Ufermann-Wallmeier, Daniel, 2024: Gipsgebundene Bauplatten aus feinem Rezyklat-Porenbeton-Brechsand. BBSR-Online-Publikation 66/2024, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract	7
Einführung	8
Themenfeld	8
Untersuchungsgegenstand	9
Problemstellung	10
Stand der Forschung	10
Forschungslücke/Entwicklungsbedarf	11
Zielstellung	12
Konkrete Projektziele	12
Übergeordnete Ziele	12
Forschungsdesign	13
Arbeitshypothese	13
Methodischer Ansatz	13
Projektteam	14
Projektverlauf	16
Ergebnisse	17
Ausgangsstoffe	17
Porenbetonabbruch	17
Bindemittel	18
Zusatzmittel	21
Aufbereitung Porenbetonabbruch/Porenbetonneuware	22
Eigenschaften der Porenbetongranulate	24
Korngrößenverteilung	24
Schüttdichte	25
Wasseraufnahme und Rohdichte	25
Sulfatgehalt	26
Weißgradmessung	26
Versuchsprogramm	28
Prüfungen	28
Untersuchungen am Gipsleim	30
Substitution des Gipsgehalts von 25, 50 und 75 Ma.-% durch feines PBG-A	31
Substitution des Gipsgehaltes zwischen 30 und 45 Ma.-% durch feines PBG-A	34
Exemplarischer Einsatz von feinem PBG-N und grobem PBG-A	36
Einsatz von zwei unterschiedlichen Verzögerern (VZ1 und VZ2)	39
Einsatz eines Luftporenbildners (LP) in Kombination mit dem Verzögerer VZ1	42

Einsatz eines Fließmittels (FM) in Kombination mit dem Verzögerer VZ1	44
Einsatz eines Fließmittels (FM) in Kombination mit dem Verzögerer VZ1 und LP	46
Einsatz von Recyclinggips	48
Untersuchung eines zweiten Recyclingzyklus`	51
Mikroskopische Untersuchungen	54
Dauerhaftigkeitsuntersuchungen	70
Labor-Probepplatten	72
Demonstrator	75
Industrierversuch	81
Zusammenfassung	83
Fazit und Ausblick	85
Literaturverzeichnis	86
Abbildungsverzeichnis	88
Tabellenverzeichnis	91
Abkürzungsverzeichnis	93

Kurzfassung

Im Fokus dieses Forschungsvorhabens steht die grundlagenorientierte Entwicklung und Erprobung eines sulfatisch gebundenen Mörtels unter erstmaliger Verwendung von Porenbeton-Brechsand zur Herstellung von neuen, innovativen Bauplatten in Anlehnung an gängige Gipsbaustoffe. Umgesetzt wird die Arbeitshypothese durch die systematische Laborentwicklung zur Erfassung und Optimierung aller relevanten mörteltechnischen Eigenschaften. Aus geeigneten Rezepturen werden weiterführend im Laboratoriumsmaßstab Platten größerer Formate hergestellt. Zudem wird die Umsetzung auf der Anlage eines Industriepartners erprobt. Neben eines handelsüblichen Stuckgipses auf Naturgipsbasis wird ein Recyclinggips eingesetzt. Auch die Untersuchung eines zweiten Recyclingzyklus' ist Gegenstand dieses Projektes.

Sämtliche Untersuchungen sind ergebnisoffen und verstehen sich als systematische Grundlagenforschung für diese neue, innovative Arbeitshypothese mit dem Ziel, mit minimalen Gips- und maximalen Porenbeton-Brechsandgehalten neue, ressourceneffiziente und bautechnisch hochwertige Gipsbauplatten herzustellen.

Abstract

The focus of this research project is the fundamental development of a sulfate-bound mortar using autoclaved aerated concrete (AAC) rubble from construction and demolition (C&D) wastes for the first time to produce new, innovative building panels based on common gypsum building materials. The working hypothesis is implemented through systematic laboratory development to record and optimize all relevant mortar properties. Gypsum plasterboards in larger formats are then produced on a laboratory scale from suitable recipes. The implementation is also being tested on an industrial partner's facility. In addition to a commercially available natural gypsum-based stucco, recycled gypsum is used. The investigation of a second recycling cycle is also the subject of this project.

All investigations are open-ended and are seen as systematic basic research for this new, innovative working hypothesis with the aim of producing new, resource-efficient and structurally high-quality gypsum plasterboards with minimum gypsum and maximum AAC rubble contents.

Einführung

Der Ausstieg aus der Kohleverstromung, der durch die Bundesregierung im Jahr 2020 beschlossen wurde, hat weitreichende Auswirkungen [1]. Primär betrifft dies den Strommarkt und dessen Zusammensetzung, ferner gibt es sekundäre Auswirkungen auf die Verfügbarkeit eines Rohstoffes, der für die Bauindustrie mittlerweile nicht mehr wegzudenken ist. REA-Gips, ein Rohmaterial, das bei der Rauchgasreinigung in Kohlekraftwerken gewonnen wird, diente der gipsverarbeitenden Industrie über Jahre als beständige Rohstoffquelle mit gleichbleibender Qualität.

Der Wegfall des REA-Gipses birgt die Besonderheit, dass annähernd 50 % der derzeit verarbeiteten Gipsmengen in Deutschland substituiert werden müssen [2]. Dieser Umstand der Rohstofflücke lässt sich durch verschiedene Mechanismen mindern. Varianten, wie die Steigerung des Naturgipsabbaus, Erhöhung der Recyclingquote, weitere Nutzung technischer Gipse oder der Import von Gipsen, sind Möglichkeiten, den REA-Gipsanteil durch andere Gipsquellen zu ersetzen. Nicht außer Acht gelassen werden darf auch die Substitution des Gipses in gipsgebundenen Produkten durch die Verwendung mineralischer Füllstoffe. Der Einsatz von feinen Porenbeton-Brechsanden in gipsgebundenen Bauplatten soll dazu beitragen, Alternativen aufzuzeigen, wie Gipsressourcen eingespart werden können und derzeit nicht genutzte Potenziale der Porenbeton-Brechsande einer Wiederverwertung zugeführt werden.

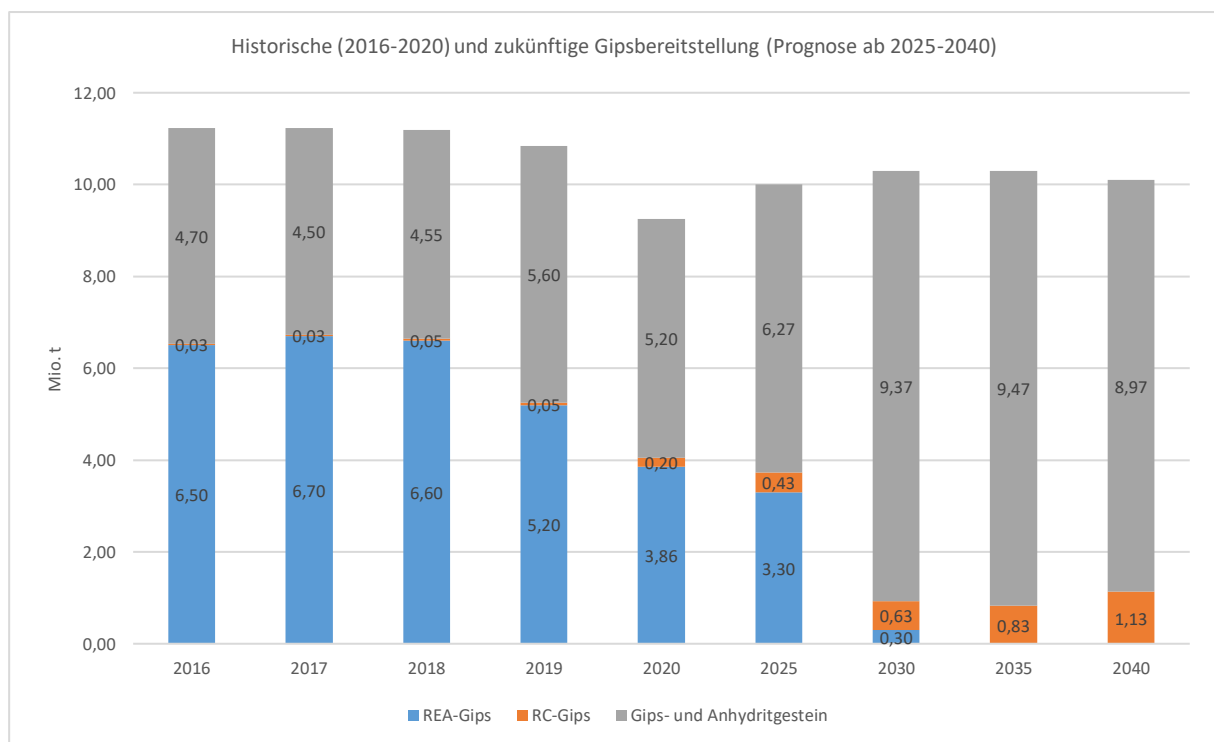


Abbildung 1: Historische und zukünftige Gipsbereitstellung

Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Rohstoffkonferenz 2022 Rohstoffversorgung Deutschland [3]

Themenfeld

Im Bereich alternativer Trockenbaustoffe soll das vorliegende Forschungsprojekt, bearbeitet von den beiden Forschungsstellen Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien - IWT [Leibniz-IWT] und der Hochschule Nordhausen/Thüringer Innovationszentrum für Wertstoffe [HSN/ThiWert], einen Beitrag dazu leisten, Lösungen für die Herausforderungen aus den Bereichen der Gipsverknappung und der Verwertung von Porenbetonabbruch zu entwickeln. Im Forschungsprojekt wurde untersucht, ob feiner Porenbeton-Brechsand

zur Substitution von Gips in gipsgebundenen Produkten dazu beitragen kann, die sich auftuende Gipsrohstofflücke zu verringern.

Untersuchungsgegenstand

Die Erkenntnisse zum Einsatz feiner Porenbeton-Brechsande in Gipsbaustoffen sollen ein neues Baustoffkonzept für ressourcenschonende Innenbaustoffe aufzeigen und tragen zu einer innovativen und nachhaltigen Entwicklung im Bauwesen bei. Die Erforschung im Rahmen des Vorhabens hat das Ziel, gipsgebundene Baustoffe mit Porenbetonbruch (PB-Bruch) zu entwickeln und im Weiteren die Grundlagen im Umgang und der Herstellung solcher Baustoffe zu beleuchten. Der wissenschaftliche Ansatz zur Herstellung von Innenbaustoffen aus PB-Bruch mit sulfatischer Bindung dient dem Wissenszuwachs und bietet eine Basis für die Prozesskette im Bau- und Ressourcenschutz. Geprüft wurde die Einbindung feiner PB-Brechsande zur Reduzierung des Gipsgehaltes in bindemittel-minimierten Baustoffen vor dem Hintergrund, vergleichbare bzw. nutzbare Produkteigenschaften zu erzeugen. Das Forschungsvorhaben soll die Ressourceneffizienz gipsgebundener Innenbaustoffe durch den bautechnischen Einsatz der mit großen Mengen „grauer“ Energien behafteten PB-Brechsande steigern.

Problemstellung

Das Vorhaben vereint zwei Herausforderungen: Die Suche nach Verwertungswegen für Porenbetonabbruch und die Entwicklung bindemittel-minimierter gipsgebundener Bauplatten. Vor dem Hintergrund des Wegfalls der REA-Gipsmengen besteht die Notwendigkeit, weitere Forschungsaktivitäten im Bereich alternativer Trockenbaustoffe zu betreiben, um die Gips-Rohstofflücke nicht zu einem Großteil durch Naturgips ersetzen zu müssen. Sortenreiner PB-Bruch, z. B. aus Produktionsbruch/Verschnitt, wird bereits in die Produktionskette zurückgeführt bzw. als Ölbinder, Dachbegrünungssubstrat oder Hygienestreu genutzt. PB-Bruch aus dem Bauschutt enthält Anhaftungen, z. B. von Mörteln, Tapeten, etc. und wird meist deponiert. Das Potenzial dieses Abfallstromes kann möglicherweise zur Minimierung des Primärgipsbedarfs beitragen.

Stand der Forschung

Porenbeton hat keinen eigenen Abfallschlüssel. Die anfallenden Abbruchmengen können daher nur abgeschätzt werden. In [4] wird von einem steil ansteigenden Aufkommen von Altporenbeton in Deutschland berichtet. Die anfallenden Mengen erhöhten sich zwischen dem Jahr 2000 und dem Jahr 2020 von 160.000 m³ auf 1.200.000 m³. Bis zum Jahr 2050 wird mit mehr als 4 Mio. m³/a gerechnet.

Von einem Pilotversuch ist bekannt, dass Splitt aus Altporenbeton zur Herstellung von Primär-PB eingesetzt wurde [5]. Weiter wurden stoffliche Verwertungen zur Herstellung von Mörteln, Steinen [6] und Estrichen [7] aus PB-Granulaten erprobt. Auch nicht-stoffliche Verwertungen erfolgen, z. B. als Hygienestreu und als Ölbinder [8]. Die Porenbeton- und Zementindustrie testen gemeinsam den Einsatz von PB-Bruch zur Herstellung von Zementklinker [9]. Das Leibniz-IWT entwickelte bislang ein RC-Wandsystem aus PB-Granulaten bis zu einer Korngröße von 8 mm mit zementärer Bindung [10, 11]. Des Weiteren wurden leichte Werksteine durch die Einbettung grober PB-Granulate in geschäumte Matrizen entwickelt [10, 11]. Keiner der bislang aufgezeigten Wege hat sich jedoch in dem Maße durchgesetzt, als dass die anfallenden Mengen an PB-Bruch aufgefangen wurden.

Gips, welcher beliebig oft rezyklierbar ist, erfährt derzeit eine unzureichende Wiederverwendung in Bauprodukten. Dies beruht in erster Linie auf einer ungenügenden Rückführung von Gipsen aus verschiedenen Abfallströmen. Des Weiteren erschweren Störstoffe die hochwertige Aufbereitung. An diesen Punkten setzen aktuelle Forschungsprojekte an. Diese reichen von der gezielten Rückführung von Gipsabfällen, über das Erschließen von sekundären Gipsrohstoffquellen bis hin zur Substitution des Gipsbindemittels [12].

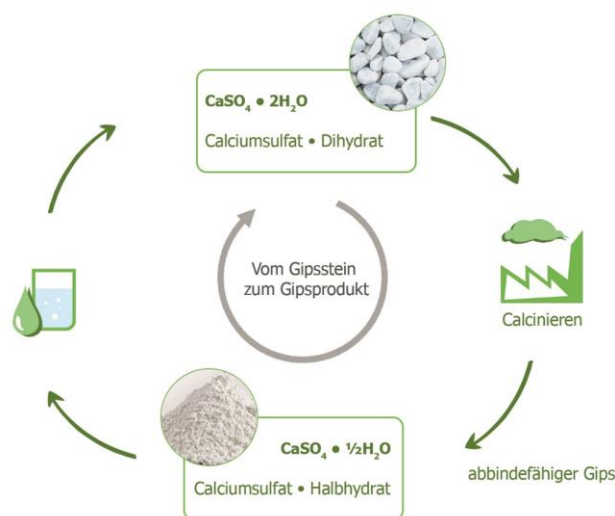


Abbildung 2: Gipskreislauf

Quelle: REWIMET-SYMPOSIUM 2021 Ressourcenmanagement, Gipsrecycling – Forschungsfeld am Thüringer Innovationszentrum für Wertstoffe [13]

Forschungslücke/Entwicklungsbedarf

Feiner PB-Brechsand, als inerte Magerung in einer sulfatischen Matrix, erlaubt die Herstellung ressourceneffizienter Baustoffe. Mit Blick auf die Funktionsfähigkeit des neuen RC-Baustoffsystems, auf dessen Dauerhaftigkeit (Ausschluss von Quellprozessen im Gefüge sowie Erzielung robuster Kontaktzonen im Gefüge) und auf den Ressourceneinsatz werden ein maximaler PB-Brechsand- und ein minimaler Gips-Anteil identifiziert.

Die Machbarkeit des Ansatzes stand im Fokus des Vorhabens. Die Versuchsserien dienten der wissenschaftlichen Bearbeitung grundsätzlicher Fragestellungen zur Aufdeckung von Risikopotenzialen (Saugen und Kornzerstörung beim Anmischen der PB-Körnung; Quellprozesse) und der Gestaltung des CSH-Phasen/Gips-Gefüges. Das Baustoffkonzept ist neu, in dem feine PB-Brechsande, bestehend aus CSH-Phasen und z. T. quarziti-schen Feinkörnungen, mit einer sulfatischen Matrix zu einem neuen Baustoff zusammengefügt wurden. Eine weitere Unbekannte ist die Interaktion zwischen PB-Bruch und Gips sowie das verfahrenstechnische Handling der Frischmörtel im Zuge der Baustoffproduktion.

Die Entwicklung erfolgte zweigeteilt. Die Forschungsstelle Leibniz-IWT befasste sich mit der Machbarkeit hinsichtlich der Erarbeitung funktionsfähiger Rezepturen sowie mit den Auswirkungen/der Beherrschung des charakteristisch ausgeprägten Saugens der PB-Granulate. Weiterhin lag der Fokus auf der Kornzerstörung im Anmischprozess, auf den erreichbaren Baustoffeigenschaften und auf dem stofflichen Schadenspotenzial durch eine mögliche Treibmineralbildung. Die Forschungsstelle HSN/ThIWert untersuchte die Machbarkeit der Herstellung von Baustoffen in Anlehnung an bestehende Gips-Baustoffe. Hierbei sollten die von dem Leibniz-IWT entwickelten Rezepturen hinsichtlich ihrer Tauglichkeit zur Herstellung von Labor-Probepplatten überprüft werden. Der praktische Einsatz wurde im Labor simuliert, um das Potenzial an verfahrenstechnischen Schadensquellen zu erfassen. Die Machbarkeit wurde damit final und abschließend bewertet.

Zielstellung

Das Ziel des Projektes war es, den anteiligen Einsatz von Porenbeton-Brechsand in Gipsplattenprodukten zu untersuchen und bautechnisch innovative Gipsbaustoffe mit reduzierten Gipsgehalten herzustellen. Unter Berücksichtigung der Produktqualität und zur Schonung von Primärressourcen sollte der Gipsanteil durch Porenbeton-Brechsand substituiert werden. Neben Aufbereitungsuntersuchungen und Versuchen zur Mörtelentwicklung war die Herstellung u. a. von Laborprobe- und Demonstratorplatten sowie deren Recyclingfähigkeit Forschungsgegenstand.

Konkrete Projektziele

Im Vorhaben sollte die grundlegende Machbarkeit des Arbeitsansatzes, Gipsanteile in sulfatisch gebundenen Platten durch Porenbetongranulate zu substituieren, untersucht werden. Konkrete Projektziele waren:

- Systematische Entwicklung geeigneter Rezepturen sowie Untersuchung der Frisch- und Festmörteleigenschaften;
- Erfolgreiche Herstellung von Laborprobeplatten und Bestimmung ihrer Eigenschaften;
- Erzielung eines stabilen und dauerhaften Gefüges der Platten aus PB-Granulat und Gips;
- Herstellung von Platten in einem zweiten Recyclingzyklus
- Umsetzung des Arbeitsansatzes in einem industriellen Versuch.

Übergeordnete Ziele

Ein alternativer Forschungsansatz zur Bewältigung des Rohstoffmangels bestand darin, Ersatzstoffe zu finden, die den Gips teilweise ersetzen können. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde untersucht, ob und inwieweit Porenbetongranulate aus der Bauschuttaufbereitung als Substitut für ein β -Halbhydrat in der Herstellung von Gipsbaustoffen eingesetzt werden können. Dies war das übergeordnete Ziel und überdies notwendig aufgrund des Wegfalls der Rohstoffquelle REA-Gips.

Forschungsdesign

Im Projekt waren vor allem grundlegende Erkenntnisse zur Interaktion der Rohstoffe Gips und Porenbeton-Brechsand im Labor zu gewinnen und die Eignung des Brechsands als Substitut abzuleiten. Zudem sollten anhand von Laborprototypen mit verschiedenen Mischungsverhältnissen erste Materialkennwerte ermittelt und mit konventionellen Gipsprodukten verglichen werden. Basierend auf den gewonnenen Daten sollen die Recyclingfähigkeit untersucht und die Rezepturen optimiert werden.

Arbeitshypothese

Die Arbeitshypothese basierte darauf, einen innigen Gefügeverbund zwischen den Granulatoberflächen feiner Porenbeton-Brechsande mit dem frischen Bindemittelleim bzw. der erhärteten Matrix aus dem sulfatischen Bindemittel Gips zu erzielen. Auf diese Weise ließen sich Bauplatten mit unterschiedlichen Produktionsverfahren und einem breiten Eigenschaftsprofil herstellen.

Methodischer Ansatz

Die Entwicklungsarbeit umfasste zwei grundlegende Ansätze:

Ansatz I:

Die klassische und systematische Mörtelentwicklung unter definierten Bedingungen im Bindemittel- und Mörtellabor erfordert standardisierte Prüfmethode(n) (z. B. zur Bestimmung der Konsistenz, des Versteifungsbeginns, der Rohdichten, der Festigkeiten, der Verformungseigenschaften) sowie individuell angepasste Behandlungsverfahren, wie z. B. die verfahrensbedingte Reduzierung von Überschusswasser vor dem Einsetzen des Erstarrens. Zudem wird die Verbundzone zwischen Gips und PB-Brechsand mikroskopisch untersucht.

Ansatz II:

Die entwickelten Rezepturen waren für die Herstellung verschiedener Gipsprodukte, wie z. B. Wand- oder Bodenplatten vorgesehen. Hierfür wurden Herstellungsformen im Labor nachgestellt bzw. das Plattenherstellungsverfahren im Labormaßstab näherungsweise simuliert. Ein kontinuierlicher Austausch der Projektergebnisse erfolgte fortwährend, sodass sich die Forschungsstellen partnerschaftlich gegenseitig unterstützten. Nach der Durchführung von Applikationsversuchen an der HSN/ThiWert erfolgte stets eine Rückmeldung an das Leibniz-IWT, um ggf. stoffliche Potenziale zur Abstellung von Applikationsproblemen oder zur Optimierung der Plattenherstellung herauszuarbeiten.

Erste Versuche zum Hochskalieren der Laborergebnisse wurden im Werk eines Herstellers von Gipsplattenprodukten durchgeführt. Hierbei wurden entwickelte Rezepturen zur Produktion von Fußbodenplatten eingesetzt. Nach erfolgreicher Anwendung wurden Proben zur Ermittlung des Eigenschaftsprofils hergestellt.

Zur Untersuchung der Recyclingfähigkeit von Platten aus dem ersten Recyclingzyklus wurden diese gebrochen und für die Herstellung von neuen Platten im zweiten Recyclingzyklus verwendet. Die Eigenschaften der im zweiten Recyclingzyklus hergestellten rezyklierten Probenplatten wurden bestimmt.

Projektteam

Im Rahmen des Forschungsprojekts waren die Forschungsstellen Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien (Leibniz-IWT) und Hochschule Nordhausen/Thüringer Innovationszentrum für Wertstoffe (HSN/ThiWert) entsprechend ihrer Fachkompetenzen in fünf Arbeitspaketen für ähnlich anspruchsvolle Aufgaben verantwortlich. Im Verlauf des 19. Monats des Projekts übernahm zusätzlich die Firma Lindner Norit GmbH & CO. KG die Umsetzungsaufgabe der Laborversuche zur industriellen Herstellung von Gipsbauplatten anhand der in der Forschung entwickelten Rezepturvorschläge.

Das Leibniz-IWT war für die systematische Mörtelentwicklung verantwortlich. Dies umfasste die Einbettung des feinen PB-Brechsands in die sulfatische Matrix, sämtliche Frisch- und Festmörtelanalysen sowie die Bestimmung von baustofflichen Parametern. Gefügeanalysen vervollständigten die Arbeit des Leibniz-IWT.

Die HSN/ThiWert beschäftigte sich mit der Aufbereitung der Ausgangsmaterialien. Im Mittelpunkt der Aufgaben stand, den PB-Abbruch und den RC-Gips mechanisch so aufzubereiten, dass die Materialien zur Herstellung von RC-Poro-Gips-Probenplatten im Labormaßstab dienen können. Dies beinhaltete verschiedene Zerkleinerungsverfahren, wie der Vor- und Nachzerkleinerung und die Klassierung der Materialien Porenbetonbruch und RC-Gips sowie die Kalzinierung des RC-Gipses. Nachdem die Bereitstellung der Materialien zur Fertigung der RC-Poro-Gipsplatten gewährleistet war, wurden aus ausgewählten Rezepturen Probeplatten im Labormaßstab sowie Demonstratorplatten größerer Dimension hergestellt, die als Demonstrationsobjekt auf einer Holzkonstruktion montiert wurden. Abgeschlossen wurden die Arbeiten durch die Untersuchung eines zweiten Recyclingzyklus.

Die Struktur und der zeitliche Ablauf des Projektes sind in der folgenden Übersicht dargestellt. Das Projekt umfasste insgesamt fünf Arbeitspakete und drei Meilensteine, die innerhalb der Projektlaufzeit von 24 Monaten abgeschlossen werden sollten.

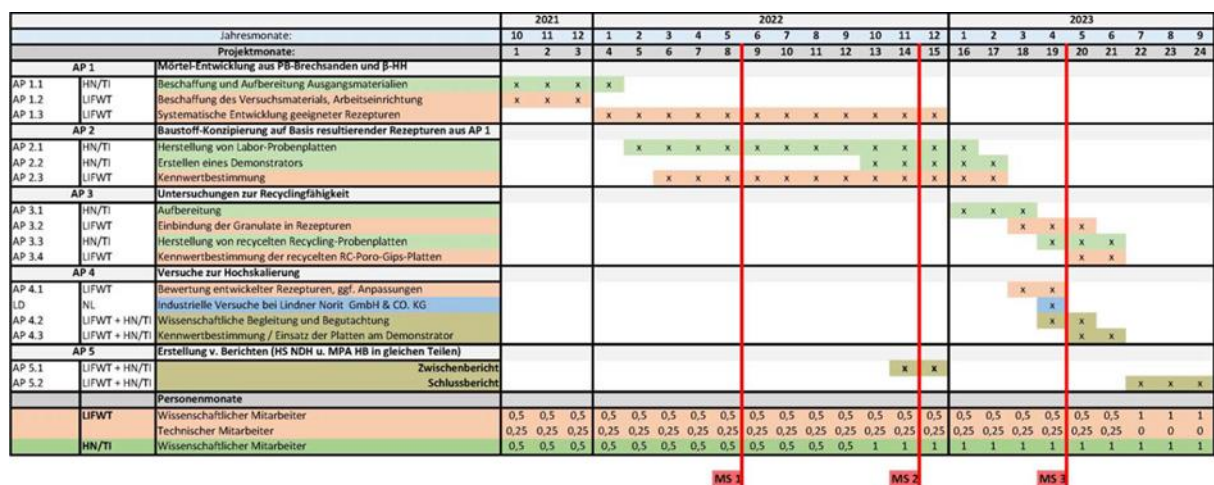


Abbildung 3: Arbeits- und Zeitplan des Projektes

Die nachfolgende Tabelle 1 beschreibt die gesetzten Meilensteine.

Tabelle 1: Meilensteine

MS	Zielerreichungskriterium
1 (Bis zum 8. Monat)	Erste Rezepturen lassen sich erstellen. Die verfahrenstechnische Herstellung erster Proben gelingt. Die Bewertung der ersten vorliegenden Erkenntnisse lässt eine erfolgreiche Weiterentwicklung erwarten.
2 (Bis zum 14. Monat)	Die Rezepturentwicklung ist weit fortgeschritten. Es liegen grundlegende Erkenntnisse zur Interaktion zwischen CSH-geprägten PB-Granulaten und Dihydrat-Matrizen aus β -Halbhydrat vor. Das Wissen bildet die Basis für die Entwicklung der RC-Poro-Gipsplatte. Aus den Frischmörteln lassen sich im Labor in Anlehnung an die gängige Verfahrenstechnik Platten herstellen, die für die Verwendung als Bauplatten vielversprechend sind. Die Ergebnisse der Kennwertbestimmungen bestätigen die angestrebte Nutzung. Eine wissenschaftliche und wahrscheinlich auch wirtschaftliche Anschlussfähigkeit des Forschungsvorhabens ist gegeben.
3 (Bis zum 19. Monat)	Die grundlagentypische Entwicklung der stofflichen Zusammensetzung der Mörtel und die verfahrenstechnische Herleitung möglicher Produktionsvarianten sowie die anschließende Erprobung als gipsgebundene Innenbauplatte (Erstellen eines Demonstrators) sind erfolgreich abgeschlossen. Eine Aufbereitung der PB-Gipsplatten ist möglich. Die Frischmörtel können für die Industrieproduktion von Innenbaustoffen angepasst werden.

Projektverlauf

Das Projekt startete am 01.10.2021. Gemäß dem Arbeitsplan- und Zeitplan (siehe Abbildung 3) wurden zunächst die erforderlichen Materialien beschafft, aufbereitet und die nötige Arbeitseinrichtung vorbereitet.

Porenbetonabbruch wurde von einem Recyclingunternehmen bezogen. Ein Gespräch mit Verantwortlichen des Unternehmens in Bad Tennstedt fand im November 2021 statt. Bedingt durch die kalte Jahreszeit, in der wenig Materialinput zu verzeichnen war sowie Corona bedingten Personalausfällen beim Recyclingunternehmen, konnte der benötigte Porenbetonabbruch erst nach viermonatiger Projektlaufzeit bezogen werden.

Nach Anlieferung des Abbruchmaterials wurde es an der HSN/ThiWert aufbereitet. Aufgrund der vorliegenden Stückgröße des Porenbetonabbruchs erfolgte abweichend vom Antrag zunächst eine Vorzerkleinerung in einem Einwellenzerkleinerer und anschließend eine Zerkleinerung auf die Zielgröße in einem Backenbrecher. Analog zum Porenbetonabbruch wurde zudem Porenbetonneuware aufbereitet.

Eine Teilmenge des aufbereiteten Abbruchmaterials aus der ersten sowie der zweiten Zerkleinerungsstufe, aus Porenbetonneuware aufbereitetes Material sowie ein handelsüblicher Stuckgips wurden an das Leibniz-IWT geliefert. Dort erfolgte zunächst die Charakterisierung der Porenbetongranulate. Hierbei ist die Kenntnis der Wasseraufnahme der Granulate von besonderer Bedeutung. Zur Ermittlung des wassergesättigt und oberflächentrockenen Zustands der Porenbetongranulate bei der Bestimmung der Wasseraufnahme und der Rohdichte wurde ein Prüfstand, bestehend aus einem Trockenschrank, einer Waage und einem Rechner verwendet. Aufgrund technischer Probleme musste über Projektmittel zunächst eine neue Software beschafft und implementiert werden. Hierdurch entstanden Verzögerungen im Zeitplan. Weiterer zeitlicher Verzug entstand durch Corona bedingte Personalausfälle im Labor des Leibniz-IWT, die verstärkt Ende 1./Anfang 2. Quartal 2022 auftraten. Technisches Personal stand zeitweise nicht oder nur zeitlich stark begrenzt zur Verfügung.

Die entstandenen Verzögerungen konnten zwar im Laufe der Projektbearbeitung teilweise wieder ausgeglichen werden, dennoch musste eine kostenneutrale Verlängerung des Vorhabens bis zum 31.01.2024 beantragt werden, um alle erforderlichen Arbeiten abschließen zu können. Entgegen der im Antrag formulierten Projektplanung ergaben sich Veränderungen bei der Beschaffung und Bereitstellung des RC-Gipses. Der RC-Gips wurde nicht über Leistungen Dritter kalziniert, sondern durch den Projektpartner HSN/ThiWert, da im Zuge eines parallel laufenden Projektes Erfahrungen u. a. zum Kalzinieren (Überführung des abgebundenen RC-Gipses in eine reaktive Gipsform) von RC-Gips gesammelt werden konnten, welche die Anwendung im vorliegenden Projekt erlaubte. Systematisch wurden am Leibniz-IWT Rezepturen, bestehend aus Gips (Stuckgips, RC-Gips), Porenbetongranulat und Zusätzen entwickelt sowie ihre Frisch- und Festmörteleigenschaften ermittelt. An ausgetesteten Rezepturen erfolgten Gefüge- und Dauerhaftigkeitsuntersuchungen.

Auf Basis der Rezepturentwicklungen wurden an der HSN/ThiWert Labor-Probeplatten sowie Platten größerer Dimension für die Erstellung eines Demonstrators hergestellt. Die Bestimmung der Materialkennwerte der Labor-Probeplatten erfolgte durch das Leibniz-IWT. Untersucht wurden zudem die Recyclingfähigkeit der Platten mit Porenbetongranulaten sowie eine Umsetzung des Arbeitsansatzes bei einem Industriepartner.

Zum Ende der Projektlaufzeit kam es zu einem Personalwechsel in der Forschungsstelle HSN/ThiWert.

Die Arbeitspakete 1-5 wurden abgearbeitet und die vorgegebenen Meilensteine erreicht.

Ergebnisse

Ausgangsstoffe

Porenbetonabbruch

Porenbetonabbruch wurde von einem Entsorgungsfachbetrieb bezogen. Dem Projektteam wurden insgesamt sechs Big Bags (Fassungsvolumen: ca. 1 m³ je Big Bag) fremdstoffarmes, grobstückiges Abbruchmaterial, angesammelt aus unterschiedlichen Anlieferungen, zur Verfügung gestellt. Abbildungen 4 und 5 zeigen den in Big Bags angelieferten Porenbetonabbruch. In Abbildung 6 sind aus den Big Bags entnommene Bruchstücke zu sehen.



Abbildung 4: In sechs Big Bags angelieferter Porenbetonabbruch

Quelle: Simon Eichhorn, HSN/ThiWert



Abbildung 5: Nahaufnahme eines Big Bags mit Porenbetonabbruch

Quelle: Simon Eichhorn, HSN/ThiWert



Abbildung 6: Exemplarische Porenbeton-Bruchstücke aus Abbruchmaterial

Quelle: Simon Eichhorn, HSN/ThlWert

Für den Fall, dass der verfolgte Ansatz mit Porenbeton-Abbruchmaterial nicht funktioniert, wurden präventiv 30 Stück Porenbeton-Plansteine mit den Abmessungen von 574 mm x 100 mm x 249 mm als Neuware beschafft.

Bindemittel

Als Bindemittel für die im Rahmen des Projektes zu entwickelnden RC-Poro-Gips-Platten wurde ein handelsüblicher Stuckgips der Firma Casea ausgewählt. Hierbei handelte es sich um ein kalziniertes β -Halbhydrat auf Basis von Naturgips, welches sich laut Herstellerangaben als Basisgips zur Produktion für gipshaltige Bauprodukte und Bauplatten eignet.

Zur Herstellung von Proben mit 100 % Recyclingmaterial wurde RC-Gips in Form von Dihydrat mit einer Korngröße ≤ 2 mm von einer Gipsrecyclinganlage beschafft, mittels einer Stiftmühle gemahlen, mit einem Lasergranulometer analysiert und anschließend bei 140 °C kalziniert. Die Kalzinierung erfolgte in Anlehnung an das Gips-Datenbuch des Bundesverbandes der Gipsindustrie [14]. Angestrebt wurde ein Kristallwassergehalt von 4,1 bis 5,6 %. Der gemahlene RC-Gips wurde in Metallschalen mit einer Schütthöhe von etwa 2 cm gefüllt und in einem Trockenschrank bei 140 °C für etwa 4 Stunden bis zum Erreichen der Zielfeuchte kalziniert. Abbildung 7 zeigt die Stiftmühle, Abbildung 8 den in Metallschalen gefüllten RC-Gips in einem Trockenschrank, Abbildung 9 die Bestimmung des Kristallwassergehaltes mittels eines Ultra X Messgerätes und Abbildung 10 den Kristallwassergehalt einer Teilmenge des RC-Gipses im Laufe eines Kalzinierungsprozesses.



Abbildung 7: Stiftmühle

Quelle: Simon Eichhorn, HSN/ThiWert



Abbildung 8: In Metallschalen gefüllter RC-Gips im Trockenschrank

Quelle: Simon Eichhorn, HSN/ThiWert



Abbildung 9: Bestimmung des Kristallwassergehaltes vom RC-Gips

Quelle: Simon Eichhorn, HSN/ThlWert

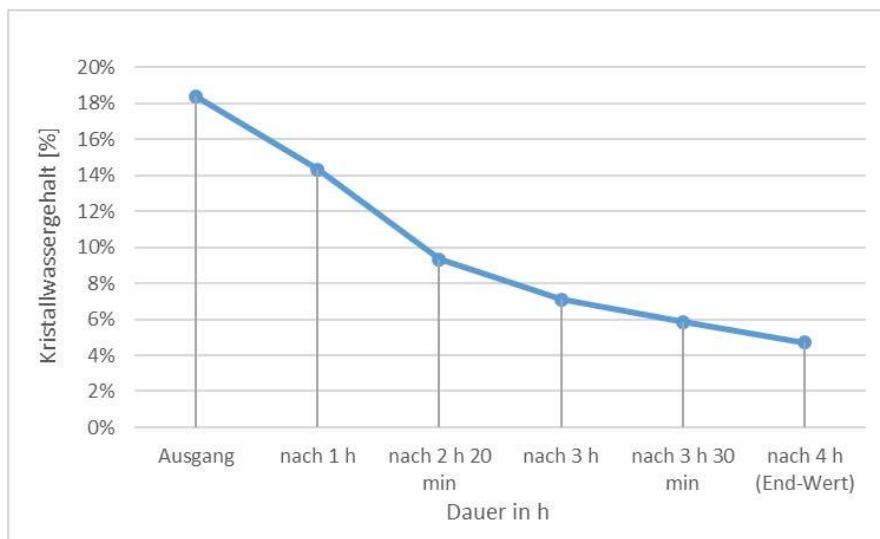


Abbildung 10: Kristallwassergehalt einer Teilmenge des RC-Gipses im Laufe des Kalzinierungsprozesses

Quelle: Simon Eichhorn, HSN/ThlWert

Die Ermittlung der Korngrößenverteilung des Stuck- und des RC-Gipses erfolgte mittels Lasergranulometrie. Die Proben für den RC-Gips wurden nach dem Mahlprozess entnommen. Je Bindemittel wurden drei Proben geprüft. Die Sieblinien (rot) und die Verteilungsdichte (grün) der untersuchten Körnungen sind in den Abbildungen 11 und 12 aufgeführt.

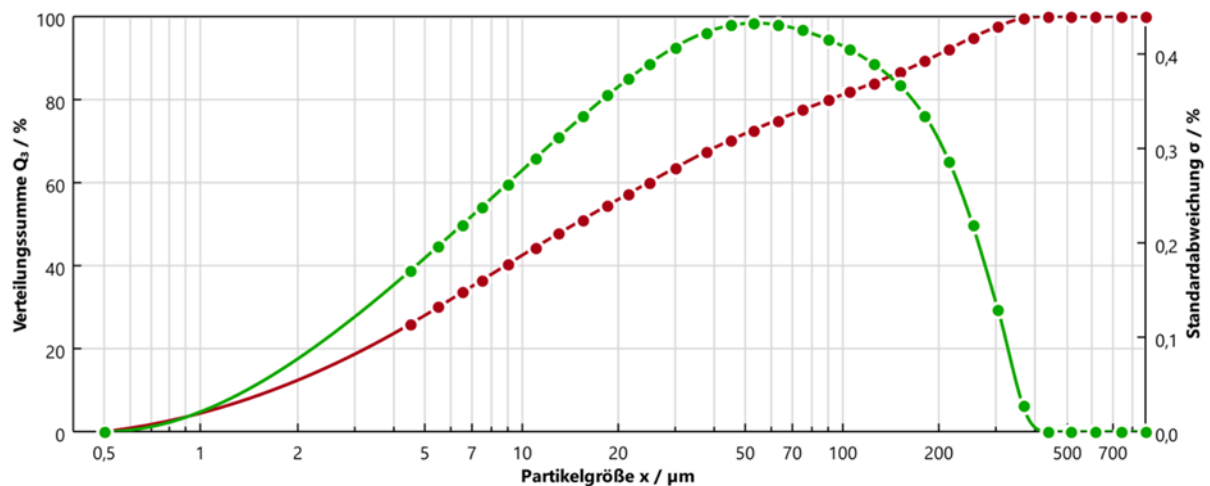


Abbildung 11: Korngrößenverteilung des Stuckgipses mittels Lasergranulometrie

Quelle: Simon Eichhorn, HSN/ThiWert

Die Analyse für den Stuckgips zeigt, dass das Größtkorn bei etwa 0,4 mm liegt, während die häufigste Korngröße bei 0,05 mm auftritt. Die X_{50} -Werte liegen im Bereich von 0,01 bis 0,02 mm. Die Korngrößenverteilung befindet sich in einem idealen Bereich für die beabsichtigte Anwendung und wird als gut geeignet für die Vermischung mit PB-Granulat betrachtet.

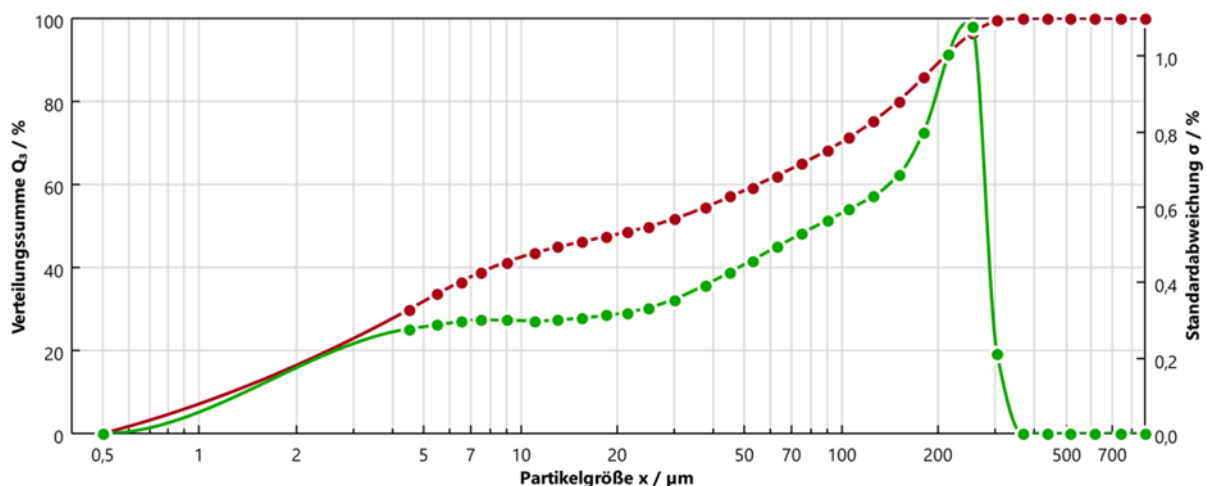


Abbildung 12: Korngrößenverteilung des RC-Gipses mittels Lasergranulometrie

Quelle: Simon Eichhorn, HSN/ThiWert

In Abbildung 12 ist zu erkennen, dass die Korngrößenverteilung des RC-Gipses geringfügig von der des handelsüblichen Stuckgipses abweicht. Das Größtkorn liegt bei ca. 0,38 mm, während die häufigste Korngröße bei 0,25 mm auftritt. Die X_{50} -Werte bewegen sich im Bereich von 0,02 bis 0,03 mm. Die Korngrößenverteilung des RC-Gipses ist im Vergleich zu der des Stuckgipses etwas gröber, ist aber für die Vermischung mit PB-Granulat ebenfalls als gut geeignet zu bewerten.

Zusatzmittel

Als Zusatzmittel wurden zur Verbesserung der Mörtel Eigenschaften Verzögerer auf Basis von modifizierter Aminosäure (VZ1: Retardan®-2025 P, VZ2: Retardan®-2010 P), ein Luftporenbildner auf Basis von anionischem Tensid (LP: DSM-A3) sowie ein Fließmittel auf Basis von modifiziertem Polycarboxylat (ViscoCrete®-225 P) verwendet. Die Zusatzmittel vom Hersteller Sika® lagen in Pulverform vor.

Aufbereitung Porenbetonabbruch/Porenbetonneuware

Der grobstückige Porenbetonabbruch wurde zunächst in einem Einwellenzerkleinerer auf eine Korngröße < 20 mm vorzerkleinert und anschließend in einem Backenbrecher auf eine Korngröße < 4 mm gebrochen. Anhaftende Fremdstoffe (Mörtel, Putz, Tapete, etc.) wurden im Materialinput belassen. Um eine möglichst homogene Durchmischung des heterogenen Abbruchmaterials zu erzielen, wurde im Zuge der Befüllung der Aufgabeeinheit des Einwellenzerkleinerers umlaufend/wiederkehrend je Big Bag eine annähernd ähnliche Materialmenge entnommen, sodass die Aufgabeeinheit je Zerkleinerungsdurchgang mit Material aus allen sechs Big Bags befüllt wurde. Die Abbildungen 13 bis 16 zeigen die verwendeten Brecher sowie den Output aus den zwei Brechvorgängen.

Die Aufbereitung der Porenbetonneuware erfolgte analog zum Abbruchmaterial.



Abbildung 13: Vorzerkleinerung des grobstückigen Porenbetonabbruchs im Einwellenzerkleinerer

Quelle: Simon Eichhorn, HSN/ThiWert



Abbildung 14: Grobes Porenbetongranulat aus Abbruchmaterial (PBG-A_{grob}) nach dem ersten Brechvorgang

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT



Abbildung 15: Zweiter Schritt der Aufbereitung im Backenbrecher

Quelle: Simon Eichhorn, HSN/ThiWert

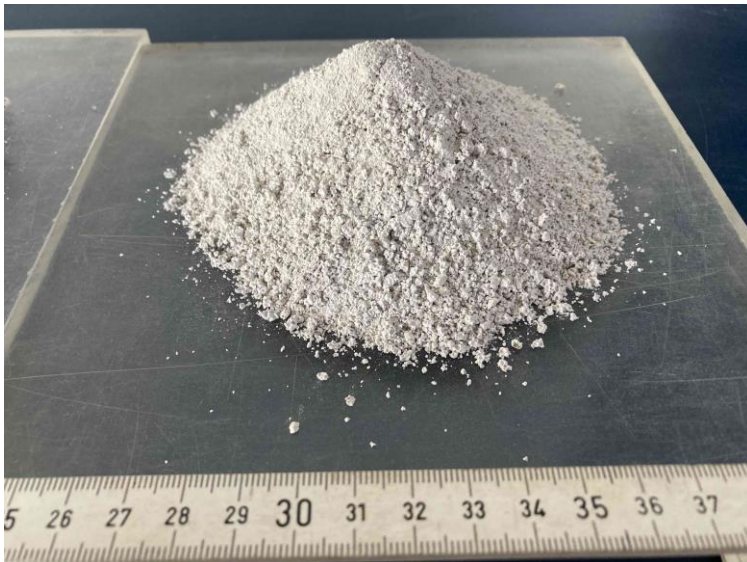


Abbildung 16: Feines Porenbetongranulat (PBG-A_{fein}) nach dem zweiten Brechvorgang

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Eigenschaften der Porenbetongranulate

Zur genauen Analyse des aufbereiteten Porenbetons (Abbruchmaterial und Neuware) wurden die Korngrößenverteilung, die Schüttdichte, die Wasseraufnahme und Rohdichte sowie der Sulfatgehalt ermittelt. Am Porenbetongranulat wie auch an weiteren Ausgangsstoffen wurde zudem der Weißgrad bestimmt.

Im Folgenden werden die Granulate aus dem Abbruchmaterial mit „PBG-A“, die Granulate aus der Neuware mit „PBG-N“, das vorzerkleinerte Material mit dem Zusatz „grob“ und das anschließend mit dem Backenbrecher gebrochene Material mit dem Zusatz „fein“ bezeichnet.

Da das grobe Porenbetongranulat aus Neuware (PBG-N_{grob}) nicht für die Herstellung von Gipsmörtelmischungen vorgesehen war, wurde nur eine geringe Menge dieses Materials an das Leibniz-IWT geliefert und daran nur ausgesuchte Eigenschaften mit reduzierter Probenanzahl bestimmt.

Korngrößenverteilung

Die Ermittlung der Korngrößenverteilung erfolgte nach DIN EN 933-1:2012-03 [15] durch Trockensiebung. Verwendet wurden Siebe mit 0,063, 0,125, 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8, 16 und 32 mm Öffnungsweite. Je untersuchter Körnung wurden zwei Proben entnommen und geprüft. Die Sieblinien der untersuchten Körnungen sind in Abbildung 17 dargestellt.

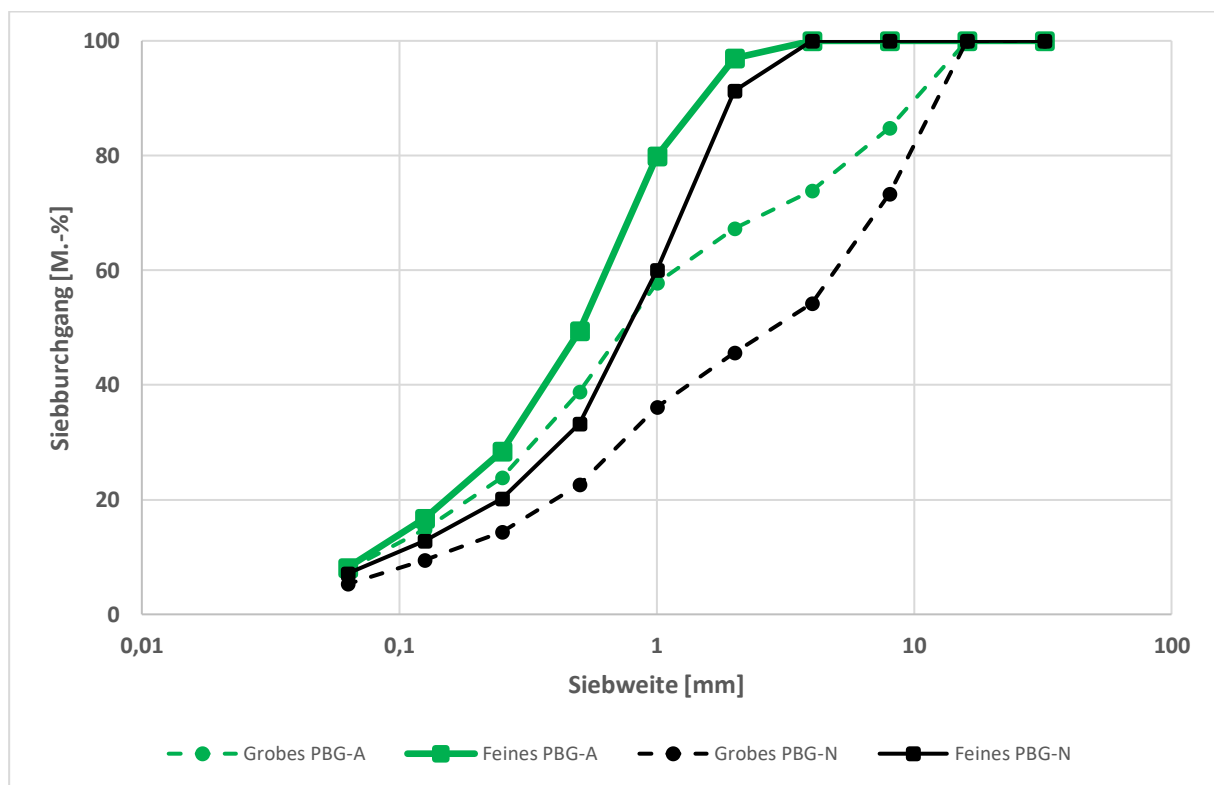


Abbildung 17: Sieblinien der Porenbetongranulate

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Das feine PBG-A wies eine stetige Sieblinie auf. Der Feinstanteil < 0,063 mm dieser Körnung betrug ca. 8 Ma.-%. Der Anteil < 2mm lag bei 97 Ma.-%. Im Vergleich zum feinen PBG-A wurde das feine PBG-N trotz identischer Aufbereitung nicht ganz so fein gebrochen. Dies kann an differierenden Materialeigenschaften und/oder an differierenden Feuchtegehalten gelegen haben. Die Sieblinien der beiden feinen Körnungen ließen eine Anwendung als Substitut im vorliegenden Projekt erwarten.

Schüttdichte

Die Bestimmung der Schüttdichte erfolgte nach DIN EN 1097-3:1998-06 [16]. Je Körnung wurden zwei Proben entnommen und jeweils dreifach geprüft. Verwendet wurde ein Messgefäß mit einem Volumen von einem Liter. In Tabelle 2 sind die Schüttdichten der untersuchten Körnungen aufgeführt.

Tabelle 2: Schüttdichten der Porenbetongranulate aus Abbruchmaterial und Neuware

Granulat	Schüttdichte [kg/dm ³]
PBG-A _{fein}	0,49
PBG-A _{grob}	0,48
PBG-N _{fein}	0,43
PBG-N _{grob}	0,40

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Die Schüttdichte des feinen Porenbetongranulats aus Abbruchmaterial (PBG-A_{fein}) betrug 0,49 kg/dm³. Das feine Porenbetongranulat aus Neuware (PBG-N_{fein}) wies mit 0,43 kg/dm³ eine niedrigere Schüttdichte auf. Mit 0,48 kg/dm³ bzw. 0,40 kg/dm³ wiesen die groben Granulate geringfügig niedrigere Schüttdichten als die feinen Granulate auf.

Wasseraufnahme und Rohdichte

Die Wasseraufnahme und Rohdichte der feinen Porenbetongranulate wurde in Anlehnung an DIN EN 1097-6:2013-09 [17] an jeweils zwei Proben je Körnung bestimmt. Die Rücktrocknung der wassergesättigten Proben wurde abweichend von der o. g. Norm gemäß [18] in einem Wärmeschrank bei kontinuierlicher Aufzeichnung des Probengewichts durchgeführt. Die Trocknungstemperatur betrug 65 °C. Das Gewicht der Probe wurde alle 30 s aufgezeichnet. Aus den Rohdaten wurden die Verdunstungsrate in g/min sowie die Feuchte der Probe in Ma.-% berechnet. Die Verdunstungsrate (y-Achse) wurde über die Feuchte der Probe (x-Achse) in einem Diagramm aufgetragen. Anhand der Trocknungskurve wurde der wassergesättigt und oberflächentrockene Zustand der Proben, gekennzeichnet durch einen markanten Abfall der Verdunstungsrate, bestimmt. Die Wasseraufnahme der Granulate nach 10 min und 24 h sowie die Rohdichten auf ofentrockener sowie wassergesättigt und oberflächentrockener Basis sind in der nachfolgenden Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Wasseraufnahme und Rohdichten der feinen Porenbetongranulate aus Abbruchmaterial und Neuware

Eigenschaft	Einheit	PBG-A _{fein}	PBG-N _{fein}
Wasseraufnahme nach 10 min	[Ma.-%]	52,6	55,9
Wasseraufnahme nach 24 h	[Ma.-%]	56,7	61,2
Rohdichte auf ofentrockener Basis	[kg/dm ³]	1,14	1,03
Rohdichte auf wassergesättigt und oberflächentrockener Basis	[kg/dm ³]	1,69	1,62

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Aufgrund ihrer extrem hohen Porosität nehmen Porenbetongranulate viel Wasser ins Korninnere auf. Die Wasseraufnahme des PBG-A_{fein} nach 24 Stunden betrug 56,7 Ma.-%. Mit 52,6 Ma.-% wurde ein Großteil dieser Wassermenge bereits nach 10 min aufgenommen. Das PBG-A_{fein} wies eine Rohdichte auf ofentrockener Basis

von 1,14 kg/dm³ auf. Auf wassergesättigt und oberflächentrockener Basis betrug seine Rohdichte 1,69 kg/dm³. Im Vergleich zum feinen PBG-A wies das feine PBG-N um ca. 3 Ma.-% höhere Wasseraufnahmen und um ca. 0,1 kg/dm³ niedrigere Rohdichten auf.

Sulfatgehalt

Die Ermittlung des Sulfatgehaltes der feinen Porenbetongranulate erfolgte nach DIN EN 196-2:2013-10 [19] anhand von Doppelbestimmungen. Die Sulfationen wurden durch Salzsäure gelöst und bei einem pH-Wert von 1,0 bis 1,5 mit einer Bariumchloridlösung gefällt. Das Ausfällen des Bariumsulfats erfolgte in der Siedehitze. Die Bestimmung wurde gravimetrisch durchgeführt. Tabelle 4 zeigt die Sulfatgehalte der Granulate.

Tabelle 4: Sulfatgehalt der feinen Porenbetongranulate aus Abbruchmaterial und Neuware

Granulat	SO ₄ [%]
PBG-A _{fein}	2,6
PBG-N _{fein}	3,2

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Im Mittel betrug der Sulfatgehalt des feinen PBG-A 2,6 % (angegeben als SO₄). Das feine PBG-N wies einen Sulfatgehalt von 3,2 % auf.

Weißgradmessung

Der Weißgrad bezieht sich auf den Remissionswert R_y , der an pulverförmigem Rohgips ermittelt wird. Dies erfolgt beispielsweise im Vergleich zu einer emaillierten Referenzkachel, die gegenüber Absolutweiß vermessen wird. Die Ermittlung des Weißgrades erfolgte nach DIN 5033-9:2018-04 [20].

Zur Bestimmung des Weißgrades kam das Spektralphotometer sph870 der Firma Colourlite zum Einsatz. Dieses Gerät ermöglicht eine präzise Messung des Farbabstands zwischen einer Farbprobe und einem vorgegebenen Farbstandard, wobei dieser Unterschied durch absolute Werte in allen gängigen Farbskalen dargestellt wird.

Die zu analysierenden Materialien umfassten den aufbereiteten PBG-A_{grob} und PBG-A_{fein} sowie RC-Gips, Granulat aus Plattenbruch (GPB) und Stuckgips (siehe Abbildung 18). Vor der Bestimmung des Weißgrades wurden die Proben mithilfe einer Laborkugelmühle so gemahlen, dass eine Korngröße von unter 0,5 mm erreicht wurde. Die gemahlenen Proben wurden in das Messgefäß gegeben und mit einer Schütthöhe von etwa 1 cm gefüllt (siehe Abbildung 19).

Nach der Kalibrierung des Messgeräts, die Mithilfe eines Weiß- und Schwarzstandards durchgeführt wurde, erfolgte die Messung der Referenzprobe "Stuckgips" von der Firma Casea. Ermittelt wurden die Remissionswerte von R_y für den Weißgrad, die Absolutwerte von L^* für die Helligkeit, a^* für die Rot- und Grünfarbrichtung sowie b^* für die Gelb- und Blaufarbrichtung.

Für jedes Material wurden drei Proben gemessen und ein Durchschnittswert ermittelt. Die gesamte Farbdifferenz zur Referenzprobe hinsichtlich Helligkeit und Farbton wurden als ΔE angegeben.

Die Prüfergebnisse sind in der folgenden Tabelle 5 von oben nach unten gemäß des verringerten Weißgrades bzw. der gesteigerten Farbdifferenz aufgeführt. Die vorliegenden Ergebnisse lassen darauf schließen, dass RC-Gips und Porenbetongranulat aus Abbruch (PBG-A_{grob} und PBG-A_{fein}) im Vergleich zur Referenzprobe "Stuckgips" einen signifikanten Farbunterschied aufweisen, während die Farbe des GPB nicht so stark von der

Standardprobe abweicht. Die Differenz beim Stuckgips zwischen der Referenz- und der Versuchsprobe ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass es sich um Proben unterschiedlicher Chargen handelte.

Tabelle 5: Weißgrad von Stuckgips (Referenz und Versuch), PBG-A_{fein}, GPB, RC-Gips und PBG-A_{grob}

Proben	Weißgrad	Helligkeitswert	Farbwert		Farbdifferenz
	Ry	L*	a*	b*	ΔE
Stuckgips (Referenz)	68,47	86,55	0,06	0,67	-
Stuckgips (Versuch)	66,95	85,48	-	0,72	1,07
Granulat aus Plattenbruch (GPB) < 4mm	64,03	83,98	0,26	1,69	2,77
PBG-A _{fein}	59,54	80,98	0,48	2,54	5,89
RC-Gips (aufbereitet durch Stiftmühle)	58,43	81,59	0,67	4,28	6,16
PBG-A _{grob}	57,12	80,25	0,54	2,39	6,55

Quelle: Yuwei Chang, HSN/ThiWert

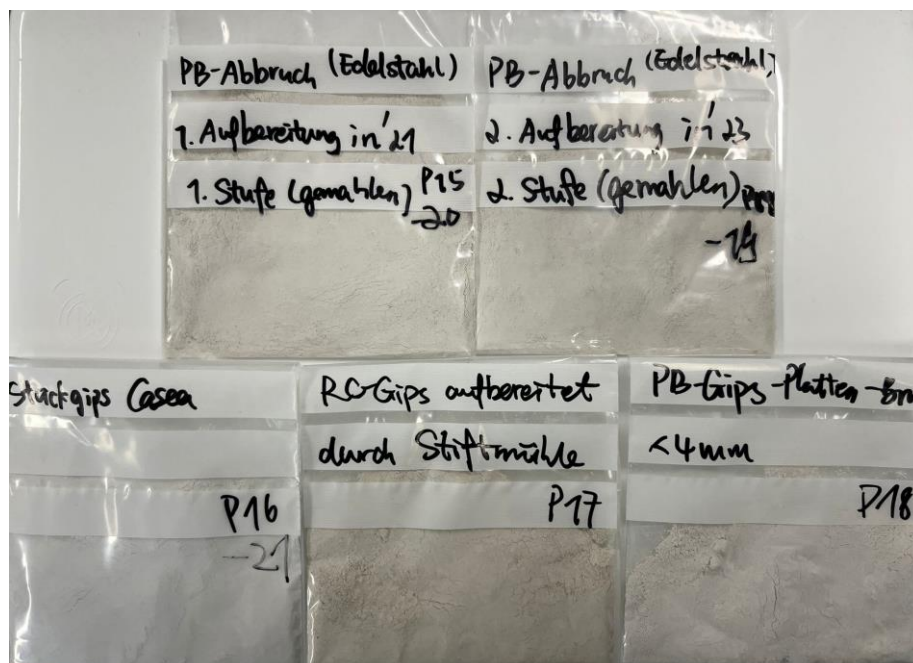


Abbildung 18: Proben für die Bestimmung des Weißgrades

Quelle: Yuwei Chang, HSN/ThiWert



Abbildung 19: Bestimmung des Weißgrades mit dem Spektralphotometer

Quelle: Yuwei Chang, HSN/ThiWert

Versuchsprogramm

Begonnen wurden die Mörtelentwicklungen mit Mischungen ohne Zusatzmittel. Als Referenz wurden zunächst reine Gipsmischungen mit einem handelsüblichen β -Halbhydrat auf Basis von Naturgips untersucht. Anschließend erfolgte die Substitution des Gipsgehalts durch feines Porenbetongranulat aus Abbruchmaterial (PBG-A_{fein}) in einem Bereich zwischen 25 und 75 Ma.-% in 25 Ma.-%-Schritten. Hierbei wurde das PBG trocken wie auch vorgehäst verwendet. Nach der Bewertung dieser Versuchsserien konzentrierten sich die Untersuchungen auf eine Substitution des Gipsgehalts zwischen 30- und 45 Ma.-% in 5 Ma.-%-Schritten. Zudem wurden exemplarisch feines Porenbetongranulat aus Neuware (PBG-N_{fein}) sowie grobes Porenbetongranulat aus Abbruchmaterial (PBG-A_{grob}) eingesetzt.

Fortgesetzt wurden die Mörtelentwicklungen, indem den Porenbeton-Gipsmörteln (PBGm) Zusatzmittel hinzugegeben wurden. Um ausreichende Verarbeitungszeiten zu gewährleisten, wurden Verzögerer eingesetzt. Zur Senkung der Rohdichte wurde ein Luftporenbildner verwendet und zur Senkung des Wasseranspruchs kam ein Fließmittel zum Einsatz.

Abschließend wurden Mörtel mit einem im Vorhaben kalzinierten RC-Gips sowie Mörtel mit Anteilen an gebrochenen Platten aus PBGM (Granulat aus Plattenbruch) untersucht.

Prüfungen

Vor ihrer Verwendung wurden die an das Leibniz-IWT gelieferten Porenbetongranulate (PBG) durch mehrfaches Umsetzen eines Schüttkegels homogenisiert, bei 105 °C getrocknet und anschließend in luftdicht verschlossenen Fässern aufbewahrt.

Die Mörtelkomponenten wurden gravimetrisch dosiert. Bei der Verwendung von trockenem PBG wurde das Granulat mit dem Gips und ggf. Zusätzen in einer Schale händisch vorgemischt. Der Trockenmörtel wurde dann in das Zugabewasser (Wasser_{ges.}) eingestreut und die Ausgangsstoffe 1 min mit einem Löffel und anschließend

1 min mit einem Labormischer nach DIN EN 196-1:2016-11 [21] bei niedriger Geschwindigkeit gemischt. Für die Variante mit vorgegastem Granulat wurde erst das PBG in das Zugabewasser gegeben, dem Material unter langsamen Rühren mit dem Löffel 3 min Zeit zur Wasseraufnahme gegeben, bevor der Gips und ggf. das/die Zusatzmittel hinzugefügt wurde/n. Der anschließende Mischprozess erfolgte wie oben beschrieben.

In den meisten Versuchsserien wurde die Wasserdosierung so geregelt, dass sich ein Ausbreitmaß des Frischmörtels 5 min nach dem Einstreuen des Bindemittels in das Zugabewasser von (165 ± 5) mm einstellte. Jedoch wurden teilweise für vergleichende Untersuchungen zunächst auch feste Wassergehalte gewählt und erst in Folgeserien die Zielkonsistenz eingestellt.

Als Kennwert für das Verhältnis vom Wassergehalt zum Trockenmörtelgehalt wurde der Wassergipswert (R-Wert) errechnet, indem die Wasseraufnahme des PBG nach 10 min vom Zugabewasser ($\text{Wasser}_{\text{ges.}}$) abgezogen und die verbleibende Wassermenge ($\text{Wasser}_{\text{frei}}$) durch die Trockenmörtelmasse dividiert wurde.

Am Frischmörtel wurden das Ausbreitmaß, der Versteifungsbeginn und die Frischmörteldichte ermittelt. Das Ausbreitmaß wurde nach DIN EN 13279-2:2014-03 [22] (Abschnitt 4.3.3) 5 min nach dem Einstreubeginn des Bindemittels in das Zugabewasser und der Versteifungsbeginn nach Abschnitt 4.4.2 der genannten Norm bestimmt. Die Ermittlung der Frischmörtelrohichte erfolgte bei der Herstellung von Mörtelprismen, indem die Frischmörtelmasse durch das Volumen von drei Prismen mit den Abmessungen von 40 mm x 40 mm x 160 mm dividiert wurde.

Bei der Rezeptentwicklung wurden 1000 g Trockenmörtel dosiert und mithilfe der Frischmörtelrohichte die Rezepturparameter in der Einheit „kg/m³“ berechnet.

Die Mörtelprismen wurden nach DIN EN 13279-2:2014-03 (Abschnitt 4.5.2) hergestellt, einen Tag nach ihrer Herstellung ausgeschalt und beschriftet. Die Lagerung der Prismen erfolgte bis zu einem Probenalter von 7 d bei (23 ± 2) °C und (65 ± 5) % relativer Luftfeuchte. Anschließend wurden die Proben bei (40 ± 2) °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, in einem Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt und gemäß den Abschnitten 4.5.4 sowie 4.5.5 der o. g. Norm auf ihre Biegezug- und Druckfestigkeit geprüft. Die Biegezugfestigkeit wurde als Mittel aus drei Prüfwerten und die Druckfestigkeit als Mittel aus sechs Prüfwerten bestimmt.

In 30 von insgesamt 51 Versuchsserien wurden Probeplatten mit den Abmessungen von ca. 400 mm x 300 mm x 12 mm hergestellt. Jede Platte wurde in 10 Proben mit den Abmessungen von ca. 200 mm x 50 mm x 12,5 mm gesägt, bei (40 ± 2) °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und nach Abkühlung auf Raumtemperatur ihre Biegezugfestigkeit ermittelt. Hierbei betrug die Stützweite 100 mm und die Belastungsgeschwindigkeit 1,5 N/s. Auf diese Weise wurde zudem der Gipskern einer handelsüblichen Gipskartonplatte geprüft.

In einem Industrieversuch wurden Platten mit den Abmessungen von ca. 600 x 600 x 32 mm in Anlehnung an die Produktion von Platten für ein Doppelbodensystem hergestellt. Aus diesen Platten wurden analog zu den o. g. Probeplatten Prüfstreifen mit einer Breite von 50 mm gesägt, bei (40 ± 2) °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und ihre Biegezugfestigkeit nach Abkühlung auf Raumtemperatur bestimmt. Da diese Platten eine höhere Dicke aufwiesen, wurde die Stützweite entsprechend des Dickeunterschiedes auf 267 mm erhöht.

Weiterhin erfolgten an ausgesuchten Versuchsserien Gefüge- und Dauerhaftigkeitsuntersuchungen. Für die Gefügeanalysen wurden Dünnschliffpräparate erstellt und im Lichtmikroskop untersucht. Für die Dauerhaftigkeitsuntersuchungen wurden Prismen mit Messzapfen an den Stirnflächen hergestellt. Einen Tag nach der Herstellung wurden die Prismen ausgeschalt und die Ausgangsmessung ihrer Länge vorgenommen. Je Versuchsserie wurden drei Prismen geprüft. Die Proben wurden zunächst vier Wochen bei 23 °C und 65 % relativer Luftfeuchte, anschließend 7 Wochen bei 5 °C und > 95 % relativer Luftfeuchte und abschließend noch einmal drei Wochen bei 23 °C und 65 % relativer Luftfeuchte gelagert. 1, 2, 3, 6, 7, 10, 14, 17, 21, 24, 28, 29, 30, 35, 38, 42, 45, 49, 52, 56, 63, 70, 77, 78, 84, 91 und 98 Tage nach der Ausgangsmessung wurde die Länge der Prismen mithilfe einer Messuhr ermittelt und die Längenänderung in der Einheit „mm/m“ berechnet.

Untersuchungen am Gipsleim

Zur Charakterisierung des Bindemittels wurde zunächst als Referenzmischung der Stuckgips (β -Halbydrat auf der Basis von Naturgips) untersucht. Hierbei wurden drei unterschiedliche Wassergipswerte (R-Werte) gewählt. Der R-Wert der Rezeptur Nr. 1 von 0,67 orientierte sich an der auf dem technischen Merkblatt des Stuckgipses angegebenen Einstreumenge. Dies ergab eine sehr flüssige Konsistenz mit einem Ausbreitmaß von 280 mm. Für eine verarbeitungsfähige Konsistenz mit einem Ausbreitmaß von 177 mm wurde ein R-Wert von 0,56 gewählt. Als dritte Variante wurde der R-Wert auf 0,46 reduziert, wodurch sich eine steife Konsistenz mit einem Ausbreitmaß von 129 mm einstellte.

Die Rezeptparameter der Gipsleime sind in der Tabelle 6, die Frischleimeigenschaften in der Tabelle 7 und die Festleimeigenschaften in der Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 6: Rezepturen der Gipsleime

Rezept-Nr.	Stuckgips [kg/m ³]	Wasser [kg/m ³]	R-Wert [-]
1	948	632	0,67
14	1079	605	0,56
15	1219	561	0,46

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Der Versteifungsbeginn der Gipsleime variierte zwischen 6,5 und 14 min, wobei ein schnellerer Versteifungsbeginn mit niedrigerem R-Wert beobachtet wurde. Die Frischleimrohddichte lag zwischen 1,58 und 1,78 kg/dm³. Höhere R-Werte führten zu niedrigeren Rohdichten.

Tabelle 7: Frischleimeigenschaften der Gipsleime

Rezept-Nr.	Ausbreitmaß [mm]	Versteifungsbeginn [h:min:s]	Frischleimrohddichte [kg/dm ³]
1	280	00:14:00	1,58
14	177	00:10:15	1,68
15	129	00:06:30	1,78

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Tabelle 8: Festleimeigenschaften der Gipsleime

Rezept-Nr.	Trockenrohddichte [kg/dm ³]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
1	1,10	3,2	11,3
14	1,23	5,0	18,3
15	1,38	6,1	25,3

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Die Trockenrohddichte der Gipsleime bewegte sich zwischen 1,10 und 1,38 kg/m³. Je höher der R-Wert war, umso geringer waren die Festigkeiten. Bei einer verarbeitungsfähigen Konsistenz wurde eine Biegezugfestigkeit von 5,0 N/mm² und eine Druckfestigkeit von 18,3 N/mm² erzielt.

In Abbildung 20 ist ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der Trockenrohdichte sowie den Festigkeiten der Gipsleime und dem R-Wert zu erkennen. Mit einer Erhöhung des R-Werts sanken sowohl die Trockenrohdichte wie auch die Festigkeiten.

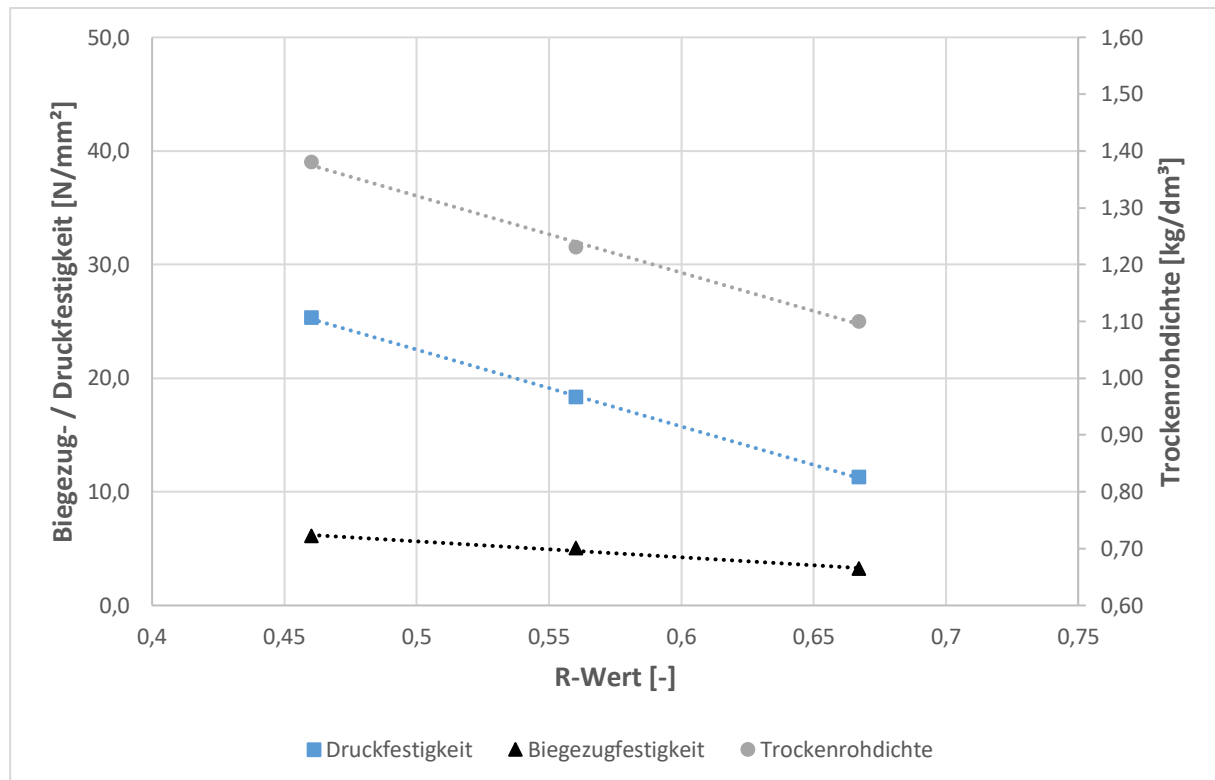


Abbildung 20: Trockenrohdichte und Festigkeiten der Gipsleime in Abhängigkeit vom R-Wert

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Substitution des Gipsgehalts von 25, 50 und 75 Ma.-% durch feines PBG-A

Um ein breites Spektrum abzudecken, wurden zunächst 25, 50 und 75 Ma.-% des Bindemittels durch feines Porenbetongranulat aus Abbruchmaterial (PBG-A_{fein}) ersetzt. Das PBG wurde trocken wie auch vorgehäst verwendet. Die Zielkonsistenz wurde bei der Trockenvariante eingestellt. Die Variante mit vorgehästem PBG wurde mit identischem R-Wert hergestellt. Bei einer Substitution von 25 Ma.-% wurden Ausbreitmaße von (205±5) mm und (165±5) mm als Zielwerte gewählt. Bei einer Substitution von 50 und 75 Ma.-% wurde ein Ausbreitmaß von (165±5) mm eingestellt.

Die Rezepturen der beschriebenen Versuchsserien sind in der Tabelle 9, die Frischmörteleigenschaften in der Tabelle 10 und die Festmörteleigenschaften in der Tabelle 11 zu finden.

Anhand der Rezepturen 4, 6 und 8, die vergleichbare Konsistenzen aufwiesen, konnte festgestellt werden, dass je mehr PBG in der Mischung vorlag, ein umso höherer R-Wert benötigt wurde, um die Zielkonsistenz von (165±5) mm zu erreichen.

Tabelle 9: Rezepturen von Porenbeton-Gipsmörteln (PBGM) mit 25, 50 und 75 Ma.-% PBG, trocken und vorgehäst

Rezept-Nr.	Substitution [Ma.-%]	Trockenvariante	Vornässvariante	Stuckgips [kg/m³]	PBG-A _{fein} [kg/m³]	Wasser _{ges.} [kg/m³]	Wasser _{fre} _i [kg/m³]	R-Wert [-]
2	25	x		706	235	590	466	0,495
3	25		x	718	239	600	474	0,495
4	25	x		741	247	584	454	0,460
5	25		x	746	249	589	458	0,460
6	50	x		397	397	618	409	0,515
7	50		x	406	406	632	418	0,515
8	75	x		161	484	640	385	0,598
9	75		x	163	490	649	391	0,598

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Trotz identischer R-Werte wurden durch das Verwenden von vorgehästem PBG höhere Ausbreitmaße erzielt. Die Differenz des Ausbreitmaßes zwischen der Trocken- und der Vornässvariante war umso größer, je mehr PBG die Mischung enthielt (siehe auch Abbildung 21).

Der Versteifungsbeginn trat bei der Gipsleimmischung mit einem Ausbreitmaß von 177 mm (Rezept-Nr. 14) nach ca. 10 min ein. Bei den Porenbeton-Gipsmörteln (PBGM) erfolgte der Versteifungsbeginn bereits nach 6,5 bis 9 min. Eine Abhängigkeit des Versteifungsbeginns vom PBG-Gehalt konnte nicht beobachtet werden.

Die Frischmörtelrohichte lag bei einer Substitution von 25 Ma.-% des Gipsgehalts bei 1,53 bis 1,58 kg/dm³. Durch Erhöhung des PBG-Anteils wurde die Frischmörtelrohichte gesenkt. Bei einem PBG-Anteil von 75 Ma.-% lag die Frischmörtelrohichte bei 1,3 kg/dm³

Die Frischmörtelrohichte war bei der Vornässvariante im Vergleich zur Trockenvariante geringfügig höher. Dies lag vermutlich daran, dass das PBG durch die Saugzeit von 3 min mehr Wasser in innere Hohlräume aufnehmen konnte.

Tabelle 10: Frischmörteleigenschaften von PBGM mit 25, 50 und 75 Ma.-% PBG, trocken und vorgehäst

Rezept-Nr.	Ausbreitmaß [mm]	Differenz Ausbreitmaß zw. Trocken- und Vornässvariante [mm]	Versteifungsbeginn [h:min:s]	Frischmörtelrohichte [kg/dm³]
2	201		n. b.	1,53
3	204	+ 3	n. b.	1,56
4	164		00:08:00	1,57
5	172	+ 8	00:07:30	1,58
6	170		00:09:00	1,41
7	185	+ 15	00:07:00	1,44
8	168		00:06:30	1,29
9	191	+ 23	00:07:00	1,30

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Die Frischmörtel der Versuchsserien 2-9 wiesen eine gute Verarbeitbarkeit auf. Bei einem PBG-Gehalt von 75 Ma.-% war jedoch festzustellen, dass der Mörtel nicht genügend Bindemittel enthielt. Bei hohen Gipsgehalten in den Mischungen war der Mörtel sehr klebrig. Mit Erhöhung des PBG-Gehalts nahm die Klebrigkeit ab.

Die Trockenrohdichte verhielt sich analog zur Frischmörtelrohdichte. Je höher der PBG-Anteil in der Mischung war, umso geringer fiel die Dichte aus. Bei einem PBG-Gehalt von 25 Ma.-% betrug die Trockenrohdichte ca. 1,1 kg/dm³. Durch die Erhöhung des PBG-Gehalts wurde die Trockenrohdichte auf 0,9 kg/dm³ (50 Ma.-% PBG) bzw. 0,7 kg/dm³ (75 Ma.-% PBG) gesenkt.

Die Festigkeiten wurden durch die Erhöhung des PBG-Gehalts ebenfalls gesenkt. Während die reine Gipsmischung mit der Rezept Nr. 14 eine Biegezugfestigkeit von 5,0 N/mm² und eine Druckfestigkeit von 18,3 N/mm² aufwies, lag die Biegezugfestigkeit bei einem PBG-Gehalt von 25 Ma.-% und einem R-Wert von 0,495 bei ca. 3 N/mm² und die Druckfestigkeit bei ca. 13 N/mm². Durch die Reduzierung des R-Werts auf 0,460 wurde die Druckfestigkeit auf bis zu 15,7 N/mm² erhöht. Durch die Erhöhung des PBG-Gehalts auf 50 bzw. 75 Ma.-% sank die Druckfestigkeit auf ca. 6 bzw. 1 N/mm².

Ein Einfluss des Vornässens auf die Festmörtel Eigenschaften konnte nicht beobachtet werden. Die Differenz zwischen den Prüfwerten mit trockenem und vorgehästem PBG waren gering und lagen innerhalb der üblichen Messunsicherheit der Prüfverfahren.

Tabelle 11: Festmörtel Eigenschaften von PBGM mit 25, 50 und 75 Ma.-% PBG, trocken und vorgehäst

Rezept-Nr.	Trockenrohdichte [kg/dm ³]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
2	1,06	3,3	12,7
3	1,08	2,9	13,1
4	1,11	3,2	15,7
5	1,12	3,9	15,6
6	0,87	1,8	6,2
7	0,89	1,8	6,5
8	0,69	0,5	1,3
9	0,70	0,5	1,4

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Abbildung 21 zeigt das Ausbreitmaß von PBGM mit 25, 50 und 75 Ma.-% PBG, hergestellt mit trockenem sowie mit vorgehästem PBG. Im Vergleich zur Trockenvariante konnten bei der Verwendung von vorgehästem PBG höhere Ausbreitmaße erzielt werden, obwohl jeweils beide Varianten dieselbe Wassermenge enthielten. Die Differenz zwischen den Ausbreitmaßen der Vergleichsmörtel mit trockenem und vorgehästem PBG fiel umso höher aus, je mehr PBG die Mischung enthielt.

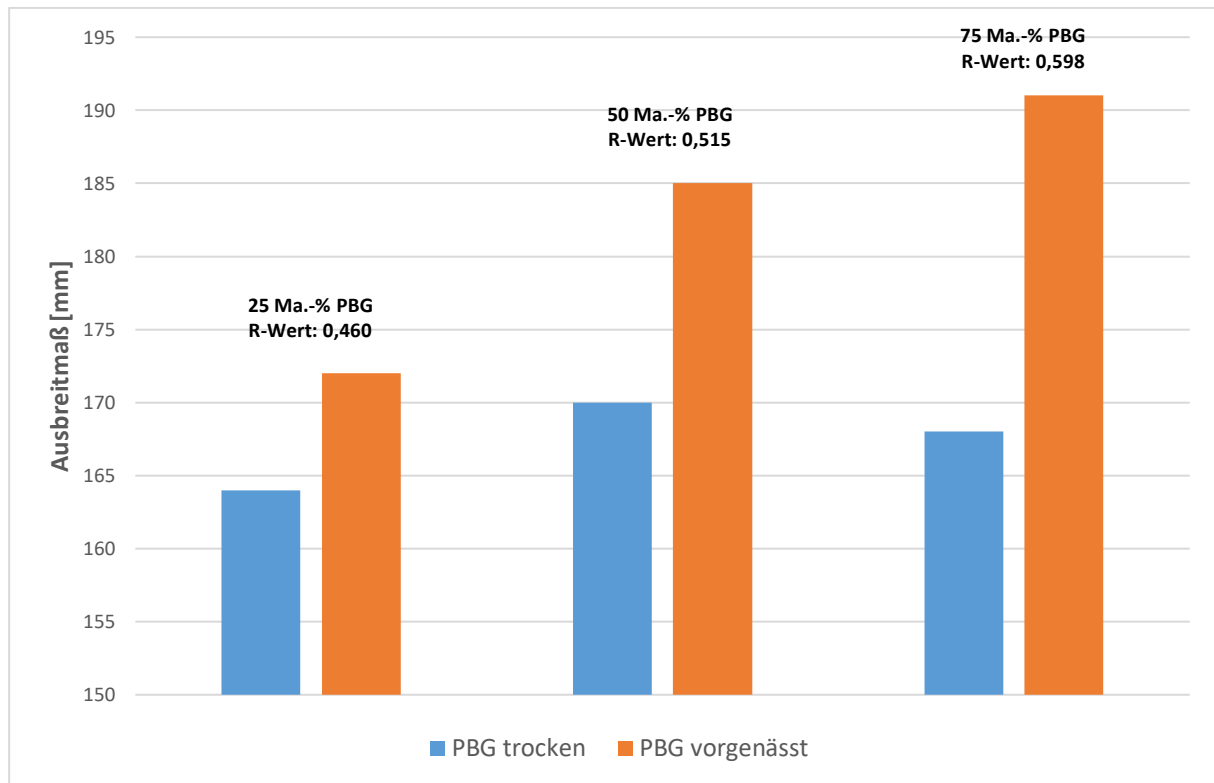


Abbildung 21: Ausbreitmaß von PBGM mit trockenem und vorgehästem PBG

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Substitution des Gipsgehaltes zwischen 30 und 45 Ma.-% durch feines PBG-A

Die Frisch- und Festmörteleigenschaften der Rezepturen 8 und 9 mit 75 Ma.-% PBG ließen die Herstellung von Gips-Bauplatten nicht erwarten. Daher wurde als nächstes der Bereich zwischen 30 und 45 Ma.-% näher untersucht. Da durch das Vornässen des PBG keine Verbesserung der Mörtелеigenschaften erzielt wurde, wurde das PBG in den folgenden Versuchsserien nur noch trocken verwendet.

Die Rezepturen der PBGM mit einem PBG-Gehalt zwischen 30 und 45 Ma.-% sind in der Tabelle 12, die Frischmörteleigenschaften in der Tabelle 13 und die Festmörteleigenschaften in der Tabelle 14 aufgeführt.

Zum Erzielen der Zielkonsistenz mit einem Ausbreitmaß von (165 ± 5) mm waren R-Werte von 0,471 bis 0,507 erforderlich. Ein umso höherer R-Wert wurde benötigt, je mehr PBG die Mischung enthielt.

Tabelle 12: Rezepturen von PBGM mit 30 - 45 Ma.-% PBG

Rezept-Nr.	Substitution [Ma.-%]	Stuckgips [kg/m³]	PBG-A _{fein} [kg/m³]	Wasser _{ges.} [kg/m³]	Wasser _{frei} [kg/m³]	R-Wert [-]
10	30	660	283	593	445	0,471
11	35	601	324	620	449	0,486
12	40	520	347	611	429	0,495
13	45	453	371	613	418	0,507

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Der Versteifungsbeginn der PBGM wurde nach 7,5 bis nahezu 9 min festgestellt. Eine Abhängigkeit des Versteifungsbeginns vom PBG-Gehalt konnte nicht beobachtet werden.

Die Frischmörtelrohddichte des PBGM mit 30 Ma.-% PBG betrug 1,54 kg/dm³. Mit Erhöhung des PBG-Gehalts auf 45 Ma.-% sank die Frischmörtelrohddichte auf 1,44 kg/dm³.

Tabelle 13: Frischmörteleigenschaften von PBGM mit 30 - 45 Ma.-% PBG

Rezept-Nr.	Ausbreitmaß [mm]	Versteifungsbeginn [h:min:s]	Frischmörtelrohddichte [kg/dm ³]
10	163	00:07:30	1,54
11	168	00:08:50	1,54
12	162	00:08:45	1,48
13	170	00:08:47	1,44

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Bei einem PBG-Gehalt von 30 Ma.-% betrug die Trockenrohddichte 1,03 kg/dm³ und wurde durch die Erhöhung des PBG-Gehalts in der Mischung auf bis zu 0,90 kg/dm³ gesenkt.

Die Biegezugfestigkeit sank von 3,1 N/mm² auf 2,2 N/mm² und die Druckfestigkeit von 14,2 auf 7,7 N/mm².

Tabelle 14: Festmörteleigenschaften von PBGM mit 30 - 45 Ma.-% PBG

Rezept-Nr.	Trockenrohddichte [kg/dm ³]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
10	1,03	3,1	14,2
11	0,98	3,0	10,7
12	0,94	2,6	9,4
13	0,90	2,2	7,7

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Zur Orientierung bzgl. benötigter Festigkeiten für die Herstellung gängiger Gipsplattenprodukte wurde von einer handelsüblichen Gipskartonplatte der Karton auf beiden Seiten vorsichtig entfernt und die Biegezugfestigkeit des Gipskerns geprüft (Prüfbedingungen: siehe Abschnitt „Prüfungen“). Es handelte sich um eine Platte des Typs A nach DIN EN 520:2009-12 [23] und GKB nach DIN 18180:2014-09 [24] mit einer Nenndicke von 12,5 mm. Die Platte wies im Mittel eine Biegezugfestigkeit von 1,84 N/mm² bei einer Trockenrohddichte von 0,70 kg/dm³ auf. Dies entsprach in etwa der Biegezugfestigkeit des PBGM mit einem PBG-Gehalt von 50 Ma.-%. Die Ausweitung der Untersuchungen auf PBG-Gehalte oberhalb von 50 Ma.-% wurde daher nicht in Betracht gezogen.

Eine Übersicht über die Druck- und Biegezugfestigkeit des Referenz-Gipsleims (Rezept-Nr. 14) sowie der Mörtel mit unterschiedlichen PBG-Gehalten in Abhängigkeit ihrer Trockenrohddichte ist in Abbildung 22 dargestellt. Aufgeführt sind die PBGM mit vergleichbarer Konsistenz (Rezept-Nr. 4, 6, 8 und 10-14). Ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen den Festigkeiten und der Trockenrohddichte konnte festgestellt werden.

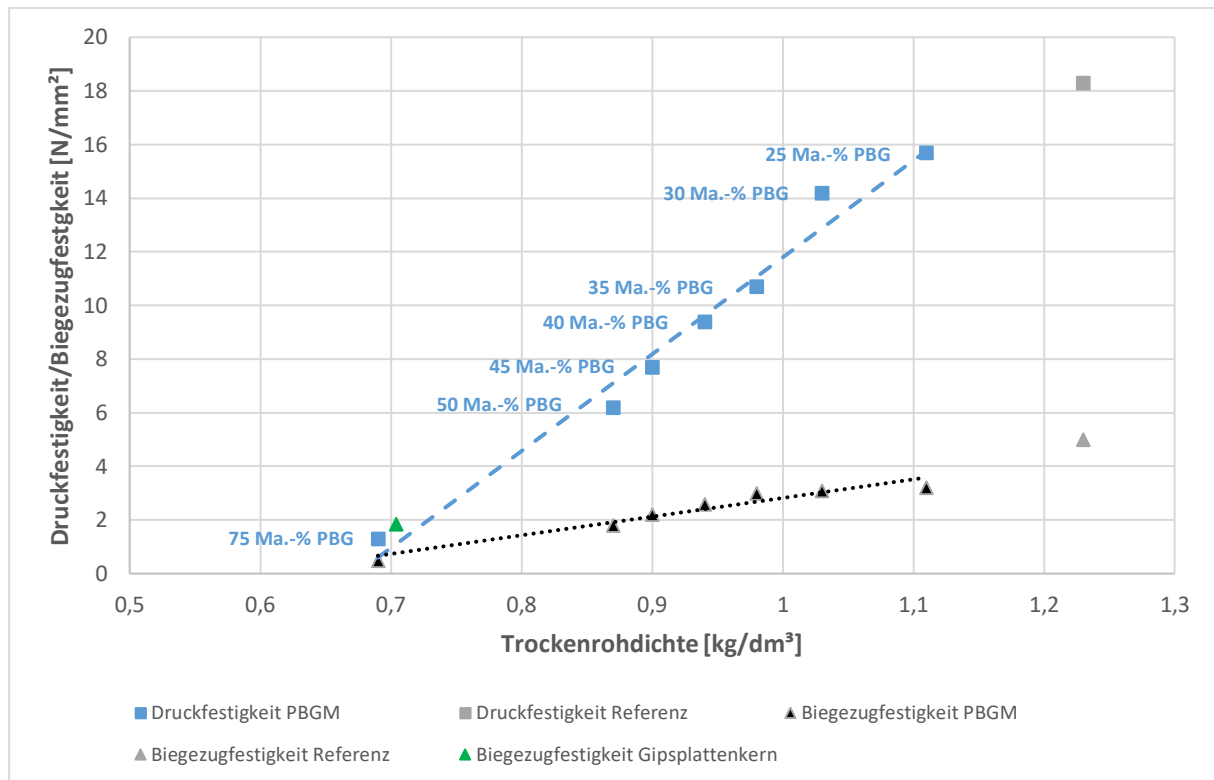


Abbildung 22: Festigkeiten von PBGM und des Referenz-Gipsleims sowie Biegezugfestigkeit des Gipskerns einer handelsüblichen Gipskartonplatte in Abhängigkeit der Trockenrohdichte

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Exemplarischer Einsatz von feinem PBG-N und grobem PBG-A

Neben feinem Porenbetongranulat aus Abbruchmaterial (PBG-A_{fein}) wurden exemplarisch bei einem PBG-Gehalt von 40 Ma.-% Mörtel mit feinem Porenbetongranulat aus Neuware (PBG-N_{fein}) sowie grobem Porenbetongranulat aus Abbruchmaterial (PBG-A_{grob}) untersucht.

Die Rezepturen der PBGM mit unterschiedlichen PBG-Körnungen sind in der Tabelle 15, die Frischmörteleigenschaften in der Tabelle 16 und die Festmörteleigenschaften in der Tabelle 17 aufgeführt.

Bei der Verwendung von feinem PBG-N wurde zunächst ein R-Wert von 0,495 analog zur Rezeptur 12 mit feinem PBG-A eingestellt. Hierdurch ergab sich ein Ausbreitmaß von 210 mm. Diese Beobachtung deckt sich mit der Korngrößenverteilung beider Granulatkörnungen. Das PBG-A_{fein} ist eine im Vergleich zum PBG-N_{fein} feinere Körnung. Somit liegen beim PBG-N_{fein} weniger freie Oberflächen vor, die mit Wasser benetzt werden müssen. Dies führt zu einem höheren Ausbreitmaß bei identischem R-Wert.

Um eine vergleichbare Konsistenz mit einem Ausbreitmaß von (165±5) mm zu erzielen, wurde der R-Wert anschließend auf 0,447 gesenkt.

Bei der Verwendung von grobem PBG-A konnte mit einem zur Rezeptur identischen R-Wert von 0,495 ein Ausbreitmaß von 160 mm erzielt werden. Zu erwarten war, dass sich ein höheres Ausbreitmaß ergibt, da das PBG-A_{grob} eine niedrigere zu benetzende Oberfläche als das PBG-A_{fein} aufweist. Da trotz dieses Umstandes kein höheres Ausbreitmaß erzielt wurde, kann vermutet werden, dass neben der zu benetzenden Oberfläche der PBG-Körnung weitere Faktoren Einfluß auf die Konsistenz der Mörtel haben.

Tabelle 15: Rezepturen von PBGM mit unterschiedlichen Porenbetongranulaten

Rezept-Nr.	Stuckgips [kg/m³]	Art des PBG	PBG [kg/m³]	Wasser _{ges.} [kg/m³]	Wasser _{frei} [kg/m³]	R-Wert [-]
12	520	PBG-A _{fein}	347	611	182	0,495
16	502	PBG-N _{fein}	334	601	187	0,495
17	537	PBG-N _{fein}	358	601	200	0,447
18	479	PBG-A _{grob}	319	547	152	0,495

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Die Frischmörtelrohddichte fiel bei der Verwendung des PBG-N_{fein} und identischem R-Wert mit 1,44 kg/dm³ geringfügig niedriger aus als die Frischmörtelrohddichte der Rezeptur 12 mit PBG-A_{fein}. Bei gleicher Konsistenz wies die Rezeptur mit PBG-N_{fein} mit 1,50 kg/dm³ eine geringfügig höhere Frischmörtelrohddichte auf. Der Versteifungsbeginn wurde nach 8 min festgestellt.

Durch die Verwendung von groben PBG-A konnte die Frischmörtelrohddichte auf 1,35 N/mm² gesenkt werden. Der Versteifungsbeginn dieser Rezeptur erfolgte nach 7 min.

Tabelle 16: Frischmörteleigenschaften von PBGM mit unterschiedlichen Porenbetongranulaten

Rezept-Nr.	Ausbreitmaß [mm]	Versteifungsbeginn [h:min:s]	Frischmörtelrohddichte [kg/dm³]
12	162	00:08:45	1,48
16	210	n. b.	1,44
17	160	00:08:00	1,50
18	160	00:07:00	1,35

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Während die Trockenrohddichte der Rezeptur 12 mit feinem PBG-A 0,94 kg/dm³ betrug, lag sie bei der Verwendung von feinem PBG-N und identischem R-Wert bei 0,92 kg/dm³. Hierbei blieb die Biegefestigkeit unverändert bei 2,6 N/mm², die Druckfestigkeit sank aber um 1,1 N/mm² auf 8,3 N/mm². Bei identischer Konsistenz (Rezeptur 17) erhöhten sich die Trockenrohddichte auf 0,99 kg/dm³, die Biegezugfestigkeit auf 3,3 N/mm² und die Druckfestigkeit auf 11,7 N/mm².

Durch die Verwendung des groben PBG-A sanken die Trockenrohddichte auf 0,88 kg/dm³, die Biegezugfestigkeit auf 2,0 N/mm² und die Druckfestigkeit auf 7,0 N/mm².

Die Festigkeiten aller Prüfserien erwiesen sich als ausreichend für eine potenzielle Bauplattenherstellung. Durch die Verwendung des groben PBG-A stellten sich aber nach dem Abstoßen des überschüssigen Mörtels raue Probenoberflächen ein, die sich für die Herstellung von Bauplatten aus optischen Gründen als hinderlich darstellen.

Tabelle 17: Festmörteleigenschaften von PBGM mit unterschiedlichen Porenbetongranulaten

Rezept-Nr.	Trockenrohdichte [kg/dm ³]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
12	0,94	2,6	9,4
16	0,92	2,6	8,3
17	0,99	3,3	11,7
18	0,88	2,0	7,0

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Grobe PBG können durch den Mischprozess zerstört werden. Um den Effekt der Kornzerstörung auf die Korngrößenverteilung zu erfassen, wurden PBG-A_{grob} und Wasser in einen Mischtrog gegeben, beide Komponenten 1 min bei langsamer Geschwindigkeit gemischt und anschließend über einem Sieb mit 0,2 mm Maschenweite ausgewaschen. Die Korngrößenverteilung wurde vor sowie nach dem Misch- und Waschvorgang bestimmt. Beide Sieblinien sind in Abbildung 23 im Vergleich zur Sieblinie des PBG-A_{fein} dargestellt. Mit diesem Versuch sollte das Maß der Kornzerstörung erfasst und beurteilt werden, ob dies ausreichend ist, um den Brechvorgang im Backenbrecher zu ersetzen.

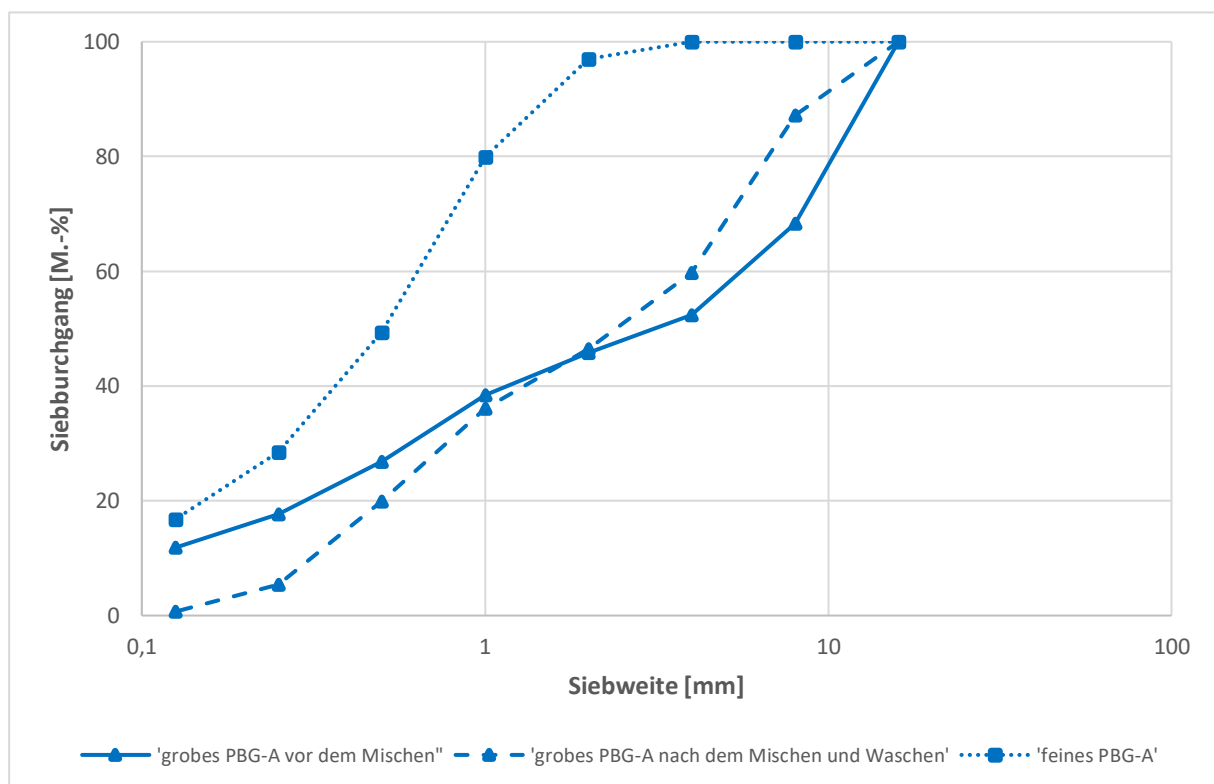


Abbildung 23: Sieblinien von grobem PBG-A vor und nach dem Mischen/Waschen sowie Sieblinie des feinen PBG-A

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Abbildung 23 zeigt zwar, dass durch den Mischprozess grobe Porenbetonkörner zerstört werden und die Körnung insgesamt feiner wird, jedoch die Feinheit des PBG-A_{fein} bei weitem nicht erreicht wird, da der gewählte Mischvorgang bei langsamer Geschwindigkeit im Labormörtelmischer eine vergleichsweise schonende Mischvariante darstellt. Somit kann der Brechaufwand nicht um einen Prozessschritt reduziert

werden, um eine ausreichend feine PBG-Körnung zu erzielen. Dies bestätigt auch die o. g. Beobachtung der sich einstellenden rauen Oberflächen der Mörtelprismen.

Einsatz von zwei unterschiedlichen Verzögerern (VZ1 und VZ2)

Die Untersuchungen der Versuchsserien ohne Zusatzmittel zeigten, dass die PBGM schnell ansteiften. Um ausreichende Verarbeitungszeiten zu gewährleisten wurden Mörteln mit einem PBG-Gehalt von 40 Ma.-% zwei Verzögerer (VZ1, VZ2) in unterschiedlichen Dosierungen zugegeben. Der R-Wert wurde zunächst entsprechend der Vergleichsrezeptur Nr. 12 ohne Verzögerer auf 0,495 festgelegt. Die Dosierung der Verzögerer betrug 0,005, 0,010 und 0,015 Ma.-% der Trockenmörtelmasse (TMM). Der Einsatz der Verzögerer hatte eine verflüssigende Wirkung auf die PBGM. Das Ausbreitmaß erhöhte sich von (165±5) mm auf ca. 200 mm. Angestrebt wurde ein Verarbeitbarkeitszeitraum von mindestens 20 min. Mit einer Dosierung des Verzögerers VZ-1 wurde dies bereits bei einer Dosierung von 0,005 Ma.-% der Trockenmörtelmasse erzielt. Vom Verzögerer VZ-2 war hierfür die doppelte Menge von 0,010 Ma.-% erforderlich. Für beide Verzögerer mit den genannten Dosierungen wurde die Wasserdosierung angepasst, dass sich ein Ausbreitmaß von (165±5) mm einstellte. Abschließend wurden bei einer Dosierung des Verzögerers VZ-1 von 0,005 Ma.-% der Trockenmörtelmasse ein PBGM mit 25 Ma.-% PBG-Gehalt sowie ein Gipsleim mit der o. g. Zielkonsistenz hergestellt.

Die Rezepturen dieser Versuchsserien sind in Tabelle 18, die Frischmörteleigenschaften in Tabelle 19 und die Festmörteleigenschaften in Tabelle 20 zu finden.

Tabelle 18: Rezepturen von PBGM mit VZ1 und VZ2

Rez.- Nr.	Substi- tution [Ma.-%]	VZ- Nr.	Dosierung VZ [Ma.-% der TMM]	Stuck- gips [kg/m³]	PBG- A _{fein} [kg/m³]	VZ [kg/m³]	Wasser _{ges.} [kg/m³]	Wasser _{frei} [kg/dm³]	R-Wert [-]
19	40	1	0,005	525	350	0,044	617	433	0,495
20	40	1	0,010	517	344	0,086	607	426	0,495
21	40	1	0,015	517	345	0,129	608	426	0,495
22	40	2	0,005	517	345	0,043	607	426	0,495
23	40	2	0,010	530	353	0,088	622	437	0,495
24	40	2	0,015	519	346	0,130	610	428	0,495
25	40	1	0,005	542	362	0,045	606	415	0,460
26	40	2	0,010	540	360	0,090	603	414	0,460
45	25	1	0,005	777	259	0,052	578	442	0,427
46	0	1	0,005	1190	0	0,060	547	547	0,460

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Die Frischmörtelrohdichte der Mörtel mit 40 Ma.-% PBG lag unabhängig des verwendeten Verzögerers und der jeweiligen Dosierung bei ca. 1,5 kg/dm³. Durch die Erhöhung des Gipsanteils auf 75 bzw. 100 % erhöhte sich die Frischmörtelrohdichte auf 1,62 bzw. 1,74 kg/dm³.

Der Verzögerer Nr. 1 bewirkte eine höhere Verzögerung als der Verzögerer Nr. 2. Während sich beim Verzögerer Nr. 1 je nach Dosierung ein Versteifungsbeginn nach ca. 30 bis 60 min einstellte, trat der Versteifungsbeginn durch die Verwendung des Verzögerers Nr. 2 nach 21 bis 35 min ein. Bei einer Anpassung der Konsistenz auf ein

Ausbreitmaß von (165 ± 5) mm und der Dosierung des Verzögerers Nr. 1 von 0,005 Ma.-% der Trockenmörtelmasse und der Dosierung des Verzögerers Nr. 2 von 0,010 Ma.-% der Trockenmörtelmasse wurde der Versteifungsbeginn nach ca. 25 bzw. 27 min festgestellt.

Der Versteifungsbeginn des Mörtels mit 25 Ma.-% PBG und der Gipsleim, beide mit einer Dosierung des Verzögerers VZ1 von 0,005 Ma.-% der Trockenmörtelmasse, wiesen einen Versteifungsbeginn nach 23 bzw. 22 min auf.

Tabelle 19: Frischmörteleigenschaften von PBGM mit VZ1 und VZ2

Rezept-Nr.	Ausbreitmaß [mm]	Versteifungsbeginn [h:min:s]	Frischmörtelrohdichte [kg/dm³]
19	202	00:29:30	1,49
20	203	00:45:30	1,47
21	197	01:00:40	1,47
22	198	00:21:00	1,47
23	201	00:29:40	1,51
24	196	00:35:00	1,48
25	164	00:24:50	1,51
26	167	00:27:00	1,50
45	165	00:23:00	1,62
46	163	00:22:00	1,74

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Die Trockenrohdichte der Mörtel mit 40 Ma.-% PBG unter Zugabe von Verzögerer lag bei einem R-Wert von 0,495 zwischen 0,92 und 0,93 kg/dm³. Hierbei variierte die Biegezugfestigkeit zwischen 1,9 und 2,3 N/mm² und die Druckfestigkeit zwischen 6,4 und 7,1 N/mm². Die Reduzierung des R-Werts auf 0,46 führte zu einer Trockenrohdichte von 0,94 N/mm², Biegezugfestigkeiten von 2,5 und 2,8 N/mm² sowie einer Druckfestigkeit von 9,2 N/mm². Dies entspricht in etwa den Festmörteleigenschaften der Vergleichsrezeptur 12 ohne Verzögerer.

Die Biegezugfestigkeit der Rezeptur 45 mit 25 Ma.-% PBG und 0,005 Ma.-% VZ1 betrug 4,2 N/mm² bei einer Trockenrohdichte von 1,12 kg/dm³. Ihre Druckfestigkeit lag bei 15,4 N/mm². Dies entspricht in etwa den Festmörteleigenschaften der Vergleichsrezeptur Nr. 4 ohne Verzögerer, mit der Ausnahme der Biegezugfestigkeit, die bei der Rezeptur 4 mit 3,2 N/mm² merklich niedriger ausfiel.

Der Gipsleim wies eine Trockenrohdichte von 1,35 kg/dm³, eine Biegezugfestigkeit von 4,8 N/mm² und eine Druckfestigkeit von 24,3 N/mm² auf. Die Trockenrohdichte und die Druckfestigkeit fielen im Vergleich zur Rezeptur 14 ohne Verzögerer höher aus, während die Biegezugfestigkeit geringfügig niedriger ausfiel. Beim Vergleich muss aber berücksichtigt werden, dass die Rezeptur 14 ein um 17 mm höheres Ausbreitmaß aufwies.

Abbildung 24 zeigt den Versteifungsbeginn von PBGM mit 40 Ma.-% feinem PBG-A und einem R-Wert von 0,495 (Rezepturen 19-24) und dem Einsatz zweier Verzögerer in Dosierungen von 0,005 bis 0,015 Ma.-% der Trockenmörtelmasse im Vergleich zum Versteifungsbeginn der Rezeptur 12 ohne Verzögerer. Während der Versteifungsbeginn ohne Zugabe eines Verzögerers nach ca. 9 min eintrat, konnte mit dem Einsatz des Verzögerers VZ1 der Versteifungsbeginn auf ca. 30, 45 und 60 min und mit dem Einsatz des Verzögerers VZ2 auf ca. 21, 30 und 35 min hinausgezögert werden. Der Verzögerer VZ1 zeigte somit eine höhere

Verzögerungswirkung als der Verzögerer VZ2. Für einen Versteifungsbeginn nach 30 min wurde im Vergleich zum VZ2 nur die Hälfte der Dosierung benötigt.

Tabelle 20: Festmörteleigenschaften von PBGM mit VZ1 und VZ2

Rezept-Nr.	Trockenrohdichte [kg/dm ³]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
19	0,92	2,3	6,9
20	0,93	1,9	6,4
21	0,93	1,9	6,4
22	0,93	2,1	7,0
23	0,92	2,1	6,7
24	0,93	2,0	7,1
25	0,94	2,5	9,2
26	0,94	2,8	9,2
45	1,12	4,2	15,4
46	1,35	4,8	24,3

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

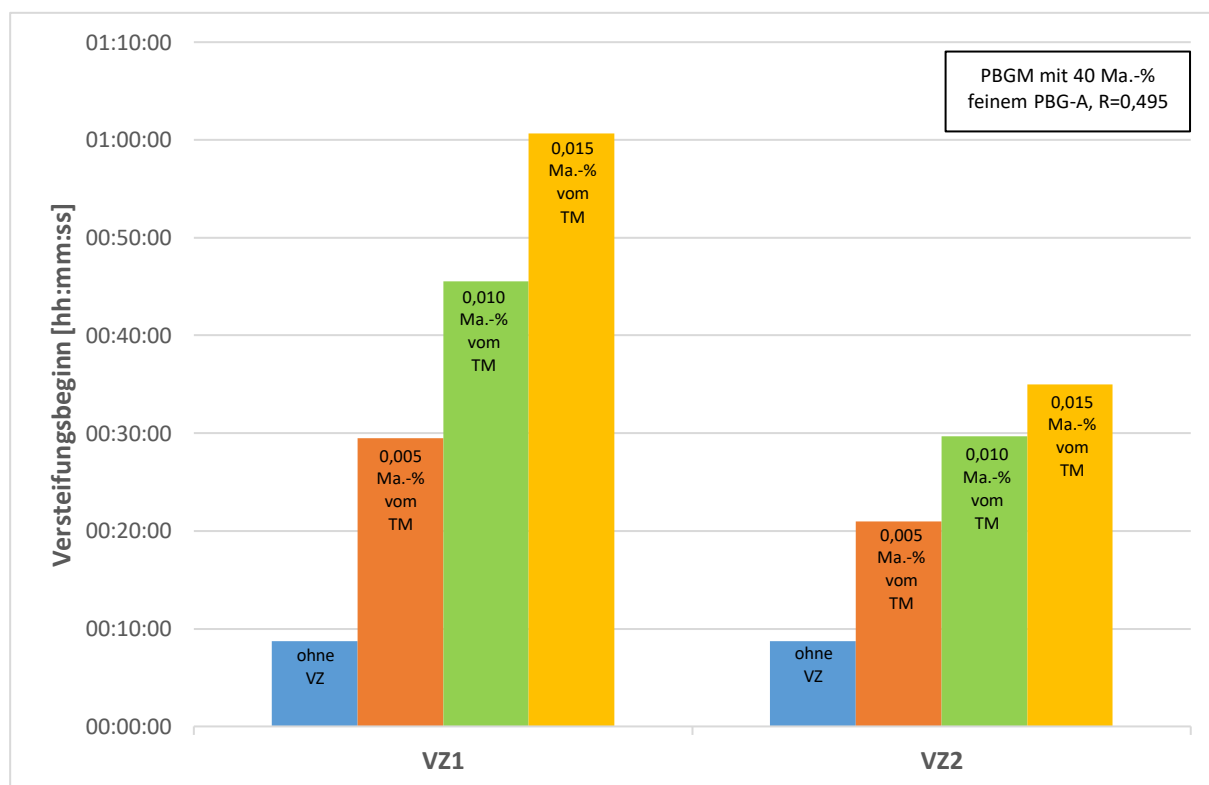


Abbildung 24: Versteifungsbeginn von PBGM mit 40 Ma.-% PBG unter Verwendung von zwei Verzögerern mit variierender Dosierung

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Einsatz eines Luftporenbildners (LP) in Kombination mit dem Verzögerer VZ1

Da die PBGM ohne die Zugabe eines Verzögerers sehr schnell ansteiften, wurden die folgenden Rezepturen mit der Zugabe des Verzögerers VZ1 in einer Dosierung von 0,005 Ma.-% der Trockenmörtelmasse hergestellt. Den PBGM mit einem PBG-Anteil von 40 Ma.-% und 25 Ma.-% mit Verzögerer wurde mit Luftporenbildner in Dosierungen von 0,025, 0,050, 0,075, 0,15 (nur Variante mit 40 Ma.-% PBG) und 0,2 Ma.-% der Trockenmörtelmasse hergestellt, um die Rohdichte zu senken und die Auswirkungen auf die Mörtel Eigenschaften zu untersuchen. Alle Mörtelmischungen wurden durch Variation der Wasserzugabe auf ein Ausbreitmaß von (165 ± 5) mm eingestellt.

In Tabelle 21 sind die Rezepturen der beschriebenen Versuchsserien, in Tabelle 22 die Frischmörtel-eigenschaften und in Tabelle 23 die Festmörtel Eigenschaften aufgeführt.

Es zeigte sich, dass die Rohdichte durch Dosierungen des Luftporenbildners von 0,025 bis 0,075 Ma.-% der Trockenmörtelmasse, die entsprechend der Herstellerangaben zunächst gewählt wurden, nur geringfügig gesenkt werden konnte. Bei einem PBG-Gehalt von 40 Ma.-% war ein R-Wert von 0,450 erforderlich, um die Zielkonsistenz zu erzielen. Bei einem PBG-Gehalt von 25 Ma.-% war der R-Wert mit 0,449 nahezu identisch.

Die weitere Erhöhung der LP-Dosierungen auf 0,15 bzw. 0,2 Ma.-% der Trockenmörtelmenge führte dann zu einer merklichen Senkung der Rohdichten. Für die Zielkonsistenz musste die Wasserdosierung ein wenig reduziert werden. Die resultierenden R-Werte betrugen 0,420 bei einem PBG-Anteil von 40 Ma.-% bzw. 0,429 bei einem PBG-Anteil von 25 Ma.-%.

Tabelle 21: Rezepturen von PBGM mit VZ1 und LP

Rez.- Nr.	Substi- tution [Ma.-%]	Dosierung LP [Ma.-% der TMM]	Stuck- gips [kg/m³]	PBG- A _{fein} [kg/m³]	VZ [kg/m³]	LP [kg/m³]	Wasser _{ges.} [kg/m³]	Wasser _{frei} [kg/dm³]	R- Wert [-]
27	40	0,025	531	354	0,044	0,221	584	398	0,450
28	40	0,050	517	345	0,043	0,431	569	387	0,450
29	40	0,075	496	331	0,041	0,620	546	372	0,450
39	40	0,150	486	324	0,041	1,216	511	340	0,420
40	40	0,200	465	310	0,039	1,551	489	325	0,420
30	25	0,025	744	248	0,050	0,248	575	445	0,449
31	25	0,050	743	248	0,050	0,495	574	444	0,449
32	25	0,075	732	244	0,049	0,732	566	438	0,449
41	25	0,200	678	226	0,045	1,809	506	388	0,429

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Der Versteifungsbeginn der Mörtel mit Verzögerer und Luftporenbildner erfolgte nach ca. 24 bis 28,5 min. Somit konnte eine Verarbeitungszeit von mindestens 20 min gewährleistet werden.

Während die Trockenrohichte der Vergleichsrezeptur ohne LP bei einem PBG-Anteil von 40 Ma.-% (Rezeptur 25) 0,94 kg/dm³ und bei einem PBG-Anteil von 25 Ma.-% (Rezeptur 45) 1,12 kg/dm³ betrug, konnten die Trockenrohichten durch Zugabe des Luftporenbildners auf bis zu 0,82 bzw. 0,99 kg/dm³ gesenkt werden.

Die Biegezugfestigkeit der Vergleichsrezepturen ohne LP betrug 2,5 bzw. 4,2 N/mm² und sank durch die Zugabe des Luftporenbildners auf bis zu 1,8 bzw. 3,0 N/mm². Die Druckfestigkeit reduzierte sich von 9,2 bzw. 15,4 N/mm² auf bis zu 4,1 bzw. 9,2 N/mm². Die Festigkeiten der PBGM mit VZ und LP sind für die Herstellung von

Bauplatten ausreichend, jedoch kann die Reduzierung der Dichte auch sehr effektiv durch die Erhöhung des PBG-Gehalts erzielt werden.

Tabelle 22: Frischmörteleigenschaften von PBGM mit VZ1 und LP

Rezept-Nr.	Ausbreitmaß [mm]	Versteifungsbeginn [h:min:s]	Frischmörtelrohdichte [kg/dm ³]
27	170	00:27:00	1,47
28	167	00:26:25	1,43
29	164	00:24:15	1,37
39	166	00:27:30	1,32
40	165	00:28:30	1,27
30	167	00:26:30	1,57
31	170	00:26:50	1,57
32	170	00:28:00	1,54
41	168	00:26:30	1,41

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Tabelle 23: Festmörteleigenschaften von PBGM mit VZ1 und LP

Rezept-Nr.	Trockenrohdichte [kg/dm ³]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
27	0,92	2,4	8,8
28	0,92	2,6	8,3
29	0,87	2,1	6,9
39	0,87	2,2	5,5
40	0,82	1,8	4,1
30	1,07	3,2	12,8
31	1,06	3,4	12,1
32	1,06	3,1	12,0
41	0,99	3,0	9,2

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

In Abbildung 25 sind die Festmörteleigenschaften von PBGM mit 25 und 40 Ma.-% PBG und VZ1 in Abhängigkeit der Menge an zugegebenen Luftporenbildner dargestellt. Mit Erhöhung der LP-Dosierung sinken die Trockenrohdichte sowie die Druckfestigkeit merklich. Tendenziell sinkt auch die Biegezugfestigkeit, jedoch nicht so deutlich wie die Druckfestigkeit.

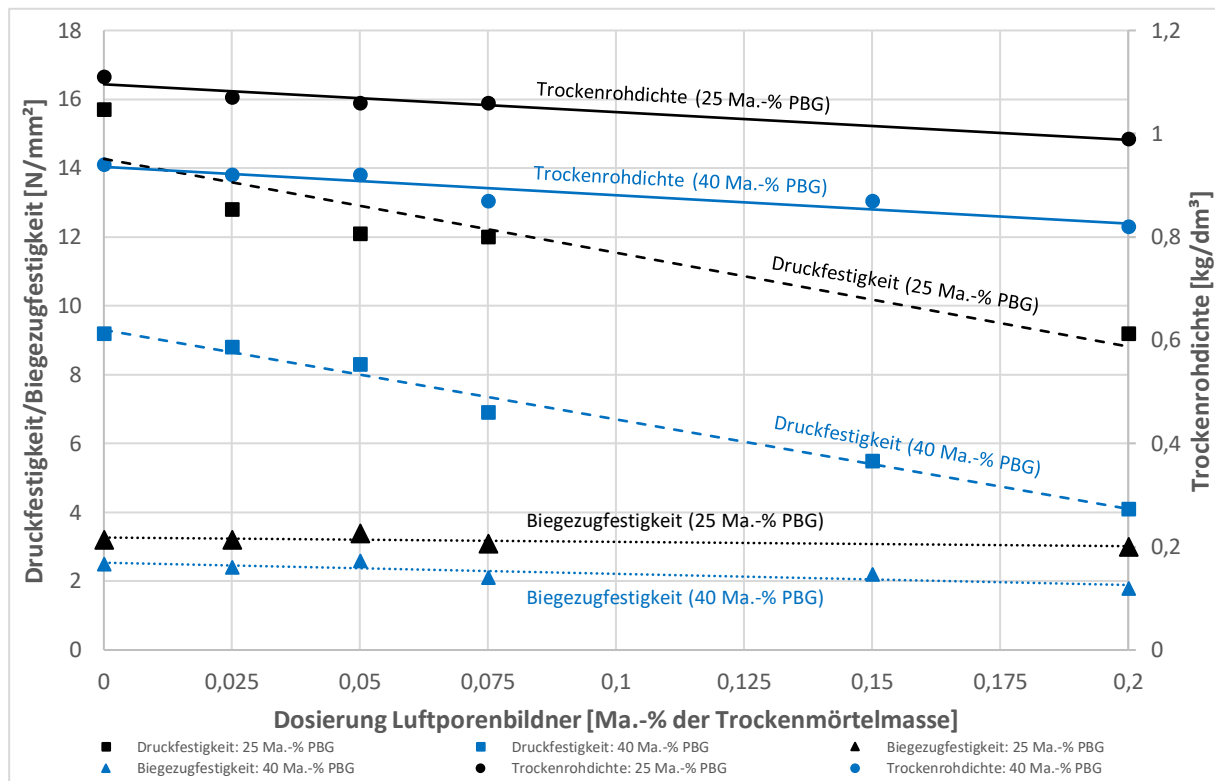


Abbildung 25: Festmörtel Eigenschaften von PBGM mit 25 und 40 Ma.-% PBG und dem Verzögerer VZ1 in Abhängigkeit der Zugabe eines Luftporenbildners

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Einsatz eines Fließmittels (FM) in Kombination mit dem Verzögerer VZ1

Zur Reduzierung des Wassergehalts und somit des R-Werts wurden dem PBGM mit 40 Ma.-% PBG Fließmittel (FM) in einer Dosierung von 0,15, 0,30 und 0,45 Ma.-% der Bindemittelmasse (BMM) hinzugegeben und die Auswirkungen auf die Mörtel Eigenschaften untersucht. Hierbei wurde weiterhin der Verzögerer VZ1 in einer Menge von 0,005 Ma.-% der Trockenmörtelmasse verwendet. Die Wasserdosierung wurde so geregelt, dass sich ein Ausbreitmaß von (165 ± 5) mm ergab.

Die Rezepturen der Mörtel sind in der Tabelle 24, ihre Frischmörtel Eigenschaften in der Tabelle 25 und ihre Festmörtel Eigenschaften in der Tabelle 26 zu finden.

Während die Vergleichsrezeptur 25 ohne Fließmittel noch einen R-Wert von 0,460 benötigte, um die Zielkonsistenz zu erzielen, konnte der R-Wert durch die Verwendung von Fließmittel bei einer Dosierung von 0,45 Ma.-% der Bindemittelmasse auf 0,317 gesenkt werden.

Die Frischmörtelrohdichte wurde durch den Einsatz des Fließmittels nicht maßgeblich beeinflusst.

Durch die Fließmittelzugabe wurde eine Verstärkung der Verzögerungswirkung verursacht. Ohne Fließmittel wurde der Versteifungsbeginn nach ca. 25 min festgestellt. Durch den Einsatz des Fließmittels wurde der Versteifungsbeginn je nach Dosierung auf 32 min, 51 min bzw. 1,5 h hinausgezögert.

Tabelle 24: Rezepturen von PBGM mit VZ1 und FM

Rez.-Nr.	Substitution [Ma.-%]	Dosierung FM [Ma.-% der BMM]	Stuckgips [kg/m³]	PBG-A _{fein} [kg/m³]	VZ [kg/m³]	FM [kg/m³]	Wasser _{ges.} [kg/m³]	Wasser _{frei} [kg/dm³]	R-Wert [-]
33	40	0,15	543	362	0,045	0,814	567	377	0,417
34	40	0,30	562	375	0,047	1,686	534	337	0,360
35	40	0,45	554	369	0,046	2,493	487	292	0,317

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Tabelle 25: Frischmörteleigenschaften von PBGM mit VZ1 und FM

Rezept-Nr.	Ausbreitmaß [mm]	Versteifungsbeginn [h:min:s]	Frischmörtelrohdichte [kg/dm³]
33	165	00:32:00	1,47
34	168	00:51:30	1,47
35	168	01:27:06	1,41

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Während die Fließmittelzugabe im Wesentlichen zu einer Reduzierung des R-Werts und zu einer Erhöhung der Verzögerungswirkung führte, wurden die Trockenrohdichten und die Festigkeiten nur geringfügig beeinflusst. Es konnte eine Erhöhung der Trockenrohdichte und der Druckfestigkeit von geringem Ausmaß beobachtet werden. Die Biegezugfestigkeit blieb nahezu unverändert. In Abbildung 26 sind die R-Werte sowie die Festigkeiten der PBGM mit VZ1 in Abhängigkeit der zugegebenen Fließmittelmenge dargestellt.

Tabelle 26: Festmörteleigenschaften von PBGM mit Verzögerer VZ1 und FM

Rezept-Nr.	Trockenrohdichte [kg/dm³]	Biegezugfestigkeit [N/mm²]	Druckfestigkeit [N/mm²]
33	0,95	2,7	9,9
34	0,98	2,9	11,8
35	0,96	2,8	11,2

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

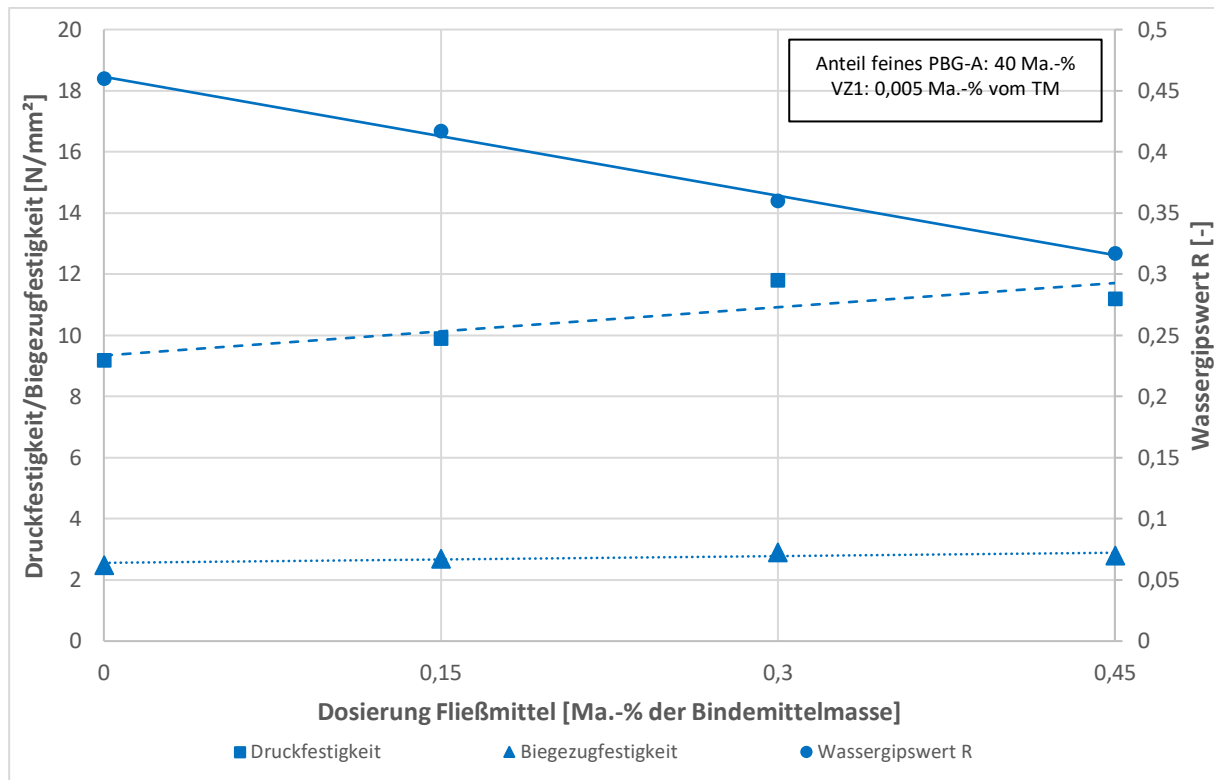


Abbildung 26: R-Wert und Festigkeiten von PBGM mit 40 Ma.-% PBG und VZ1 in Abhängigkeit der Zugabe eines Fließmittels

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Einsatz eines Fließmittels (FM) in Kombination mit dem Verzögerer VZ1 und LP

In den Versuchsserien 36-38 wurden der Einsatz des Fließmittels in Kombination mit dem Verzögerer VZ1 und dem Luftporenbildner untersucht. Der Verzögerer wurde in einer Menge von 0,005 Ma.-% und der Luftporenbildner in einer Zugabemenge von 0,05 Ma.-% der Trockenmörtelmasse verwendet. Die Dosierung des Fließmittels wurde zwischen 0,15 und 0,45 Ma.-% der Bindemittelmenge variiert. Untersucht wurden PBGM mit einem PBG-Anteil von 40 Ma.-%. Das Ausbreitmaß wurde auf (165 ± 5) mm geregelt.

Die Rezepturen der PBGM mit VZ1, LP und FM sind in der Tabelle 27, ihre Frischmörteleigenschaften in Tabelle 28 und ihre Festmörteleigenschaften in Tabelle 29 aufgeführt.

Im Vergleich zur Rezeptur 28 ohne Fließmittel konnte der R-Wert durch den Einsatz des Fließmittels effektiv von 0,45 auf bis zu 0,305 bei einem FM-Gehalt von 0,45 Ma.-% bezogen auf die Bindemittelmasse gesenkt werden. Damit einhergehend wurde die Druckfestigkeit von 8,3 N/mm² auf bis zu 12,1 N/mm² erhöht. Die Biegezugfestigkeit erhöhte sich geringfügig von 2,6 N/mm² auf bis zu 3,0 N/mm².

Durch die Zugabe des Fließmittels wurde eine höhere Verzögerung der Mörtel verursacht. Mit Erhöhung des Fließmittelgehalts war ein späterer Versteifungsbeginn festzustellen. Während der Mörtel der Vergleichsrezeptur Nr. 28 ohne Fließmittel nach ca. 26,5 min anstifte, erfolgte der Versteifungsbeginn der Mörtel mit Fließmittel je nach Dosierung nach 31 min, 50 min bzw. 1,5 h.

Die Frisch- und Festmörtelrohdichten wurden nicht wesentlich von der Fließmittelzugabe beeinflusst. Tendenziell erhöhten sich die Dichten geringfügig mit der Erhöhung der Fließmittelmenge.

Tabelle 27: Rezepturen PBGM mit VZ1, LP und FM

Rez.-Nr.	Substitution [Ma.-%]	Dosierung FM [Ma.-% d. BMM]	Stuckgips [kg/m³]	PBG-A _{fein} [kg/m³]	VZ [kg/m³]	LP [kg/m³]	FM [kg/m³]	Wasser _{ges.} [kg/m³]	Wasser _{frei} [kg/dm³]	R-Wert [-]
36	40	0,15	540	360	0,045	0,450	0,810	565	376	0,418
37	40	0,30	563	375	0,047	0,469	1,689	516	319	0,340
38	40	0,45	560	373	0,047	0,467	2,520	481	284	0,305

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Tabelle 28: Frischmörteleigenschaften PBGM mit VZ1, LP und FM

Rezept-Nr.	Ausbreitmaß [mm]	Versteifungsbeginn [h:min:s]	Frischmörtelrohdichte [kg/dm³]
36	170	00:31:10	1,47
37	166	00:50:00	1,46
38	170	01:25:00	1,42

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Die Biegezugfestigkeit erhöhte sich im Vergleich zur Vergleichsrezeptur Nr. 28 ohne Fließmittel von 2,6 auf bis zu 3,0 N/mm² bei einem FM-Gehalt von 0,45 Ma.-% der Bindemittelmasse. Die Druckfestigkeit erhöhte sich von 8,3 auf bis zu 12,1 N/mm².

Tabelle 29: Festmörteleigenschaften PBGM mit VZ1, LP und FM

Rezept-Nr.	Trockenrohdichte [kg/dm³]	Biegezugfestigkeit [N/mm²]	Druckfestigkeit [N/mm²]
36	0,94	2,8	9,8
37	0,98	2,9	11,8
38	0,98	3,0	12,1

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Die R-Werte sowie die Biegezug- und die Druckfestigkeit der PBGM mit Verzögerer VZ1 und Luftporenbildner in Abhängigkeit der Fließmitteldosierung sind in der nachfolgenden Abbildung 27 dargestellt.

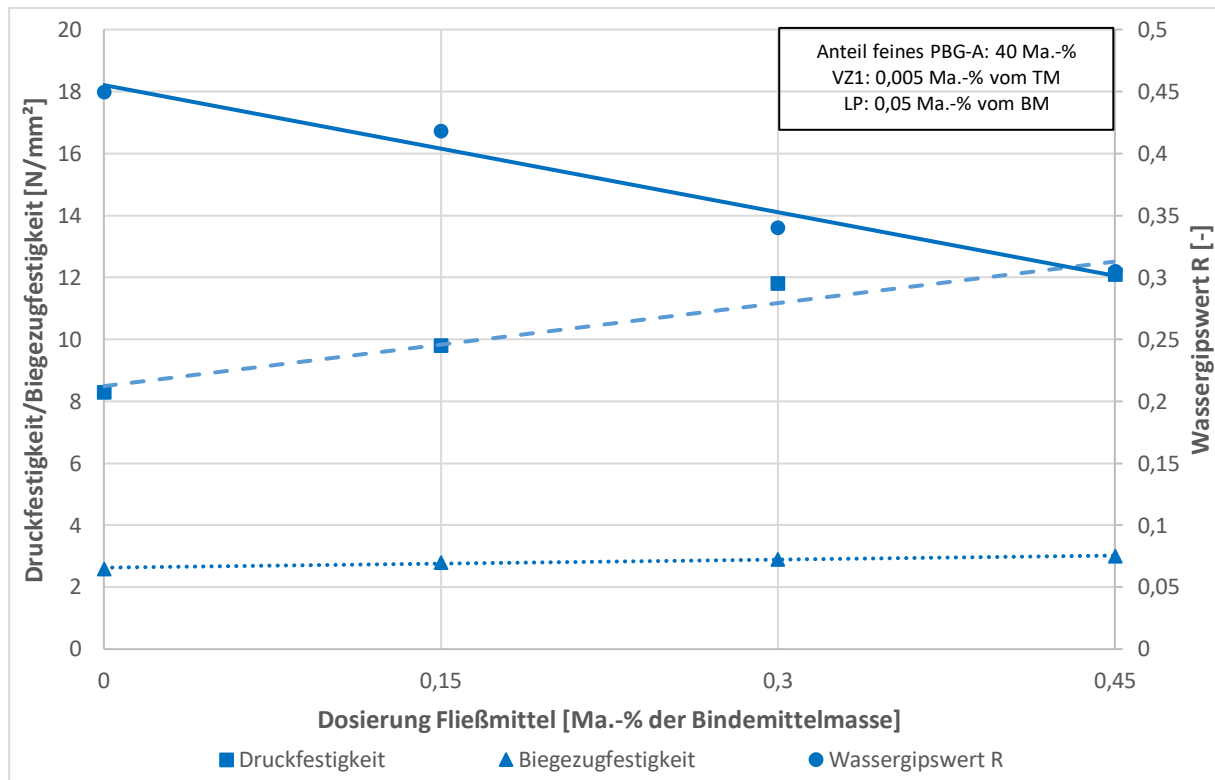


Abbildung 27: R-Wert und Festigkeiten von PBGM mit 40 Ma.-% PBG, VZ1 und LP in Abhängigkeit der Zugabe eines Fließmittels

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Einsatz von Recyclinggips

In den bisherigen Versuchsserien wurde ein handelsüblicher Stuckgips als Bindemittel verwendet. In den Serien 42 bis 44 kam nun der eigens für das vorliegende Vorhaben gemahlene und kalzinierte Recyclinggips (RC-Gips) zum Einsatz. Gemischt wurden ein Gipsleim sowie PBGM mit 25 und 40 Ma.-% PBG-A_{fein}. Analog zu den Versuchsserien mit Stuckgips sollte durch die Zugabe des Verzögerers VZ1 eine Verarbeitungszeit von mindestens 20 min gewährleistet werden. Die Zielkonsistenz wurde über ein Ausbreitmaß von (165±5) mm definiert.

Die Rezepturen des Gipsleims/der PBGM mit RC-Gips sind in der Tabelle 30, die Frischleim-/Frischmörteleigenschaften in Tabelle 31 und die Festleim-/Festmörteleigenschaften in Tabelle 32 zu finden.

Abbildungen 28 und 29 zeigen die Biegezug- und die Druckfestigkeiten des Referenzleims/der PBGM mit Stuckgips (Rezepturen 25, 45 und 46) im Vergleich zu den Festigkeiten des Referenzleims/der PBGM mit RC-Gips.

Während bei den Serien mit Stuckgips eine Dosierung des Verzögerers VZ1 von 0,005 Ma.-% der Trockenmörtelmasse ausreichend war, um einen Versteifungsbeginn oberhalb von ca. 20 min zu erzielen, musste die Verzögererdosierung beim Einsatz des RC-Gipses um den Faktor 10 erhöht werden. Mit einer Dosierung von 0,05 Ma.-% der Trockenmörtelmasse trat der Versteifungsbeginn bei einem PBG-Gehalt von 40 Ma.-% nach 25 min ein. Bei einem PBG-Gehalt von 25 Ma.-% steifte der Mörtel bereits nach 19 min an. Der Versteifungsbeginn des Gipsleims wurde nach 19,5 min festgestellt.

Im Vergleich zu den Mörteln mit Stuckgips erforderten die Mörtel mit RC-Gips höhere R-Werte für die Zielkonsistenz. Je höher der Gipsanteil in der Mischung war, umso höher fiel die Differenz zwischen den R-Werten der jeweiligen Vergleichsrezepturen aus.

Tabelle 30: Rezepturen des Gipsleims und der PBGM mit RC-Gips im Vergleich zu den Rezepturen mit Stuckgips

Rez.-Nr.	Substitution [Ma.-%]	Gipsart	Gips [kg/m³]	PBG-A _{fein} [kg/m³]	VZ1 [kg/m³]	Wasser _{ges.} [kg/m³]	Wasser _{frei} [kg/dm³]	R-Wert [-]
44	0	RC-Gips	914	0	0,457	622	622	0,680
43	25	RC-Gips	613	204	0,408	600	493	0,604
42	40	RC-Gips	460	306	0,383	590	429	0,560
46	0	Stuckgips	1190	0	0,060	547	547	0,460
45	25	Stuckgips	777	259	0,052	578	442	0,427
25	40	Stuckgips	542	362	0,045	606	415	0,460

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Die Frischmörtelrohddichte des RC-Gipsleims betrug 1,54 kg/dm³. Bei PBG-Gehalten von 25 bzw. 40 Ma.-% sank die Frischmörtelrohddichte auf 1,42 bzw. 1,36 kg/dm³. Die Frischmörtelrohddichte der Serien mit RC-Gips war somit trotz höherer R-Werte aufgrund der niedrigeren Rohddichte des RC-Gipses um 0,15 bis 0,2 kg/dm³ niedriger als die Frischmörtelrohddichte der Vergleichsserien mit Stuckgips.

Tabelle 31: Frischleim-/Frischmörteleigenschaften der Rezepturen mit RC-Gips im Vergleich zu den Rezepturen mit Stuckgips

Rezept-Nr.	Ausbreitmaß [mm]	Versteifungsbeginn [h:min:s]	Frischmörtelrohddichte [kg/dm³]
44	161	00:19:30	1,54
43	160	00:19:00	1,42
42	165	00:25:00	1,36
46	163	00:22:00	1,74
45	165	00:23:00	1,62
25	164	00:24:50	1,51

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Der Gipsleim und die PBGM mit RC-Gips wiesen niedrigere Trockenrohddichten auf als die Vergleichsserien mit Stuckgips. Die Differenz der Trockenrohddichte der jeweiligen Vergleichsmischungen war umso höher, je höher der Gipsanteil in der Mischung war.

Die Biegezugfestigkeit des Referenzleims mit RC-Gips betrug 3,1 N/mm². Durch Substitution von 25 bzw. 40 Ma.-% des Gipses durch PBG sank die Biegezugfestigkeit auf 2,4 bzw. 1,6 N/mm². Der Referenzleim mit RC-Gips wies eine Druckfestigkeit von 12,7 N/mm² auf. Durch die Verwendung von 25 bzw. 40 Ma.-% PBG ergaben sich Druckfestigkeiten von 7,7 bzw. 4,6 N/mm².

Im Vergleich zu den Mischungen mit Stuckgips wurden durch die Verwendung des RC-Gipses um ca. 50 % niedrigere Druckfestigkeiten und um ca. 40 % geringere Biegezugfestigkeiten erzielt.

Festzuhalten bleibt, dass der RC-Gips durch das Mahlen und Kalzinieren wieder in einen reaktionsfähigen Zustand gebracht werden konnte. Die PBGM mit RC-Gips wiesen im Vergleich zu den Mörteln mit Stuckgips niedrigere Festigkeiten auf. Eine Herstellung von Bauplatten mit 100 % Recyclingmaterial (RC-Gips und PBG-

A_{fein}) ist mit den vorliegenden Eigenschaften jedoch möglich. Der PBG-Gehalt kann je nach benötigter Festigkeit für entsprechende Einsatzzwecke angepasst werden.

Tabelle 32: Festleim-/Festmörteleigenschaften der Rezepturen mit RC-Gips im Vergleich zu den Rezepturen mit Stuckgips

Rezept-Nr.	Trockenrohdichte [kg/dm ³]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
44	1,05	3,1	12,7
43	0,90	2,4	7,7
42	0,82	1,6	4,6
46	1,35	4,8	24,3
45	1,12	4,2	15,4
25	0,94	2,5	9,2

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

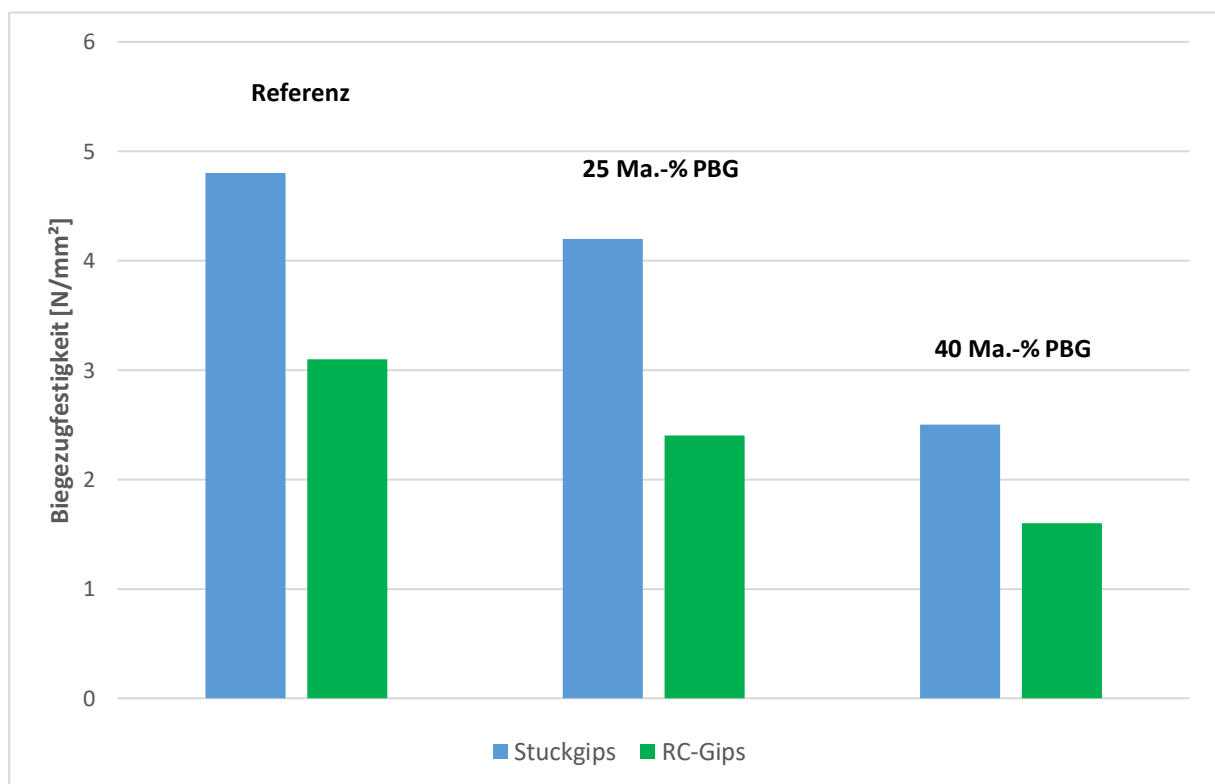


Abbildung z8: Biegezugfestigkeit der Gipsleime sowie PBGM mit RC-Gips und Stuckgips

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

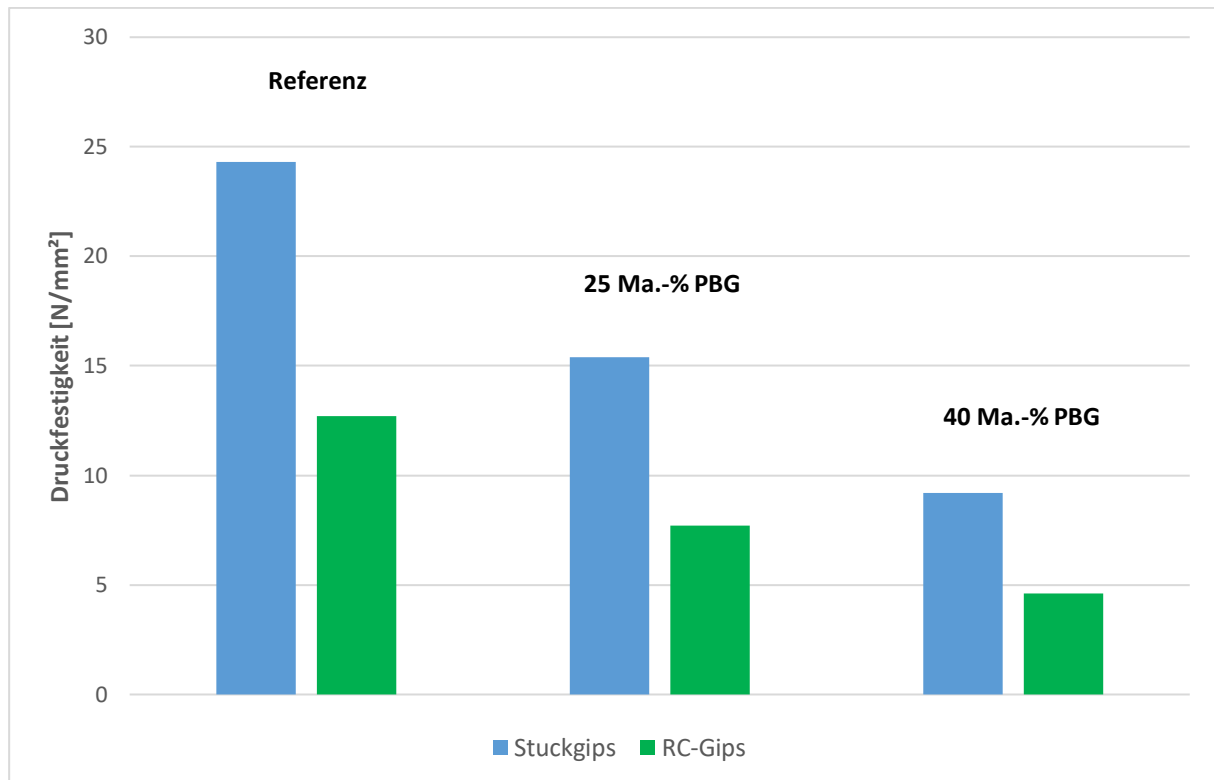


Abbildung 29: Druckfestigkeit der Gipsleime sowie PBGM mit RC-Gips und Stuckgips

Untersuchung eines zweiten Recyclingzyklus'

Zur Simulation eines zweiten Recyclingzyklus' wurden Probepplatten des PBGM der Rezeptur 19 hergestellt und anschließend auf eine Korngröße < 4 mm gebrochen. Dieses Granulat aus Plattenbruch (GPB) wies eine ähnliche Korngrößenverteilung wie das feine Porenbetongranulat aus Abbruchmaterial auf (siehe Abbildung 30). Lediglich im Korngrößenbereich von 1 bis 2 mm war das GPB etwas gröber zusammengesetzt.

Das GPB wurde zur Herstellung von PBGM in einem zweiten Recyclingzyklus verwendet. 25 und 40 Ma.-% des Stuckgipses wurden durch GPB substituiert. Zudem wurde das Substitut jeweils zur Hälfte aus feinem PBG und GPB zusammengesetzt.

Mörtel mit GPB steiften extrem schnell an. Im Vergleich zu den Mörteln mit PBG musste daher die Verzögererdosierung von 0,005 auf 0,31 Ma.-% der Trockenmörtelmasse erhöht werden, um eine Verarbeitbarkeitszeit von mindestens 20 min zu gewährleisten. Das Zielausbreitmaß betrug (165±5) mm. Für die Herstellung von Demonstratorplatten wurde eine weichere Konsistenz bevorzugt. Daher wurde die Rezeptur 49 mit 40 Ma.-% Substitution (PBG zu GPB-Verhältnis: 50/50) zusätzlich mit Fließmittel und einem Zielausbreitmaß von (220±5) mm als Rezeptur 51 hergestellt.

Die Rezepturen der Mörtel mit GPB sind in der Tabelle 33, die Frischmörteleigenschaften in der Tabelle 34 und die Festmörteleigenschaften in der Tabelle 35 aufgeführt.

Im Vergleich zu den Varianten, deren Substitut zur Hälfte aus PBG und GPB bestand, wurden zum Erreichen der Zielkonsistenz für die Varianten, deren Substitut ausschließlich aus GPB bestand, geringere R-Werte benötigt.

Der Versteifungsbeginn trat bei den Mörteln mit PBG und GPB (Rezepturen 47 und 49) nach 43 bzw. 32 min ein. Die Mörtel, die ausschließlich mit GPB hergestellt wurden (Rezepturen 48 und 50), steiften bereits nach 30,5

bzw. 20 min an. Durch die Zugabe eines Fließmittels verstärkte sich die Verzögerungswirkung, so dass der Versteifungsbeginn des Mörtels der Rezeptur 51 erst nach 56,5 min festgestellt wurde.

Die Frischmörtelrohddichte der Mörtel mit 25 Ma.-% PBG und GPB bzw. GPB betrug 1,62 bzw. 1,63 kg/dm³. Bei einem Substitutionsgehalt von 40 Ma.-% wurden mit 1,55 bzw. 1,60 niedrigere Frischmörtelrohddichten erzielt. Im Vergleich zu den Mörteln mit PBG und GPB war die Frischmörtelrohddichte der Mörtel mit GPB um 0,01 bzw. 0,05 kg/dm³ höher. Die Frischmörtelrohddichte des Mörtels der Rezeptur 51 betrug 1,47 kg/dm³.

Tabelle 33: Rezepturen der PBGM mit Anteilen von Granulat aus Plattenbruch (GPB)

Rez.-Nr.	Substitution [Ma.-%]	Anteil PBG/ GPB [Ma.-%]	Stuckgips [kg/m ³]	PBG-A _{fein} [kg/m ³]	GPB [kg/m ³]	VZ [kg/m ³]	FM [kg/m ³]	W _{ges.} [kg/m ³]	W _{frei} [kg/dm ³]	R-Wert [-]
47	25	12,5/12,5	783	131	131	3,238	0	575	437	0,419
48	25	0/25	794	0	265	3,282	0	566	427	0,404
49	40	20/20	576	192	192	2,975	0	585	384	0,400
50	40	0/40	626	0	417	3,233	0	553	333	0,320
51	40	20/20	577	192	192	2,980	2,595	505	302	0,315

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Tabelle 34: Frischmörteleigenschaften der PBGM mit Anteilen von GPB

Rezept-Nr.	Ausbreitmaß [mm]	Versteifungsbeginn [h:min:s]	Frischmörtelrohddichte [kg/dm ³]
47	163	00:43:00	1,62
48	170	00:30:30	1,63
49	170	00:32:00	1,55
50	162	00:20:00	1,60
51	220	00:56:30	1,47

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Die Trockenrohddichte der Mörtel mit PBG und GPB betrug 1,14 kg/dm³ (25 Ma.-% Substitution) und 1,02 kg/dm³ (40 Ma.-% Substitution). Die Mörtel mit GPB wiesen mit 1,17 und 1,12 kg/dm³ um 0,03 bzw. 0,1 kg/dm³ höhere Trockenrohddichten auf. Die Trockenrohddichte des Mörtels der Rezeptur 51 lag bei 1,00 kg/dm³.

Der Mörtel der Rezeptur 47 wies eine Biegezugfestigkeit von 1,2 N/mm² und eine Druckfestigkeit von 4,7 N/mm² auf. Trotz einer geringfügig höheren Trockenrohddichte lag die Biegezugfestigkeit des Mörtels der Rezeptur 48 nur bei 0,9 N/mm² und die Druckfestigkeit bei 3,8 N/mm². Die Vergleichsrezeptur 45 mit 25 Ma.-% PBG wies bei einer Trockenrohddichte von 1,12 kg/dm³ eine Biegezugfestigkeit von 4,2 N/mm² und eine Druckfestigkeit von 15,4 N/mm² auf. Der Einsatz von Granulaten aus Plattenbruch führt somit zu einer deutlichen Reduzierung der Festigkeiten. Die Verwendung von GPB hemmt einerseits die Wirkung des Verzögerers, so dass sehr hohe Dosierungen erforderlich werden. Dies kann einen Einfluss auf die Festigkeiten der Mörtel haben. Zudem wird vermutet, dass die Bildung von Gipskristallen durch die Zugabe von GPB beeinträchtigt wird.

Bei einem Substitutionsgehalt von 40 Ma.-% wurden Biegezugfestigkeiten von 0,6 und 0,9 N/mm² und Druckfestigkeiten von 1,9 und 2,9 N/mm² erzielt. Der Mörtel der Rezeptur 51 mit Fließmittel und weicherer Konsistenz wies eine Biegezugfestigkeit von 0,6 N/mm² und eine Druckfestigkeit von 2,1 N/mm² auf.

Aufgrund ihrer geringen Festigkeiten sind die untersuchten Mörtel mit GPB-Anteilen für die Produktion von Gipsplattenprodukten als bedingt bis nicht geeignet zu bewerten.

Tabelle 35: Festmörteleigenschaften der PBGM mit Anteilen von GPB

Rezept-Nr.	Trockenrohdichte [kg/dm ³]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
47	1,14	1,2	4,7
48	1,17	0,9	3,8
49	1,02	0,6	1,9
50	1,12	0,9	2,9
51	1,00	0,6	2,1

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

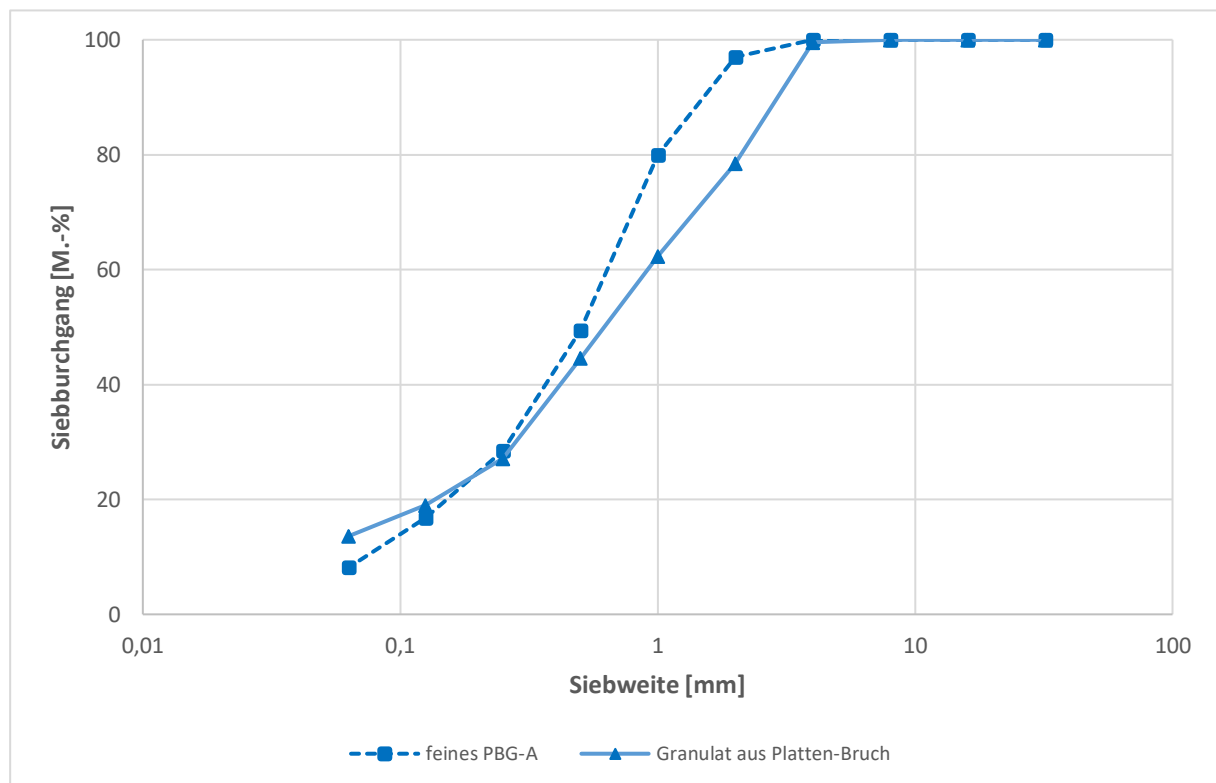


Abbildung 30: Sieblinie des Granulats aus Plattenbruch (GPB) im Vergleich zum feinen Porenbetongranulat aus Abbruchmaterial (PBG-A_{fein})

Mikroskopische Untersuchungen

Um zu prüfen, ob die Porenbetonrezyklate gut in die Gipsmatrix eingebettet werden konnten, wurden an ausgesuchten Versuchsserien mikroskopische Untersuchungen durchgeführt. Hierzu wurden Dünnschliffe erstellt und in einem Lichtmikroskop betrachtet. Ausgesucht wurden die Serien 12, 25, 40 und 42. Die Dünnschliffe wurden hauptsächlich aus den Prismenproben gewonnen. Lediglich bei der Serie Nr. 12 wurde zusätzlich ein Dünnschliff aus der Probeplatte (Proben Nr. 12.1) erstellt. Alle Serien wiesen einen PBG-Gehalt von 40 Ma.-% auf. Als Granulat wurde PBG-A_{fein} verwendet. Neben Proben mit Stuckgips wurde eine Serie mit RC-Gips (Proben-Nr. 42) untersucht. Die Proben 12 und 12.1 enthielten keine Zusatzmittel. Die restlichen Proben enthielten den Verzögerer VZ1. Dieser wurde bei der Serie mit RC-Gips um den Faktor 10 höher dosiert. Die Probe 40 beinhaltete zudem einen Luftporenbildner (LP) in einer Dosierung von 0,2 Ma.-% der Trockenmörtelmasse. In der Tabelle 36 sind die Rezepturparameter der o. g. Versuchsserien aufgeführt.

Tabelle 36: Rezepturparameter der für die mikroskopischen Untersuchungen ausgewählten Proben

Rez.-Nr.	Proben-Nr.	Substitution [Ma.-%]	Granulat	Bindemittel	Anteil VZ1 [Ma.-% der TMM]	Anteil LP [Ma.-% d. TMM]	Probe aus	Ausbreitmaß [mm]	R-Wert [-]
12	12	40	PBG-A _{fein}	Stuckgips	0	0	Prisma	162	0,495
12	12.1	40	PBG-A _{fein}	Stuckgips	0	0	Probeplatte	162	0,495
25	25	40	PBG-A _{fein}	Stuckgips	0,005	0	Prisma	164	0,460
40	40	40	PBG-A _{fein}	Stuckgips	0,005	0,2	Prisma	165	0,420
42	42	40	PBG-A _{fein}	RC-Gips	0,05	0	Prisma	165	0,560

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

In den folgenden Abbildungen 31 bis 60 sind die lichtmikroskopischen Aufnahmen dargestellt. Es wurden Aufnahmen mit 2,5-facher, 10-facher und 20-facher Vergrößerung jeweils mit paralleler und gekreuzter Polarisation der Beleuchtung gemacht.

Es lässt sich feststellen, dass die Porenbetongranulate gut in die Gipsmatrix eingebunden werden konnten. Die Kontaktzonen zwischen den Porenbetonpartikeln und der Gipsmatrix waren gut ausgebildet.

In den Aufnahmen mit gekreuzter Polarisation der Beleuchtung waren dunkle und auch helle Porenbetonpartikel erkennbar. Die hellen PB-Partikel waren kalkreich und die dunklen Partikel kalkarm. Vereinzelt wurden Anhydritpartikel vorgefunden.

Die Übersichtsaufnahmen mit 2,5-facher Vergrößerung der Probe 40 zeigen, dass zahlreiche Luftporen in die Bindemittelmatrix eingeführt werden konnten.

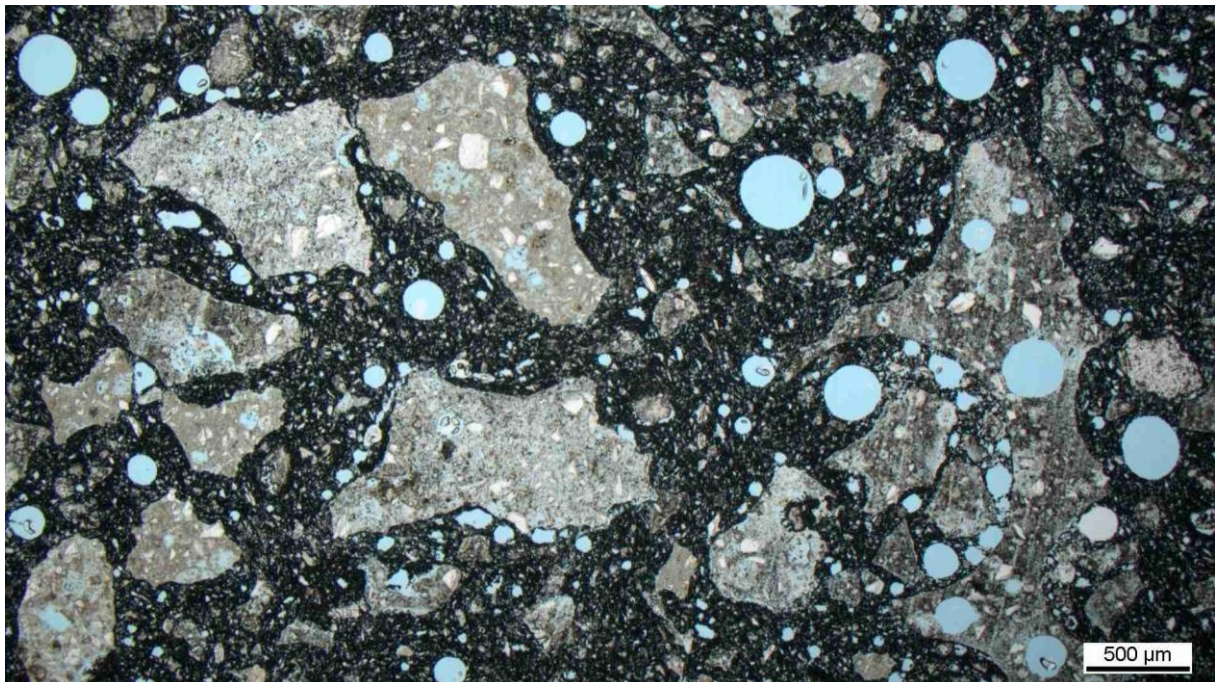


Abbildung 31: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Übersichtsaufnahme; Beleuchtung: Polarisation parallel; Objektiv 2,5x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

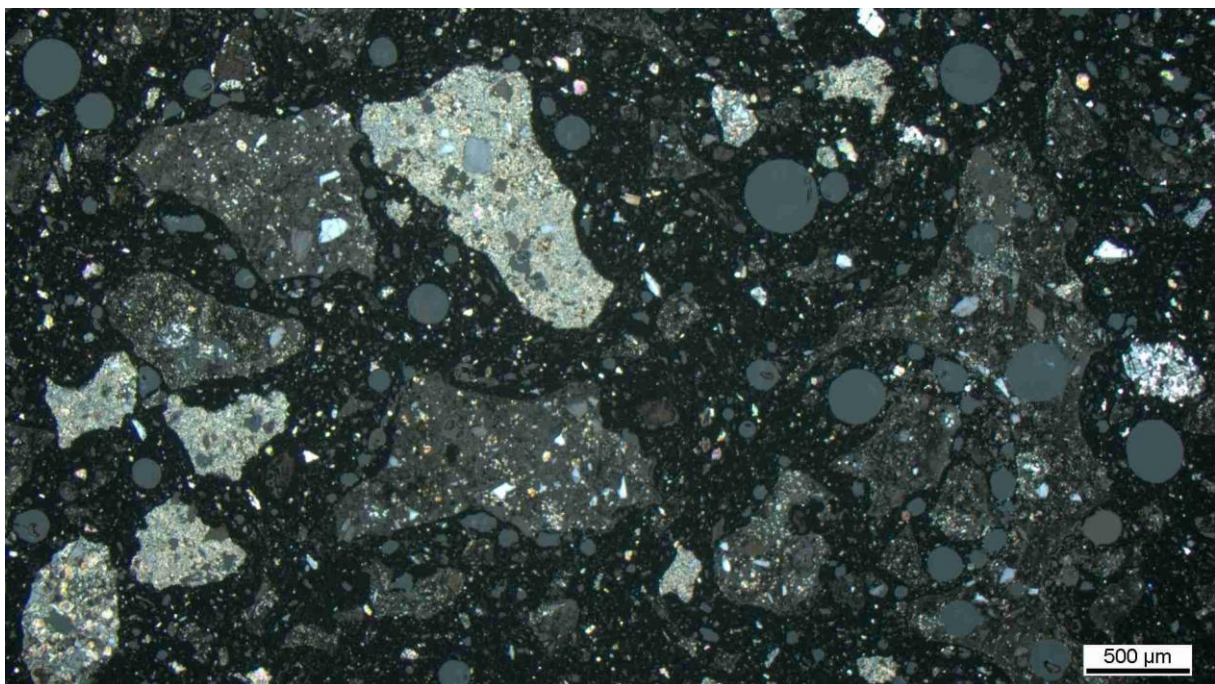


Abbildung 32: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Übersichtsaufnahme; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 2,5x; helle Granulate: kalkreich, dunkle Granulate: kalkarm

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

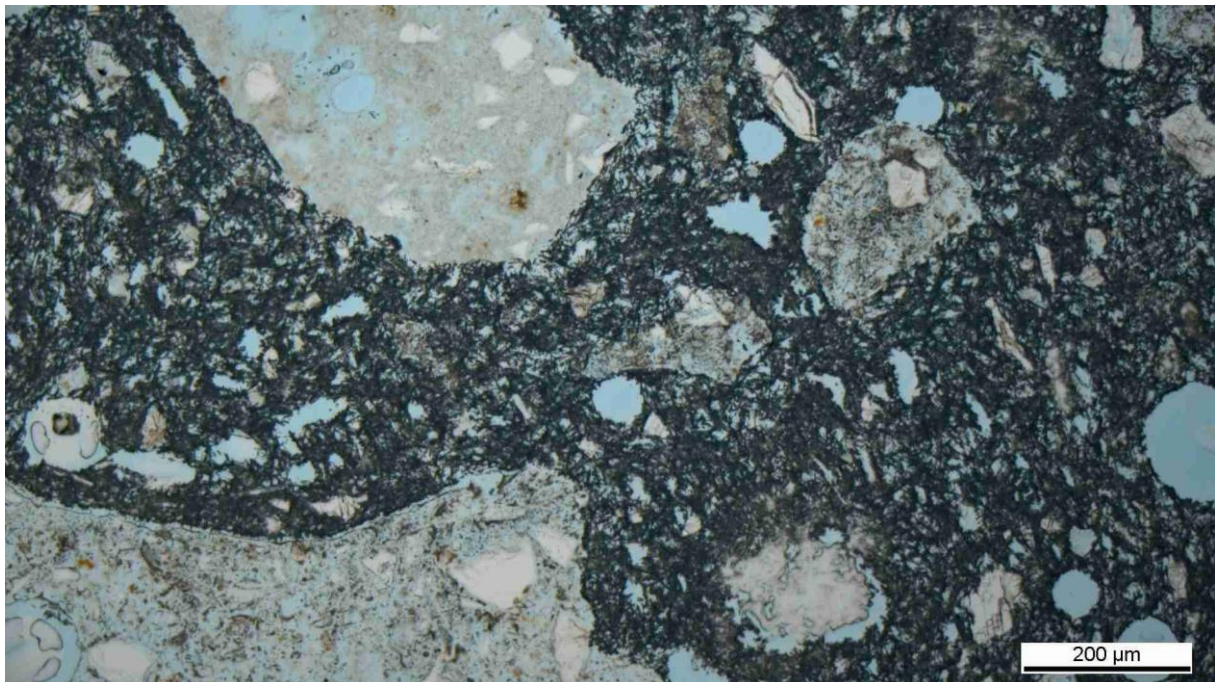


Abbildung 33: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 31/32; Beleuchtung: Polarisierung parallel; Objektiv 10x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

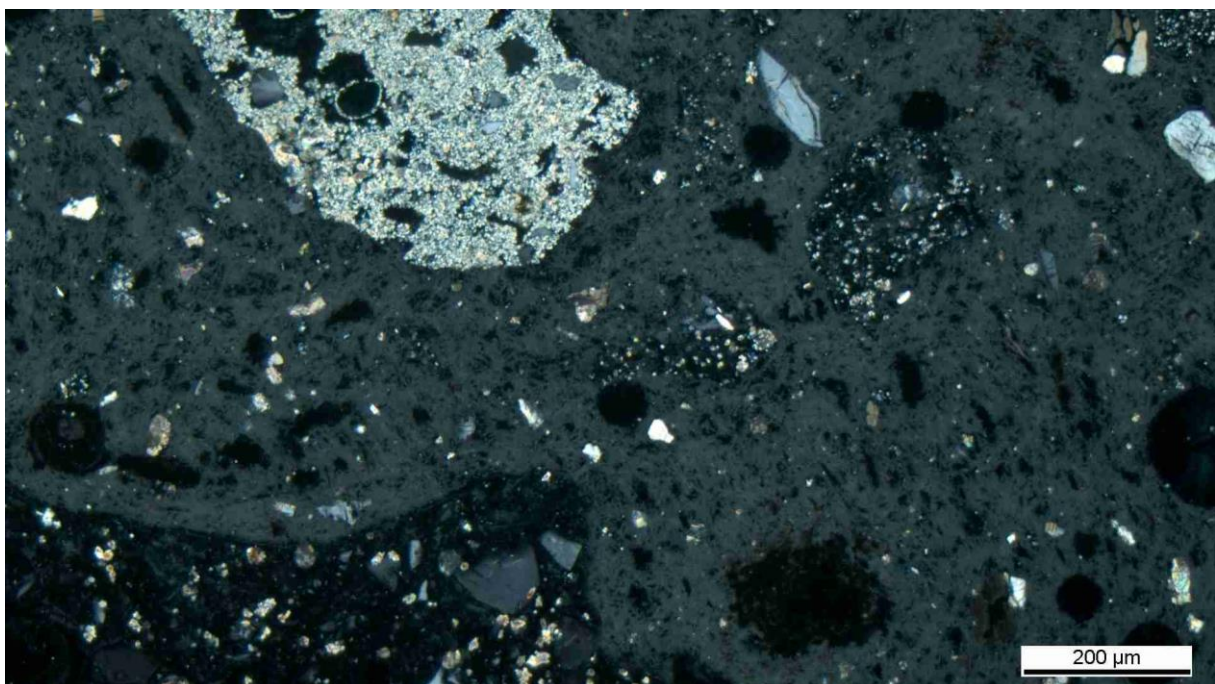


Abbildung 34: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 31/32; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 10x; helles Granulat: kalkreich, dunkle Granulate: kalkarm

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

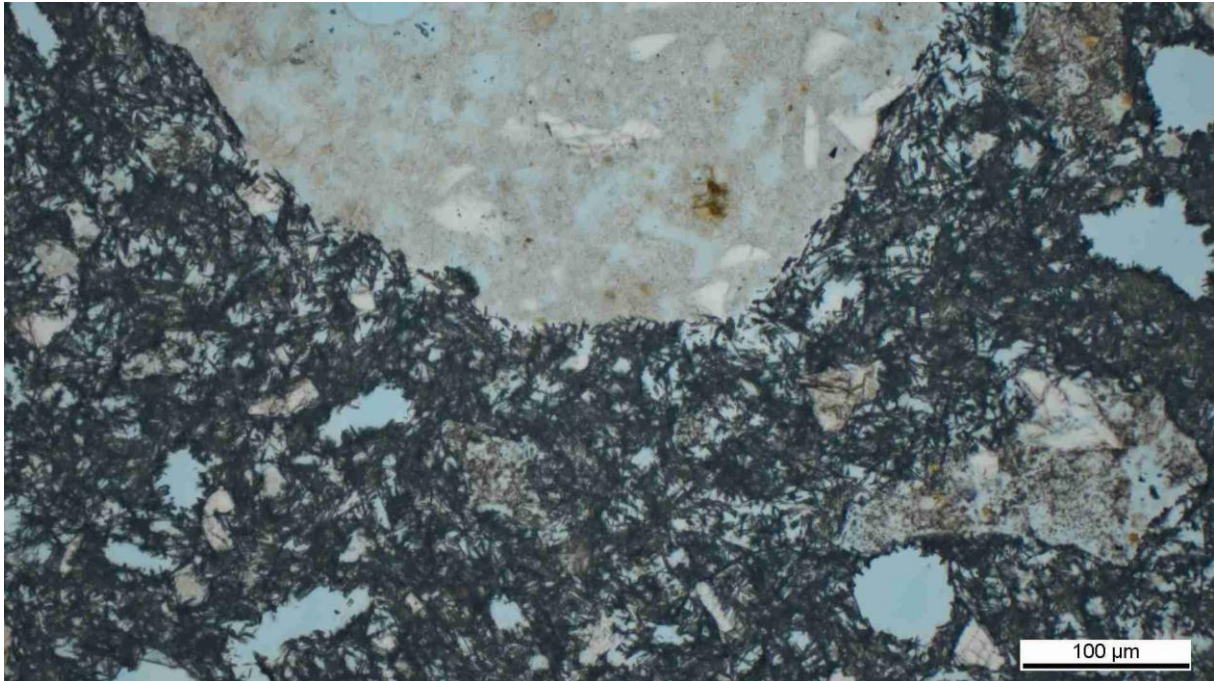


Abbildung 35: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 33/34; Beleuchtung: Polarisierung parallel; Objektiv 20x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

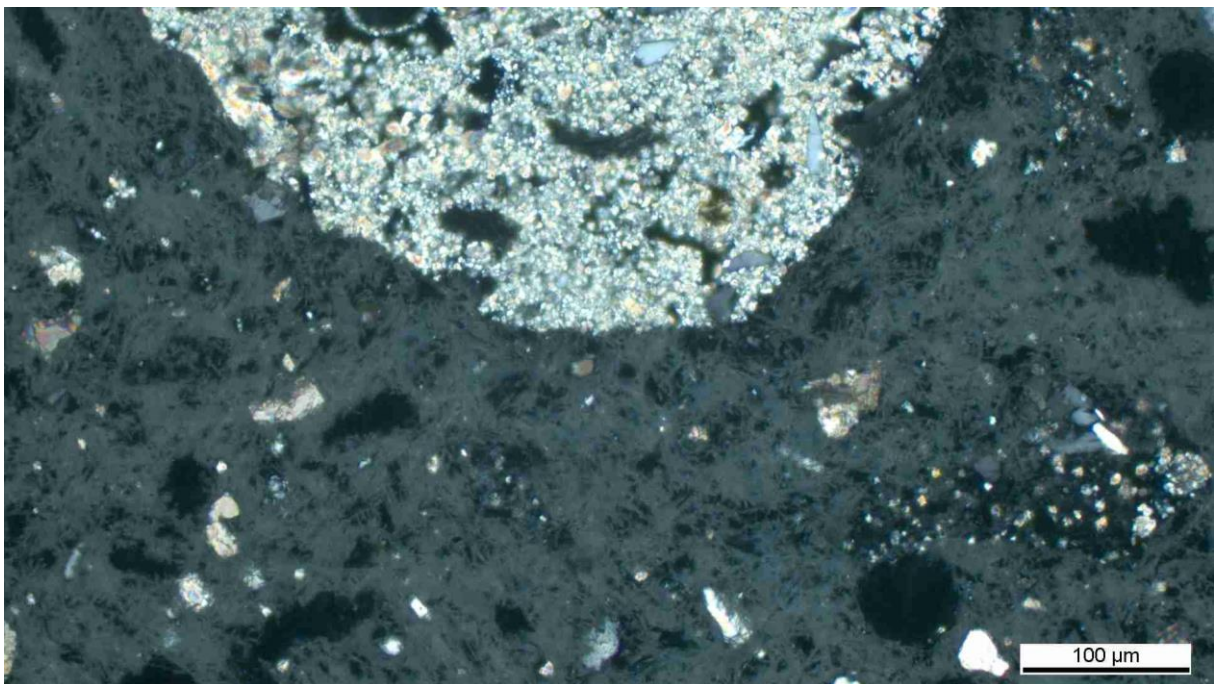


Abbildung 36: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 33/34; Beleuchtung: Polarisierung gekreuzt; Objektiv 20x; helles Granulat: kalkreich, dunkle Granulate: kalkarm

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

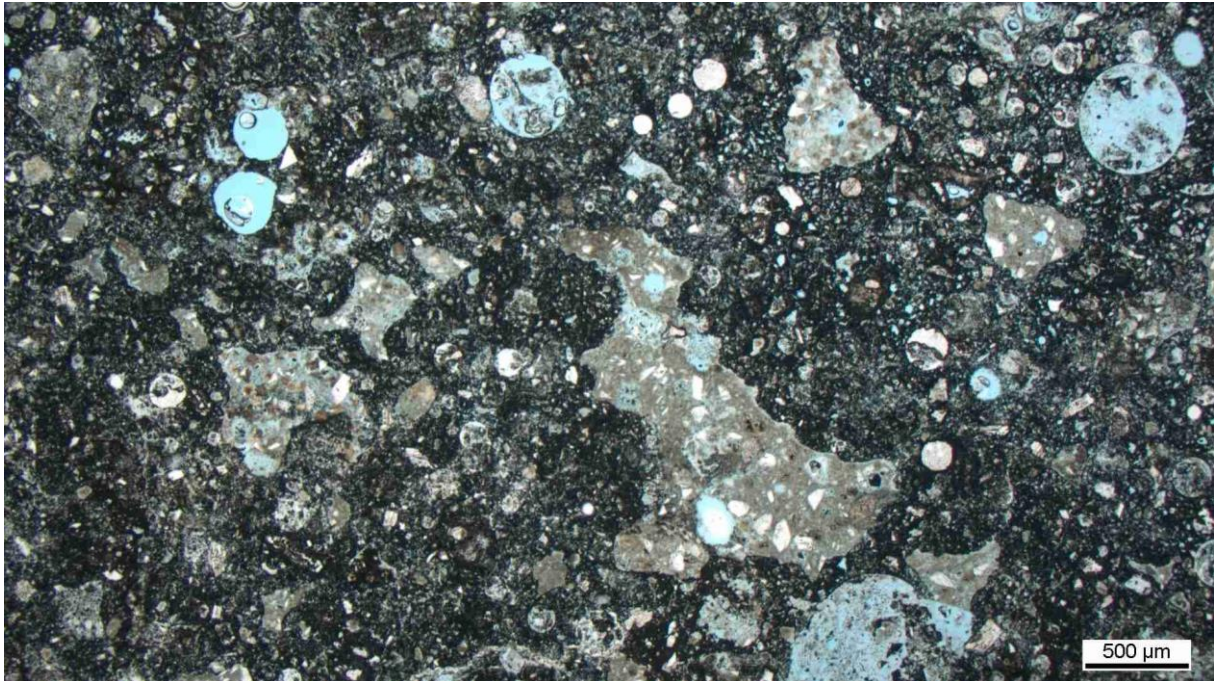


Abbildung 37: Dünnschliff aus einer Probepatte der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Übersichtsaufnahme; Beleuchtung: Polarisierung parallel; Objektiv 2,5x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

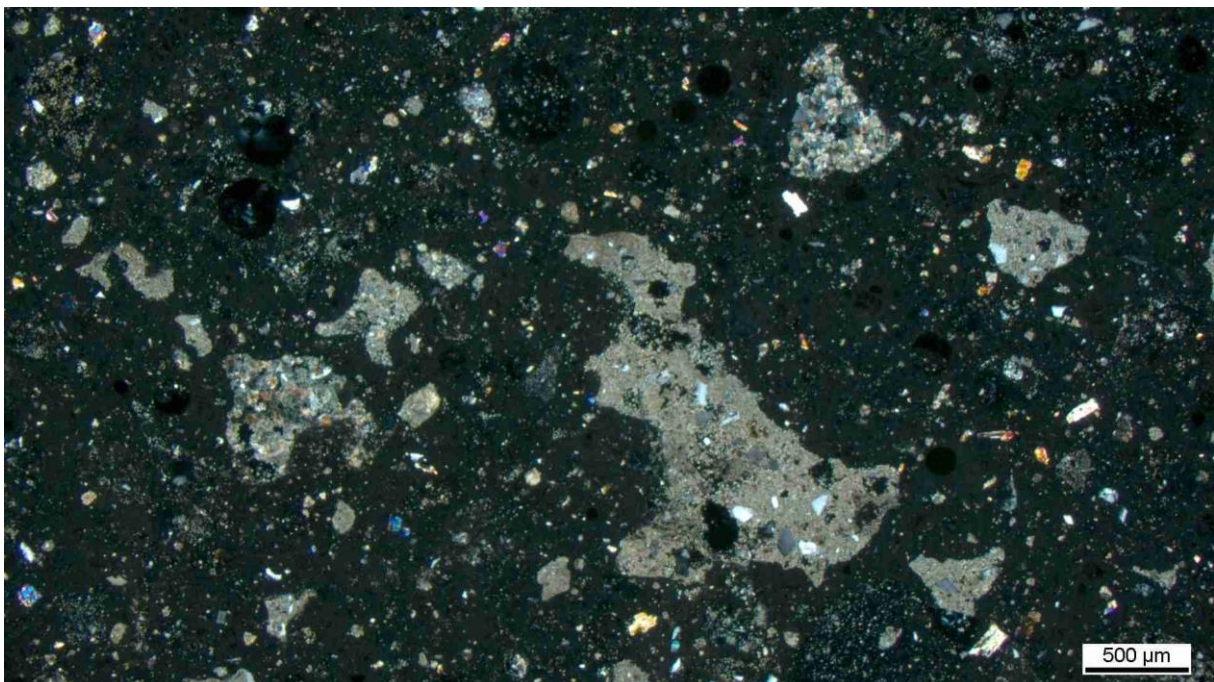


Abbildung 38: Dünnschliff aus einer Probepatte der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Übersichtsaufnahme; Beleuchtung: Polarisierung gekreuzt; Objektiv 2,5x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

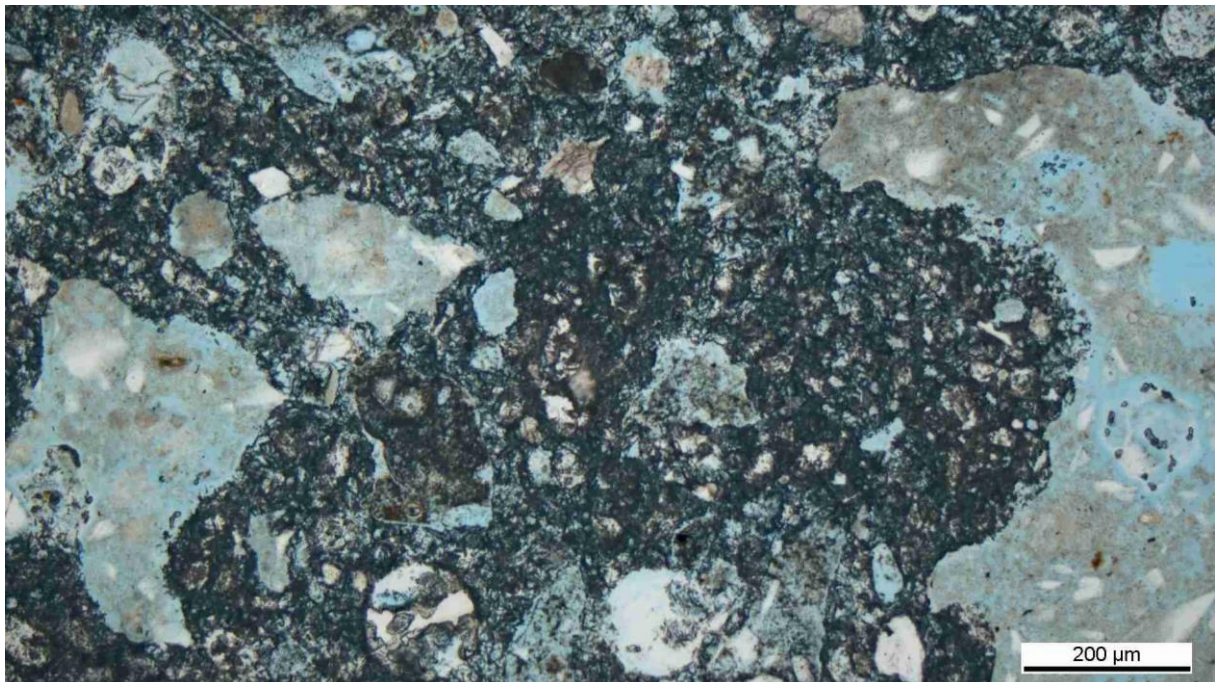


Abbildung 39: Dünnschliff aus einer Probeplatte der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 37/38; Beleuchtung: Polarisation parallel; Objektiv 10x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

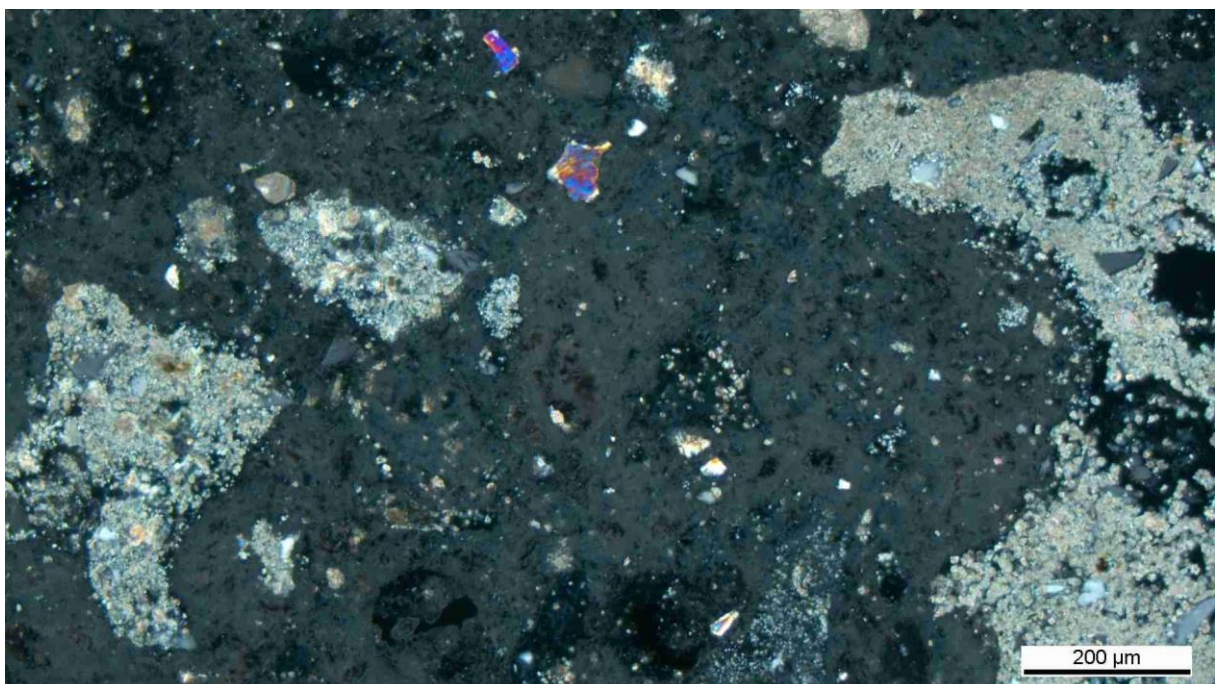


Abbildung 40: Dünnschliff aus einer Probeplatte der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 37/38; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 10x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

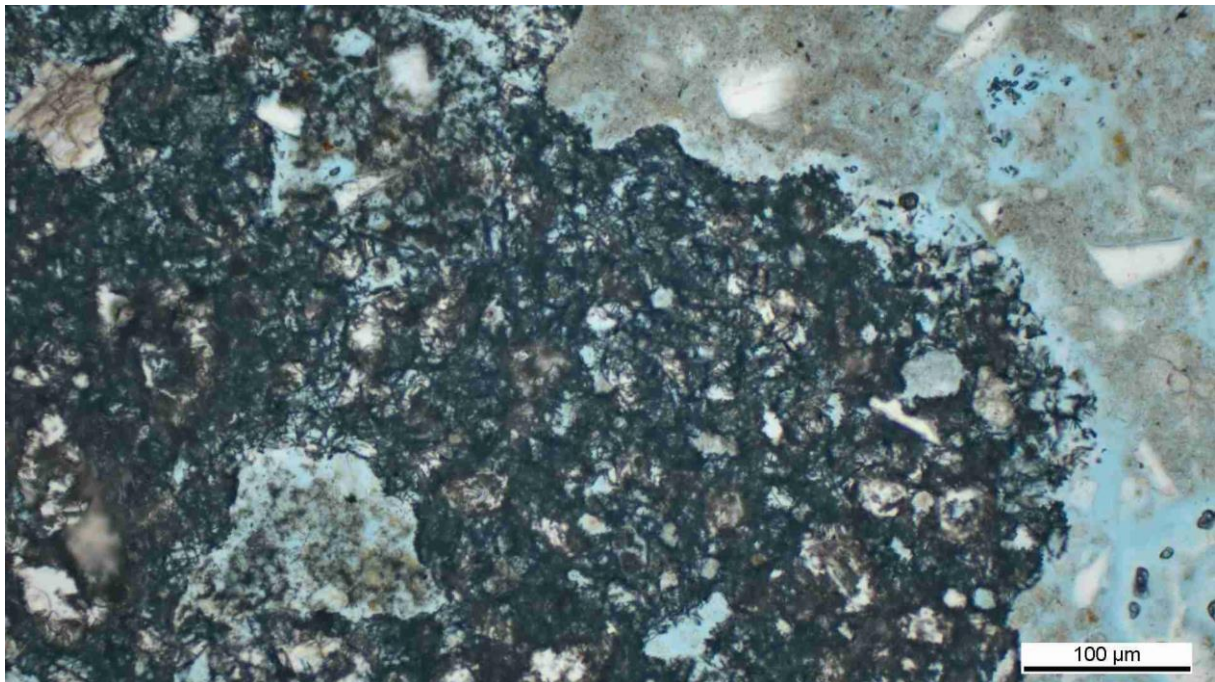


Abbildung 41: Dünnschliff aus einer Probeplatte der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 39/40; Beleuchtung: Polarisation parallel; Objektiv 20x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

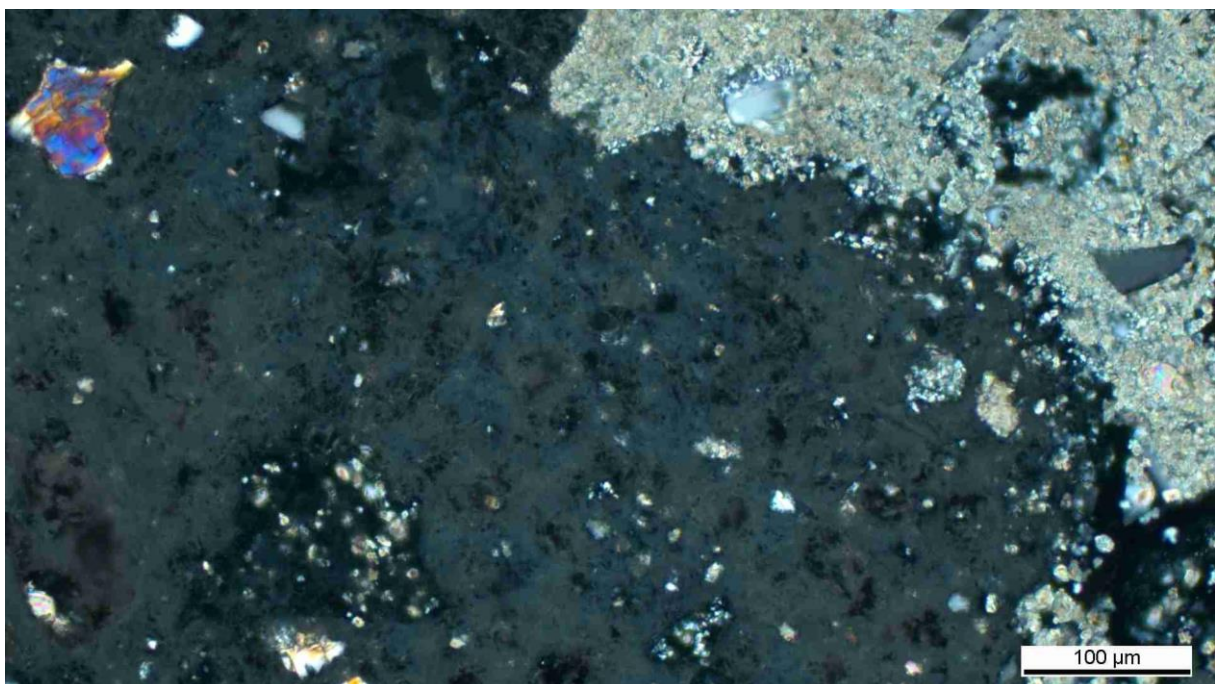


Abbildung 42: Dünnschliff aus einer Probeplatte der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 39/40; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 20x; helles Granulat: kalkreich, dunkles Granulat: kalkarm, Anhydritpartikel oben links

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

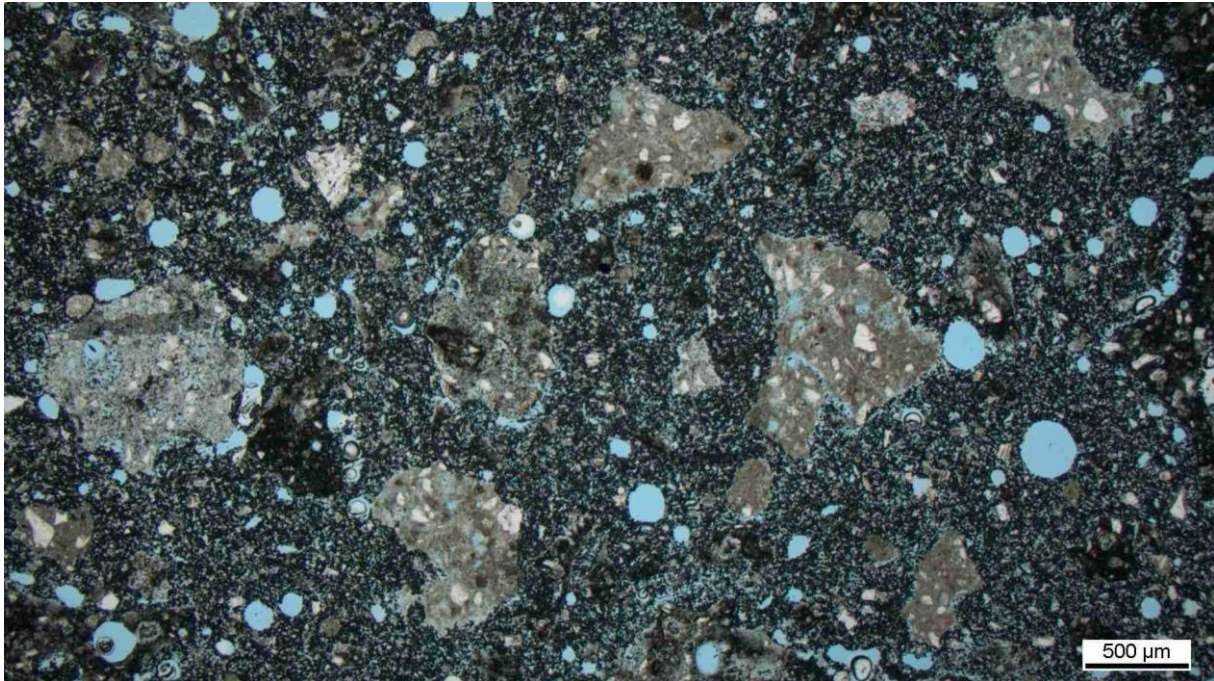


Abbildung 43: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 25; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Übersichtsaufnahme; Beleuchtung: Polarisierung parallel; Objektiv 2,5x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

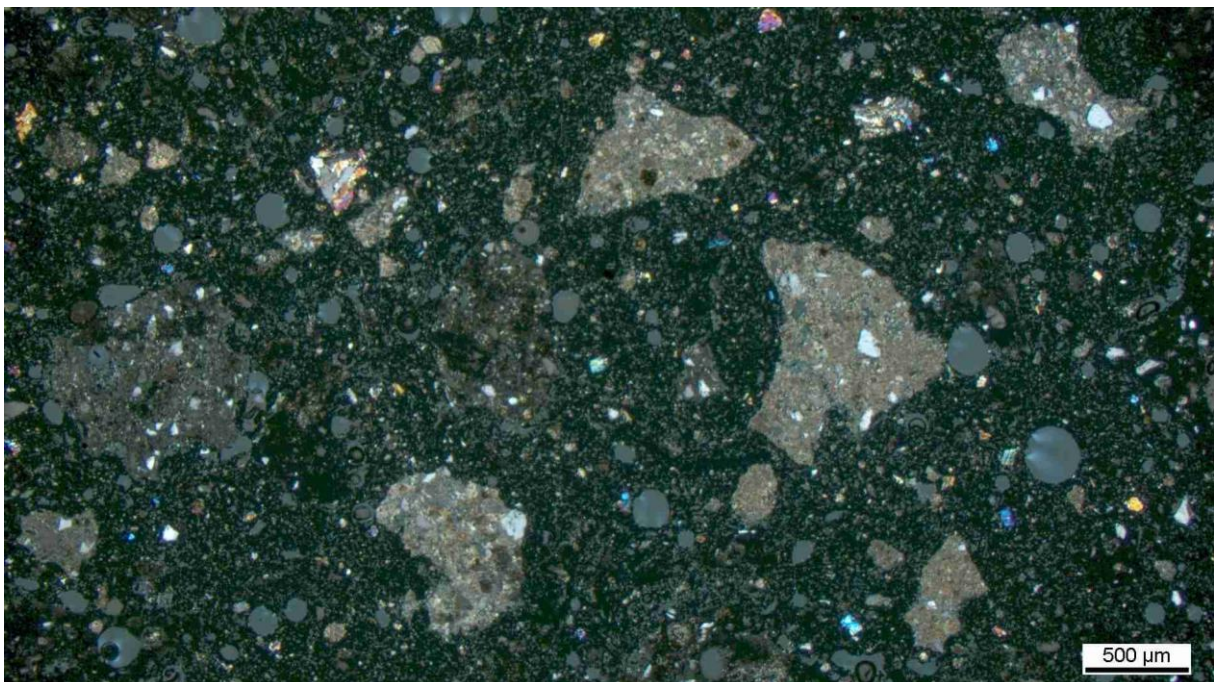


Abbildung 44: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 25; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Übersichtsaufnahme; Beleuchtung: Polarisierung gekreuzt; Objektiv 2,5x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

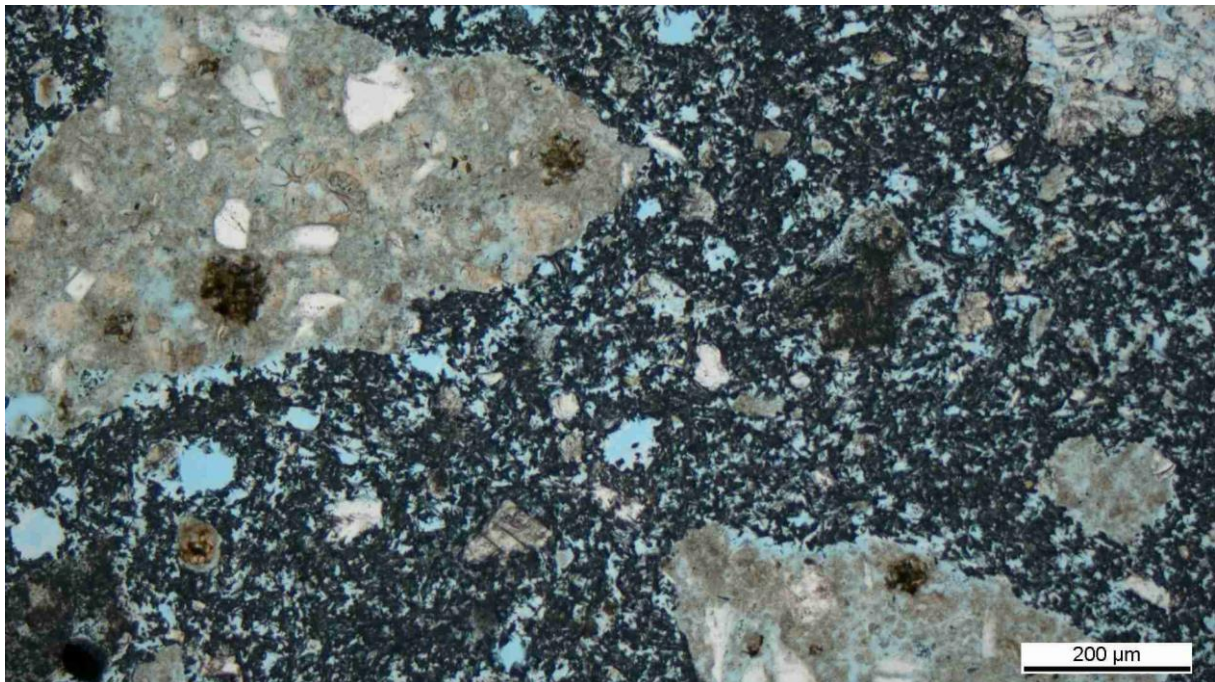


Abbildung 45: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 25; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 43/44; Beleuchtung: Polarisation parallel; Objektiv 10x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

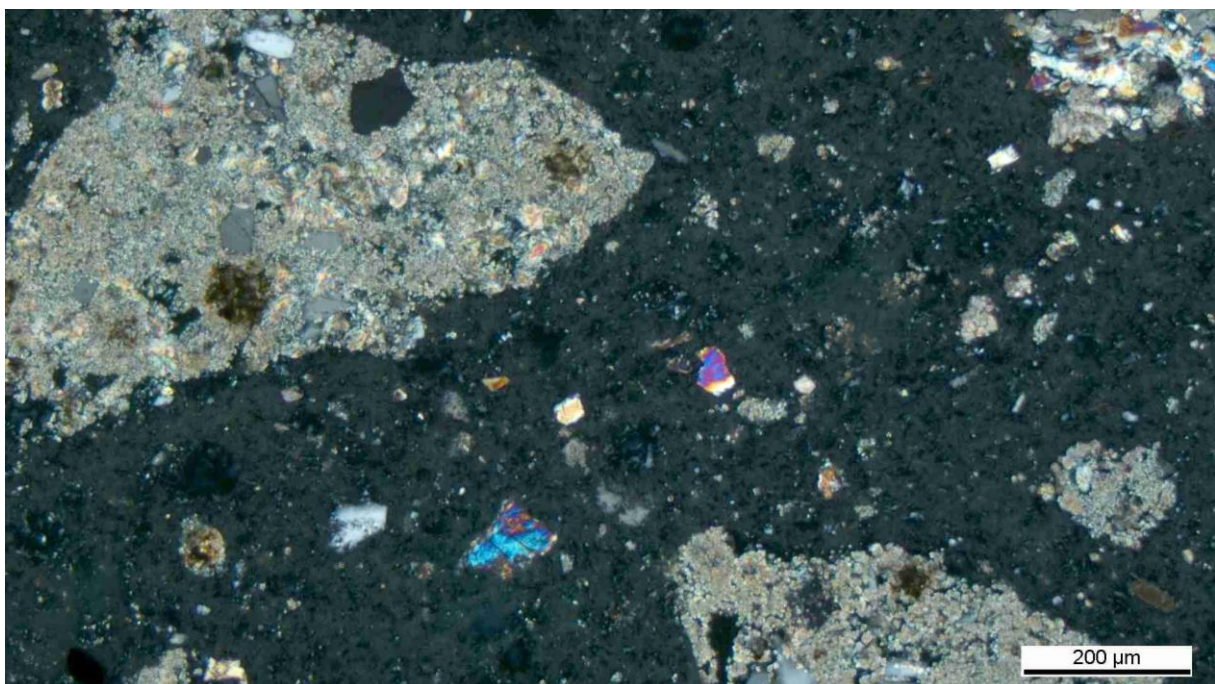


Abbildung 46: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 25; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 43/44; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 10x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

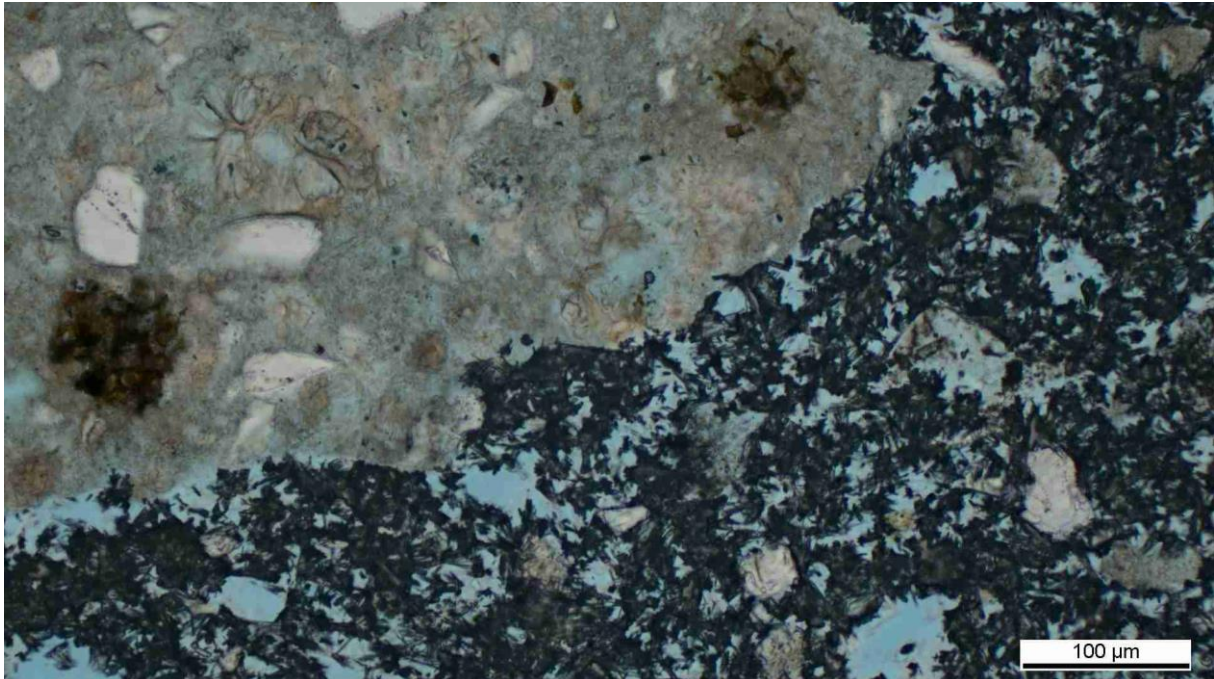


Abbildung 47: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 25; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 45/46; Beleuchtung: Polarisierung parallel; Objektiv 20x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

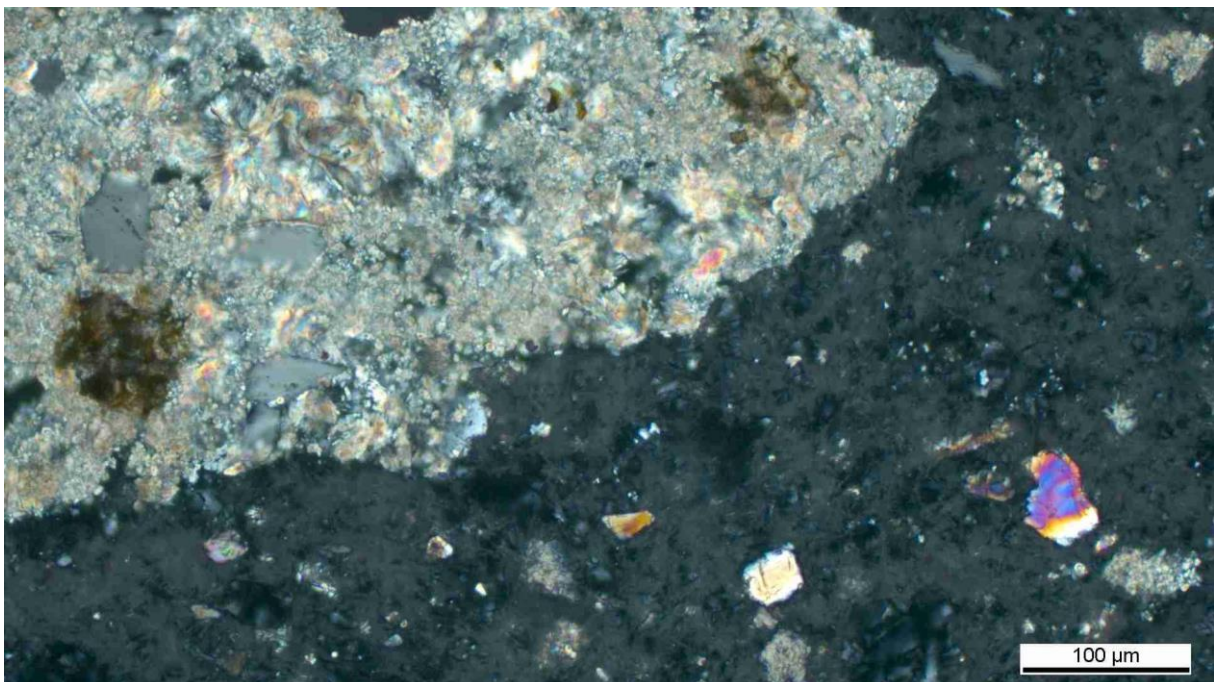


Abbildung 48: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 25; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 45/46; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 20x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

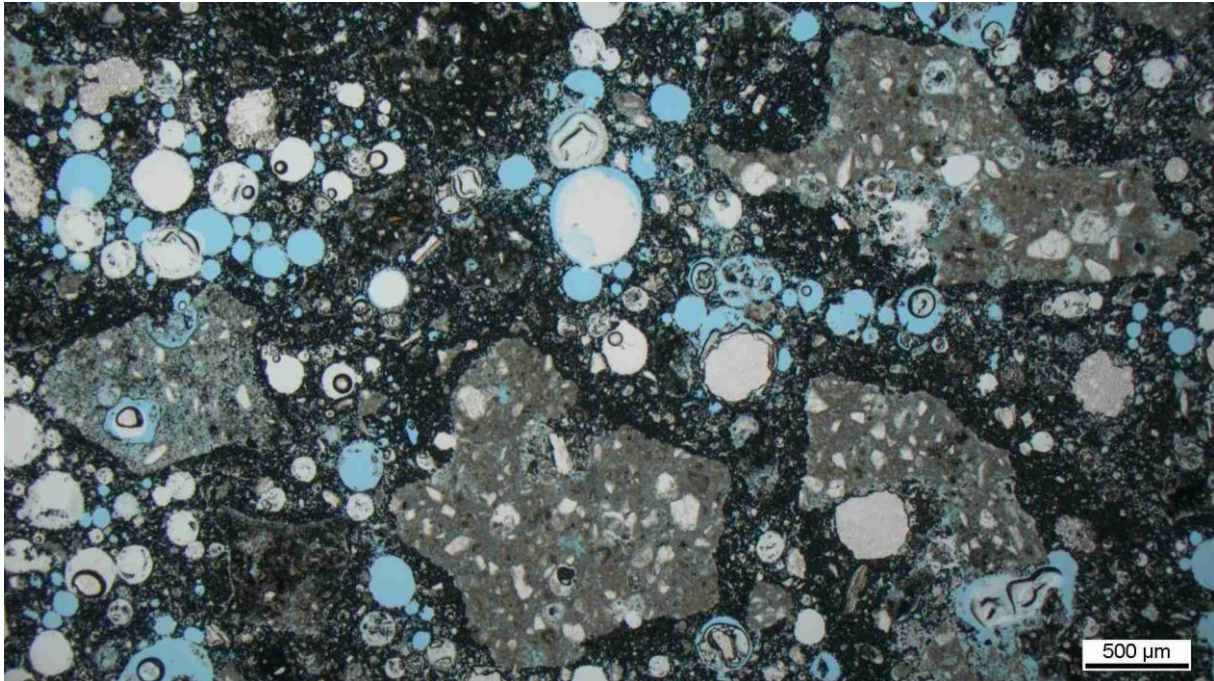


Abbildung 49: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 40; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Übersichtsaufnahme; Beleuchtung: Polarisierung parallel; Objektiv 2,5x; zahlreiche Luftporen

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

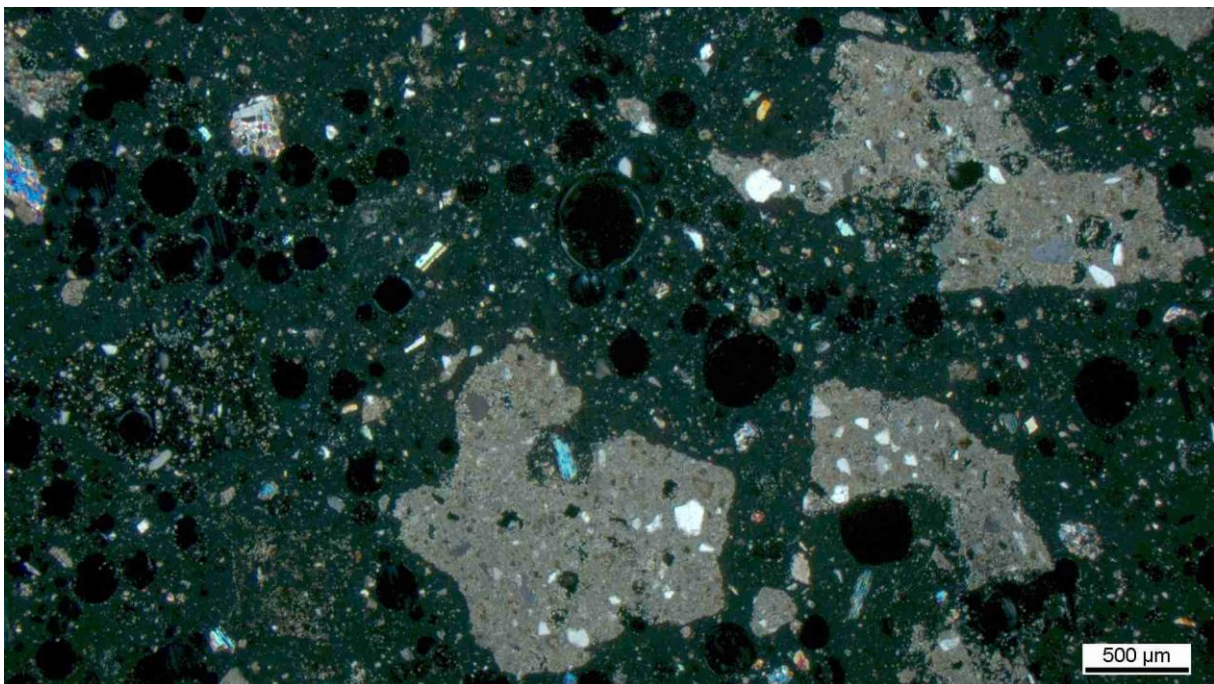


Abbildung 50: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 40; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Übersichtsaufnahme; Beleuchtung: Polarisierung gekreuzt; Objektiv 2,5x; zahlreiche Luftporen

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

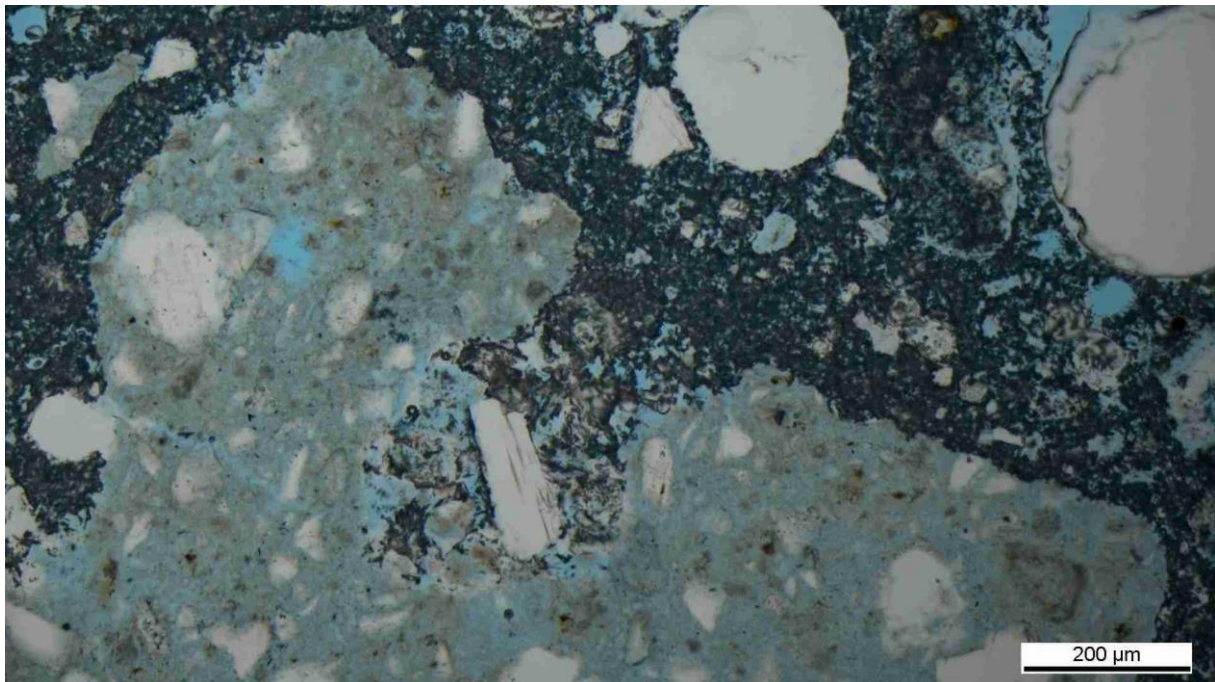


Abbildung 51: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 40; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 49/50; Beleuchtung: Polarisierung parallel; Objektiv 10x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

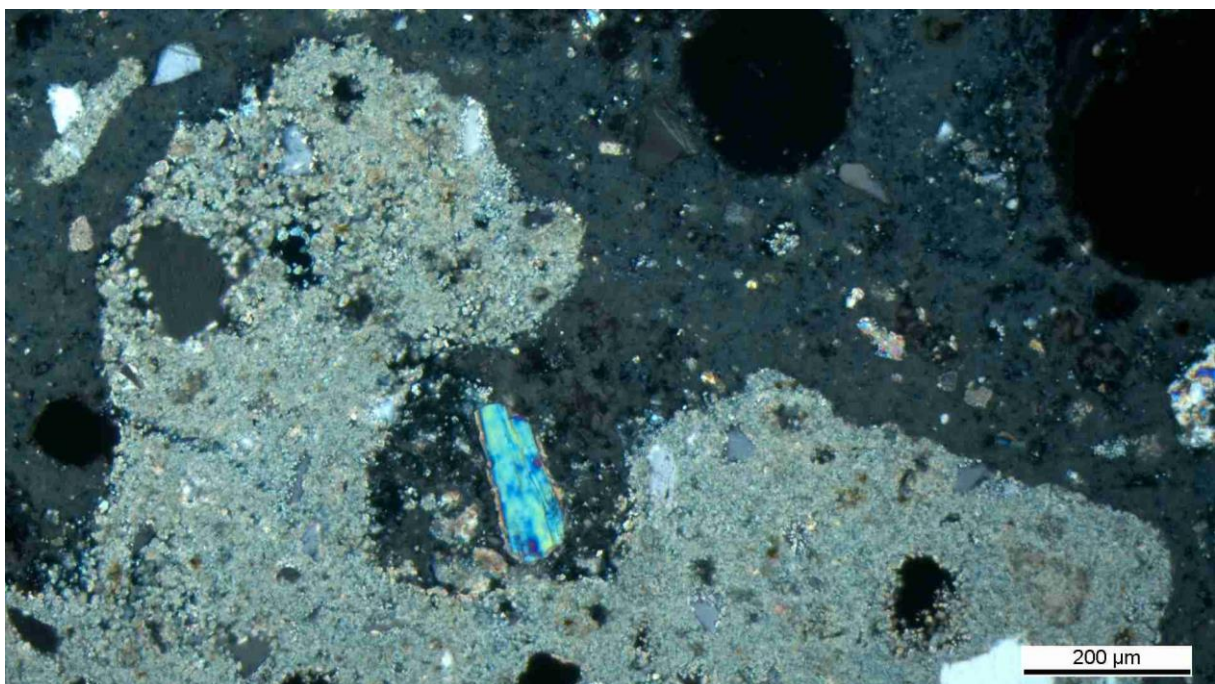


Abbildung 52: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 40; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 49/50; Beleuchtung: Polarisierung gekreuzt; Objektiv 10x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

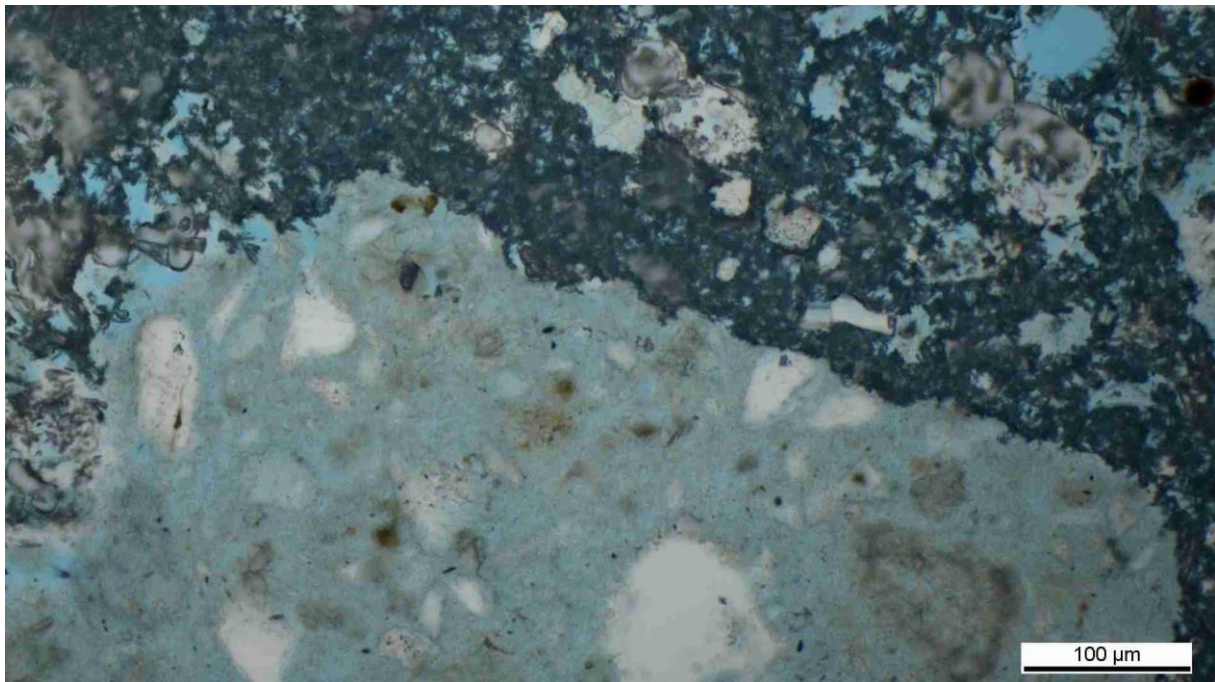


Abbildung 53: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 40; Porenbetongranulat eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 51/52; Beleuchtung: Polarisierung parallel; Objektiv 20x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

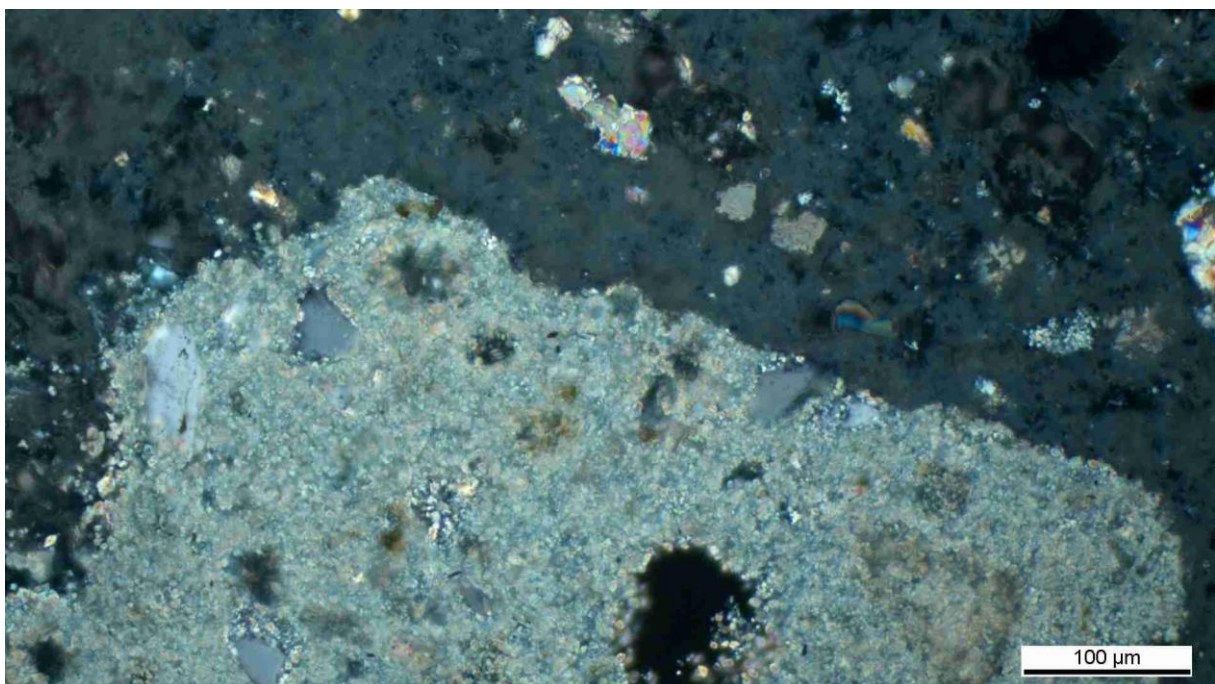


Abbildung 54: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 40; Porenbetongranulat eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 51/52; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 20x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

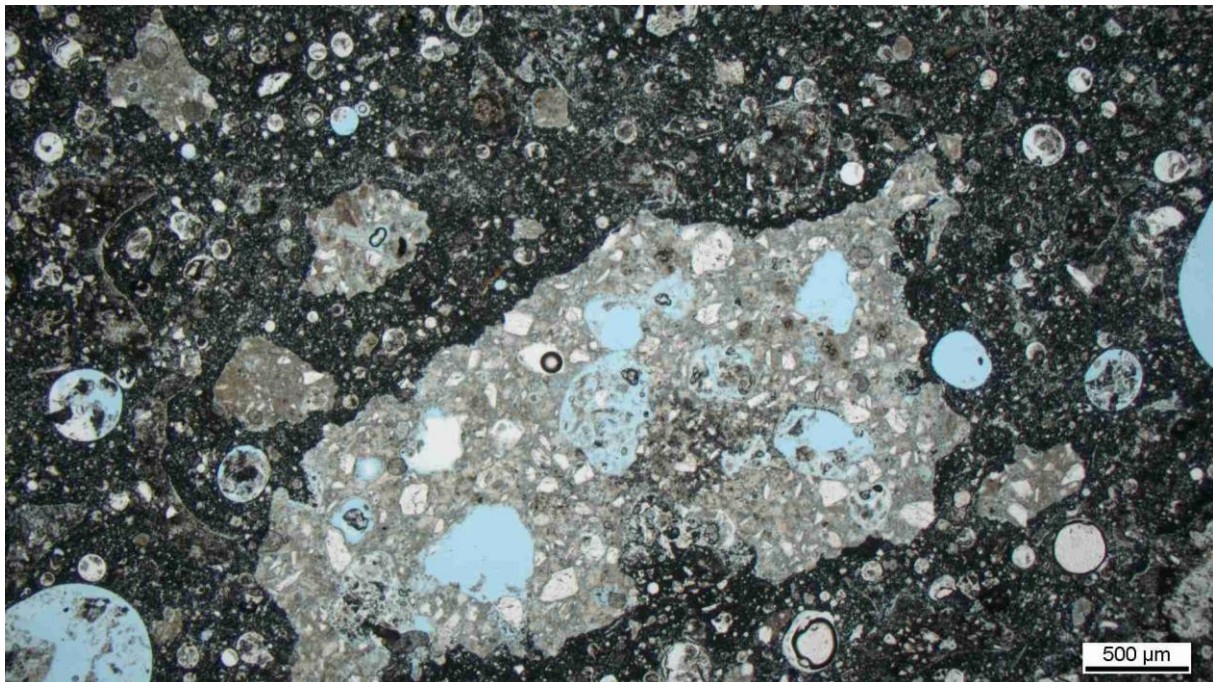


Abbildung 55: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 42; Porenbetongranulate eingebettet in einer RC-Gipsmatrix; Übersichtsaufnahme; Beleuchtung: Polarisation parallel; Objektiv 2,5x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

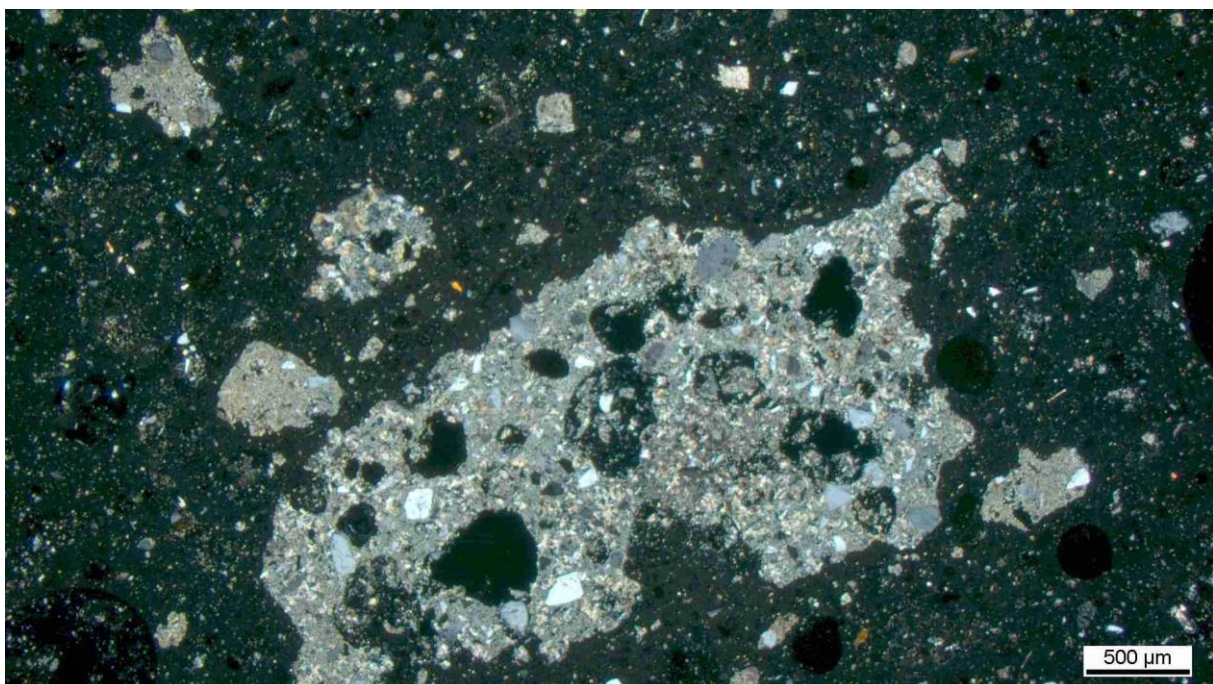


Abbildung 56: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 42; Porenbetongranulate eingebettet in einer RC-Gipsmatrix; Übersichtsaufnahme; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 2,5x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

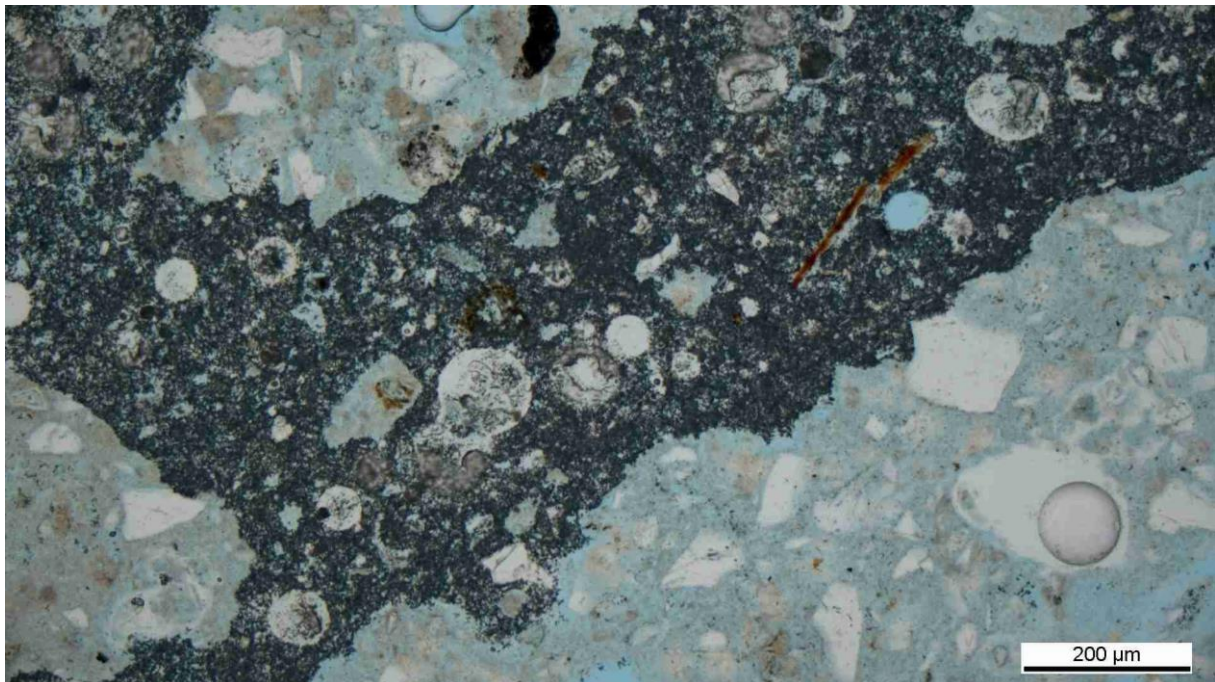


Abbildung 57: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 42; Porenbetongranulate eingebettet in einer RC-Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 55/56; Beleuchtung: Polarisation parallel; Objektiv 10x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

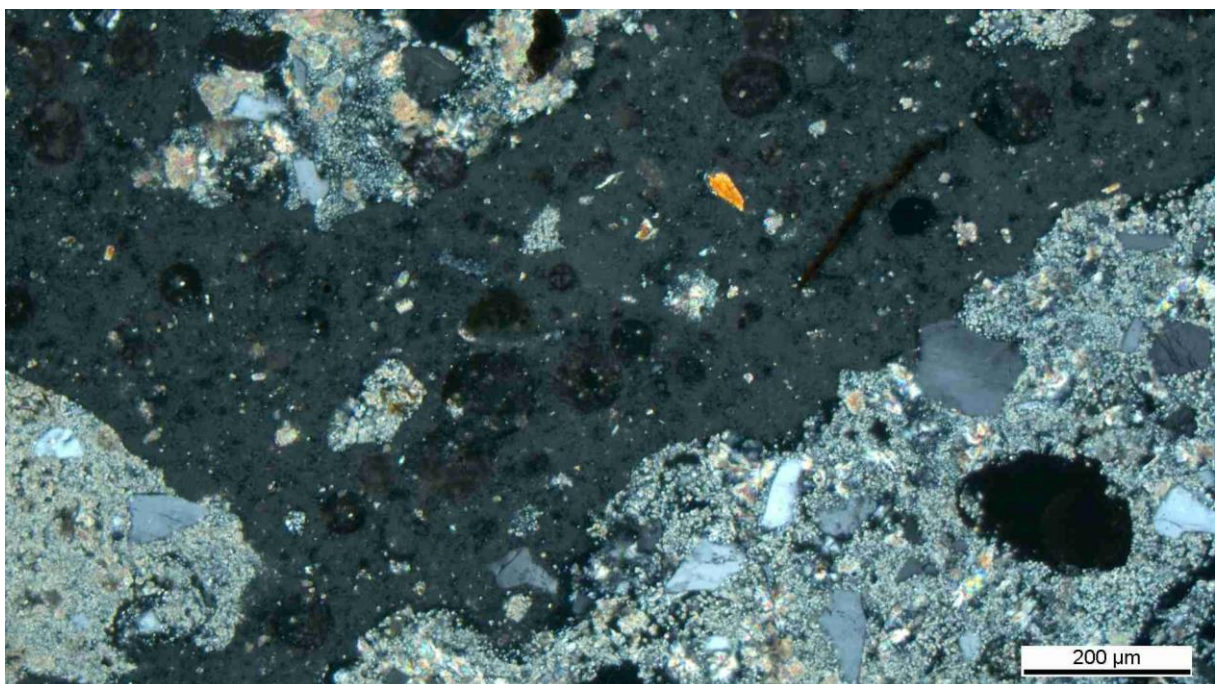


Abbildung 58: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 42; Porenbetongranulate eingebettet in einer RC-Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 55/56; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 10x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

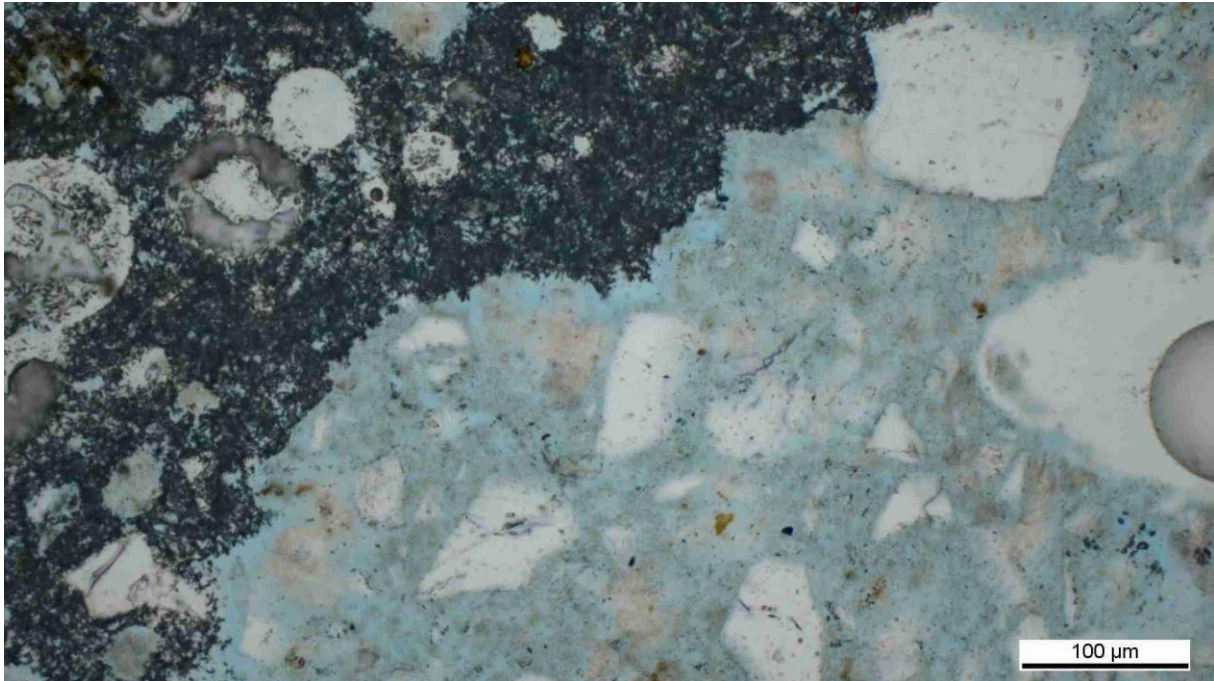


Abbildung 59: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 42; Porenbetongranulat eingebettet in einer RC-Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 57/58; Beleuchtung: Polarisierung parallel; Objektiv 20x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

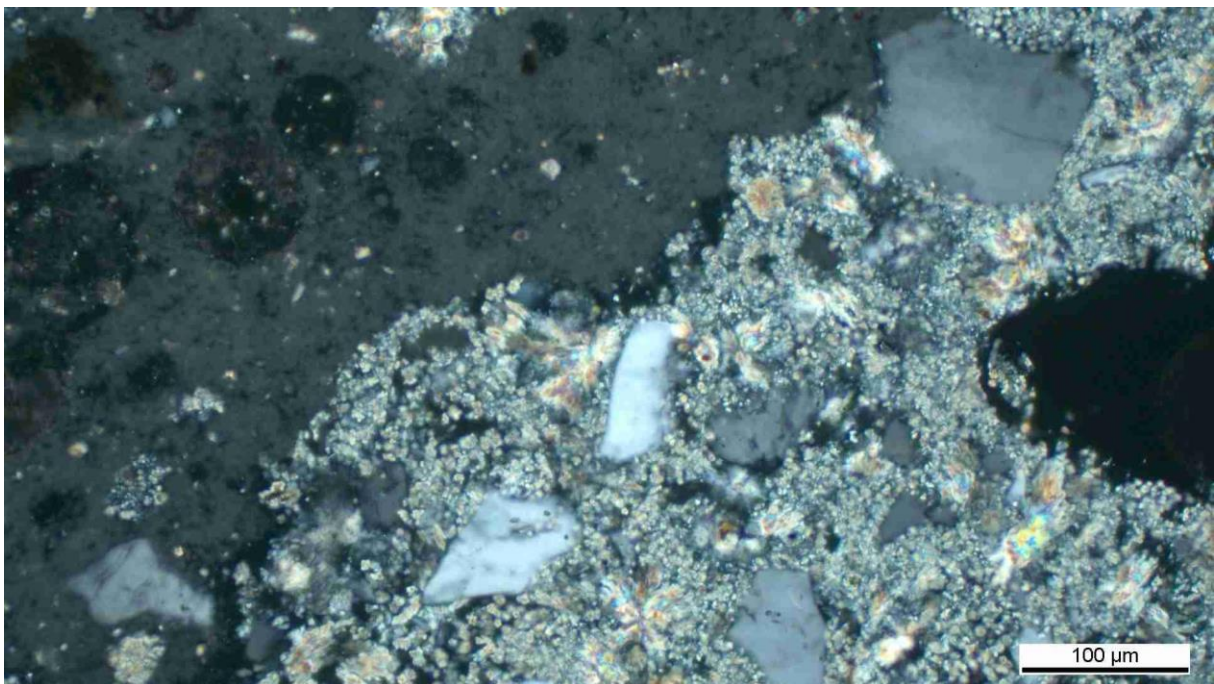


Abbildung 60: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 42; Porenbetongranulat eingebettet in einer RC-Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 57/58; Beleuchtung: Polarisierung gekreuzt; Objektiv 20x

Quelle: Frank Schlütter, Leibniz-IWT

Dauerhaftigkeitsuntersuchungen

Da Porenbeton Zement enthält, können sich in Kombination mit Gips als Bindemittel sowie ungünstigen Umgebungsbedingungen (feucht-kaltes Klima) Treibminerale bilden und eine Gefügeschädigung verursachen. Gipsplatten werden zwar in trockener Umgebung eingesetzt, jedoch können während der Bauphase ungünstige Zustände vorliegen, denen gipsgebundene Bauplatten mit Porenbetongranulaten widerstehen müssen, um dauerhaft zu sein.

Zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit wurden daher Referenzprismen aus 100 % Gips sowie Prismen mit 25- und 40 Ma.-% feinem Porenbetongranulat aus Abbruchmaterial (PBG-A_{fein}) hergestellt und deren Längenänderungen bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen über einen Zeitraum von 14 Wochen bestimmt. Es wurden Prismen mit Stuckgips (Rezepturen 46, 45 und 25) sowie Prismen mit RC-Gips (Rezepturen 44, 43 und 42) untersucht. Nach der Ausgangsmessung verblieben die Proben vier Wochen im Normalklima bei 23°C und 65 % relativer Luftfeuchte, sieben Wochen bei 5°C und mehr als 95 % relativer Luftfeuchte und abschließend für drei Wochen wieder im Normalklima (23/65).

Abbildung 61 zeigt die Längenänderung der untersuchten Prismen. In Abbildung 62 sind die zugehörigen Feuchtegehalte der Proben dargestellt.

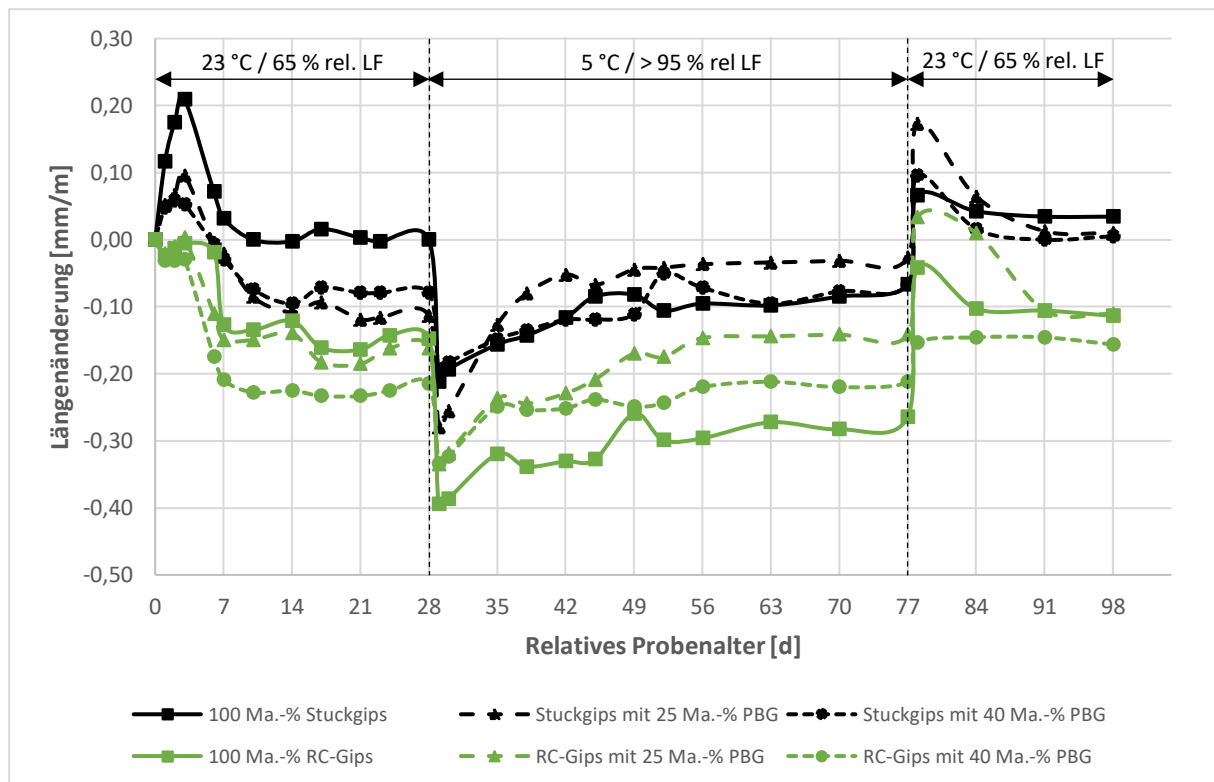


Abbildung 61: Längenänderung von Prismen ausgewählter Rezepturen bei wechselnden klimatischen Bedingungen

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Die Proben aus Stuckgips quollen in den ersten 3 Tagen. Je mehr Gips die Proben enthielten, umso stärker war dieses Quellen ausgeprägt. Die Referenzproben aus 100 Ma.-% Stuckgips wiesen nach drei Tagen eine Längenänderung von 0,21 mm/m auf. Mit 25 bzw. 40 Ma.-% PBG lagen die Quellmaße nach drei Tagen bei 0,10 bzw. 0,05 mm/m. Anschließend setzte ein Schwinden ein. Die Länge der Referenzproben reduzierte sich auf die Ausgangslänge. Die Proben mit PBG schwanden auf bis zu -0,1 mm/m. Die Referenzproben aus 100 % Stuckgips waren nach sechs Tagen trocken, die Proben mit PBG erst nach 17 Tagen, obwohl das Schwinden nach sechs Tagen bereits abgeschlossen war. Danach wurde vermutlich nur noch Feuchtigkeit aus den PBG abgegeben.

Die Prismen aus RC-Gips zeigten kein anfängliches Quellen. Die Länge der Prismen verblieb in den ersten drei Tagen annähernd bei der Ausgangslänge. Anschließend schwanden die Proben. Die Proben mit 40 Ma.-% PBG wiesen mit $-0,23$ mm/m das höchste Schwindmaß auf. Das Schwindmaß der Referenz bzw. der Proben mit 25 Ma.-% PBG betrug maximal $-0,16$ bzw. $-0,19$ mm/m. Somit war das Schwindmaß umso größer, je mehr PBG die Mischung enthielt. Während die Referenzproben nach sieben Tagen trocken waren, benötigten die Proben mit PBG zur Trocknung eine Dauer von 14 Tagen.

Nach 28 Tagen erfolgte der erste Klimawechsel. Hierzu wurden die Proben auf Dreiecksleisten in einem am Boden mit Wasser gefüllten Kasten platziert. Der Kasten wurde mit einem Deckel dicht verschlossen, so dass sich in dem Kasten eine relative Luftfeuchte von nahezu 100 % einstellen konnte. Der Kasten wurde anschließend in einem auf 5°C geregelten Klimaschrank gelagert. Aufgrund von Unebenheiten im Klimaschrank, kamen die Proben mit 25 Ma.-% PBG zeitweise unplanmäßig in Kontakt mit dem Wasser im Aufbewahrungskasten. Dies führte zu einer übermäßigen Aufnahme von Feuchtigkeit, die aber nach dem zweiten Klimawechsel wieder abgegeben wurde.

Nach dem Klimawechsel vom Normalklima auf das feucht-kalte Klima gab es einen Sprung in der Längenänderung aufgrund der Temperaturdifferenz von 18 K. Dieser Sprung war umso größer, je mehr Gips die Mischung enthielt. Bei den Referenzmischungen wurde ein Sprung von $-0,21$ mm/m (Stuckgips) und $-0,24$ mm/m (RC-Gips) verzeichnet. Bei den Mischungen mit 25 Ma.-% PBG betrug der Sprung in der Längenänderung $-0,17$ mm/m für beide Bindemittelvarianten. Der geringste Sprung wurde mit $-0,11$ mm/m (Stuckgips) bzw. $-0,12$ mm/m (RC-Gips) bei den Prismen mit 40 Ma.-% PBG festgestellt.

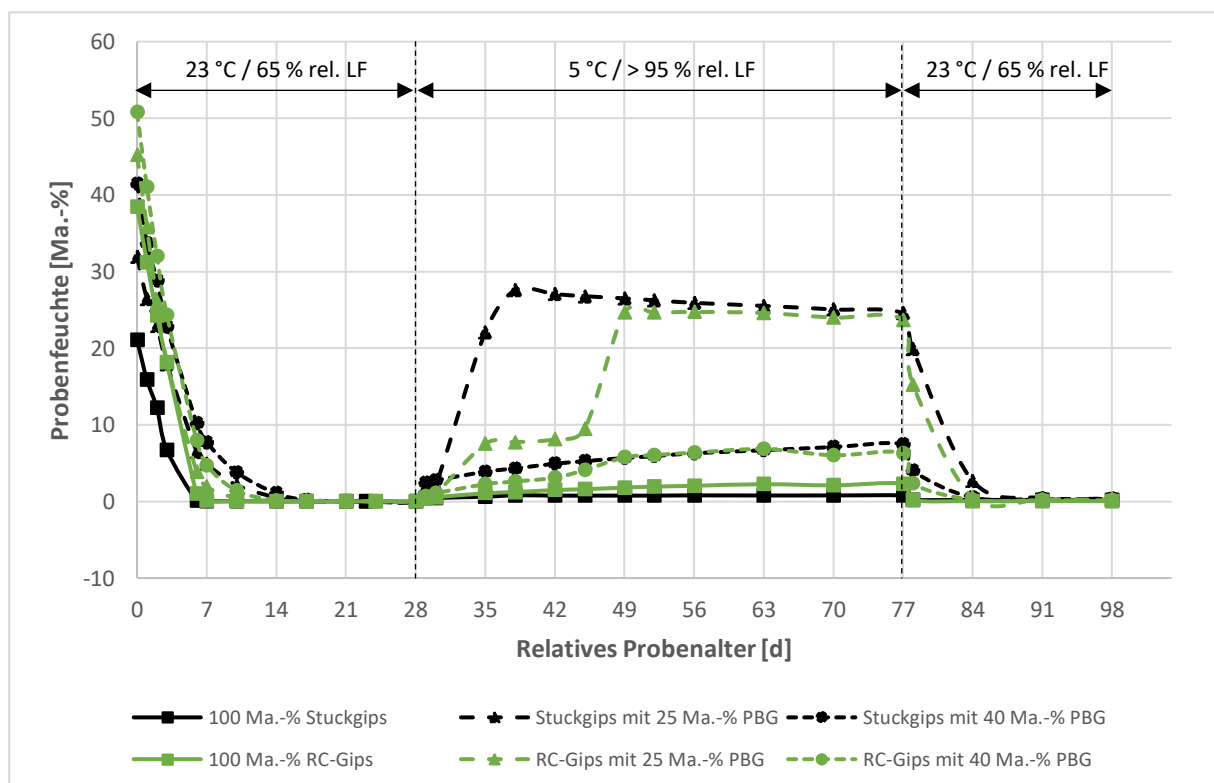


Abbildung 62: Feuchtegehalt von Prismen ausgewählter Rezepturen bei wechselnden klimatischen Bedingungen

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Im feucht-kalten Klima nahmen die Proben Feuchtigkeit auf, wodurch die Proben wieder geringfügig quollen. Der Feuchtegehalt der Proben ohne zwischenzeitlichen Wasserkontakt betrug am Ende der zweiten Klimaperiode nach 77 Tagen 1-2 Ma.-% (100 % Gips) bzw. 6-7 Ma.-% (40 Ma.-% PBG). Ohne Wasserkontakt

hätten sich bei den Proben mit 25 Ma.-% PBG vermutlich Feuchtigkeiten zwischen 3 und 5 Ma.-% ergeben. So lag die Feuchte bei ca. 24 Ma.-%.

Die Längenänderungen nach 77 Tagen lagen bei den Proben mit Stuckgips zwischen -0,03 und -0,07 mm/m und bei den Proben mit RC-Gips bei -0,14 und -0,26 mm/m.

Durch den zweiten Klimawechsel auf 23 °C und 65 % relative Luftfeuchte kam es wieder zu einem Sprung bei der Längenänderung. Die Differenz der Längenänderung zum letzten Wert vor dem Klimawechsel betrug 0,06 bis 0,22 mm/m.

In der letzten Phase trocknete die aufgenommene Feuchtigkeit ab und es stellte sich bei den Proben mit Stuckgips nahezu die Ausgangslänge wieder ein. Bei den Proben mit RC-Gips wurden Längenänderungen von -0,11 bis -0,16 mm/m in einem relativen Alter der Proben von 98 Tagen bestimmt.

Insgesamt wurden über den betrachteten Zeitraum Längenänderungen von geringem Ausmaß verzeichnet. Die Proben verblieben nach Abschluss des Versuchs weiterhin im Normalklima (23/65). Nach 175 Tagen wurde eine weitere Messung durchgeführt. Hierbei wurden im Vergleich zur Messung nach 98 Tagen nahezu unveränderte Werte ermittelt.

Im Vergleich zu den Referenzproben ohne PBG wiesen die Proben mit PBG keine wesentlich differierenden Längenänderungen auf. Anzeichen einer Treibmineralbildung wurden selbst bei den Proben mit Wasserkontakt nicht beobachtet. Mögliche Gipsplattenprodukte mit PBG sollten somit ungünstigen klimatischen Bedingungen, z. B. während der Bauphase, standhalten.

Labor-Probeplatten

Ausgehend von den entwickelten Rezepturen wurden am ThlWert in Nordhausen Labor-Probeplatten mit den Abmessungen von ca. 300 mm x 400 mm x 12,5 mm hergestellt, indem der frisch angemischte Gipsleim bzw. Porenbeton-Gipsmörtel in eine Holzschalung eingefüllt und die Platten nach dem Abbinden des Bindemittels vorsichtig entschalt wurden. Von 30 der insgesamt 51 Rezepturen wurden Laborprobenplatten hergestellt. Der Herstellungsprozess der Laborplatten wurde gemäß den Vorgaben der DIN EN 13279-2:2014-03 [24] unter Berücksichtigung der Laborbedingungen des ThlWert angepasst. Das PBG, Gips und ggf. Zusätze wurden einzeln gewogen und in einem Behälter von Hand vorgemischt bzw. homogenisiert. Die trockene Mörtelmasse wurde dann behutsam und kontinuierlich in das zuvor berechnete Zugabewasser ($\text{Wasser}_{\text{ges}}$) eingestreut, während gleichzeitig bei der Dosierung der Ausgangsstoffe mit einem elektronischen Mischer manuell für 1 Minute gerührt wurde. Die Gemische wurden nach dem Dosierungsprozess bei niedriger Geschwindigkeit mithilfe des elektrischen Mixers für etwa 1 Minute weitergemischt.

Der frische Mörtel wurde in die mit einem Trennmittel bestrichene Holzschalung gefüllt und gleichmäßig verteilt. Zur Verdichtung wurde die Form 5 Mal um 10 mm angehoben und fallen gelassen. Die Laborplatten wurden bei einer Temperatur von etwa 25 °C und unter Raumfeuchtigkeit zur Aushärtung gelagert. In der Regel wurden die Platten nach etwa einem Tag ausgeschalt. Die Platten wurden anschließend gekennzeichnet und zum Leibniz-IWT transportiert. Dort wurden aus den Platten jeweils 10 Proben mit den Abmessungen von ca. 200 mm x 50 mm x 12 mm gesägt, bis zur Massenkonstanz bei 40 °C getrocknet und anschließend die Biegezugfestigkeit der Proben bei einer Stützweite von 100 mm bestimmt.

Basierend auf den Ergebnissen der Laboruntersuchungen der Rezepturnummern 1 bis 9 wurden verschiedene Mischungsverhältnisse von Gips und Porenbeton-Abbruchmaterial erprobt. Die Ergebnisse zeigten, dass die Herstellung von Labor-Probeplatten mit einem PBG-Gehalt von 25 und 50 Ma.-% möglich ist.

Anschließend wurden Rezepturen mit PBG-Gehalten zwischen 30- und 45 Ma.-% in 5 %-Schritten zur Herstellung von Laborprobenplatten getestet (Rezepturnummern 10 bis 13). Die Realisierbarkeit dieser Varianten wurde überprüft, wobei während der Prozessschritte des Mischens, Einfüllens und Ausschalens keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten. Die Misch- und Einfüllschritte wurden jedoch weiterhin

nicht als optimal bewertet, da sich die Mischung nur schwer in der Form verteilen ließ. Basierend auf diesen Beobachtungen wurde der Einsatz eines Verzögerers in Betracht gezogen und in der Rezepturenentwicklung berücksichtigt. Zusätzlich wurden zwei weitere Rezepturen ohne PBG (Rezeptnummern 14 und 15) mit unterschiedlichen Wassergehalten getestet.

Der Einsatz von Verzögerern erwies sich als positiv für die Herstellung von Laborprobeplatten, wobei der Verzögerer VZ1 Vorteile in der Verarbeitbarkeit gegenüber dem Verzögerer VZ2 aufwies.

Auch Laborprobeplatten mit RC-Gips ließen sich erfolgreich herstellen. Im Vergleich zu den Platten aus Stuckgips wurden niedrigere Trockenrohdichten wie auch Festigkeiten erzielt.

In der letzten Phase wurden Probeplatten aus Plattenbruchmaterial (GPB) sowie aus GPB und PBG hergestellt. Hierbei wurden 25 bzw. 40 Ma.-% des Gipsgehalts durch Granulat ersetzt. Es wurden jedoch nur moderate Festigkeiten erzielt.

In der folgenden Abbildung 63 ist die im Labor verwendete Holzschalung zur Erstellung der Laborprobe-Platten dargestellt. Abbildung 64 zeigt hergestellte Labor-Probeplatten.

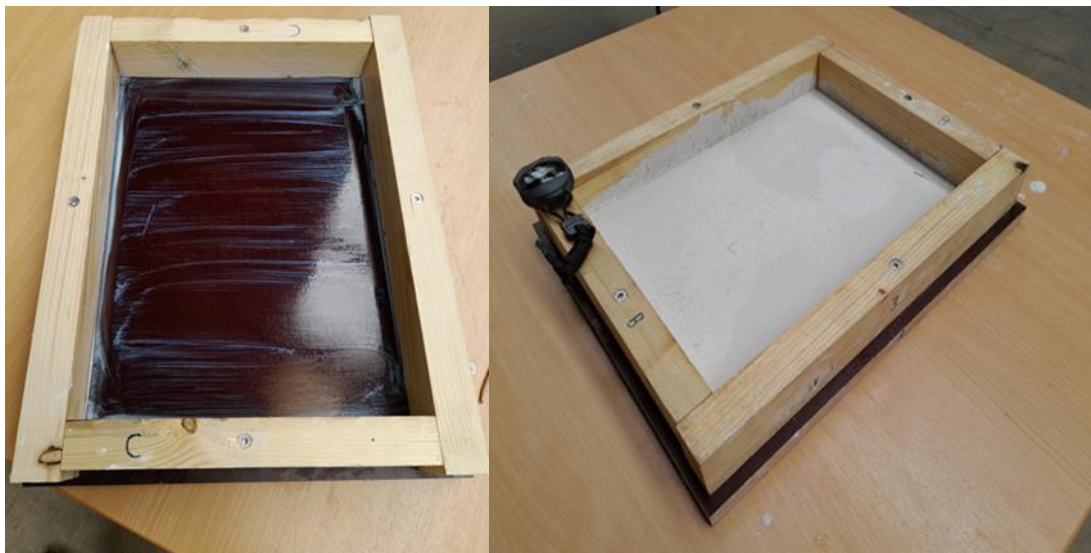


Abbildung 63: Holzschalung zur Herstellung von Laborplatten mit den Abmessungen von 300 mm x 400 mm x 12 mm (links: mit einem Trennmittel bestrichene Schalung; rechts: mit PBGM gefüllte Schalung)

Quelle: Simon Eichhorn, HSN/ThiWert

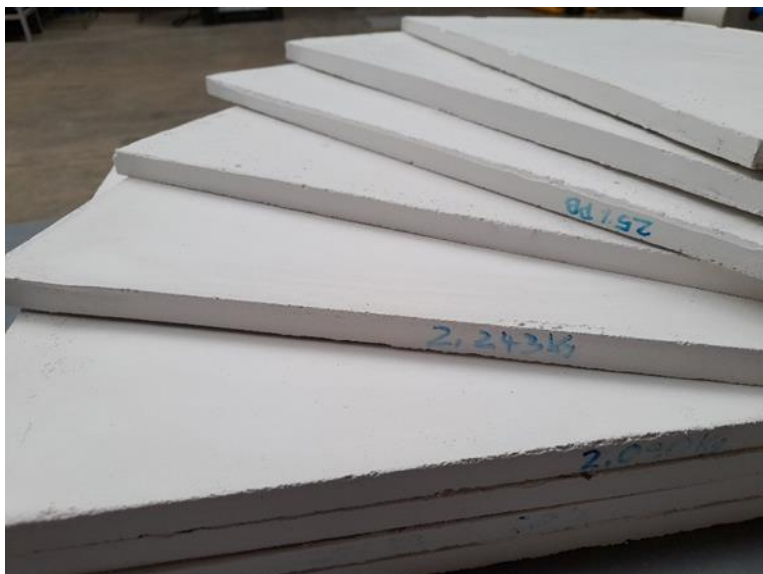


Abbildung 64: Hergestellte Labor-Probenplatten

Quelle: Simon Eichhorn, HSN/ThiWert

In der nachfolgenden Tabelle 37 sind die Festmörteleigenschaften der Labor-Probeplatten aufgeführt. Die Trockenrohdichten und Biegezugfestigkeiten deckten sich weitgehend mit den Kennwerten, die an Prismen ermittelt wurden. Rezepturnummern, die eine Ergänzung, wie z.B.: 2-V1 oder 2-V2 aufweisen, unterscheiden sich in ihrer Herstellungsweise. Zu Beginn des Projektes wurde erprobt, ob der feine Porenbeton vor dem Anmischen trocken oder vorgemäst sein muss. Da das Vornässen keine verbesserten mechanischen Eigenschaften hervorbrachte, wurde der Porenbeton nach einigen Versuchen ausschließlich im trockenen Zustand verwendet.

Tabelle 37: Festmörteleigenschaften der Labor-Probeplatten

Rezept-Nr.	Trockenrohdichte [kg/dm ³]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]
1	1,08	4,0
14	1,27	5,3
15	1,36	6,0
2-V1	1,00	3,1
2-V2	1,02	3,0
3-V1	1,07	3,6
3-V2	1,06	3,1
3-V3	1,05	3,2
4	1,01	3,6
6	0,81	1,7
7-V1	0,85	1,4
7-V2	0,85	1,6
10-V2	1,01	2,7
11	0,97	2,3
12	0,92	2,0
13	0,89	1,8
17	1,01	2,6
19	0,90	2,9
23	0,90	2,6
25	0,95	2,2
45	1,16	3,4
46	1,42	6,1

Rezept-Nr.	Trockenrohdichte [kg/dm ³]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]
39	0,88	2,2
40	0,93	2,1
41	1,06	3,2
35-V1	1,09	2,8
35-V2	1,09	3,2
42	0,85	1,4
43	0,90	1,8
44	1,01	2,9
47	1,17	1,7
48	1,20	1,7
49	1,03	1,0
50	1,12	1,4

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Demonstrator

Zur Veranschaulichung der Eignung und zur Bestätigung der angestrebten Verwendung als Bauplatten wurde ein Demonstrator aus Platten mit den Abmessungen von 500 mm x 1000 mm x 12 mm erstellt.

Zur Herstellung der Demonstratorplatten wurden die Rezepturen 19, 21, 22, 24, 35, 40, 42 und 51 ausgewählt. Die Rezepturparameter sind der Tabelle 38 zu entnehmen.

Die Platten enthielten einen PBG-Gehalt von 40 Ma.-%. Sie wurden überwiegend aus Stuckgips und feinem Porenbetongranulat aus Abbruchmaterial (PBG-A_{fein}) hergestellt. Lediglich die Rezeptur 51 enthielt als Substitut neben feinem PBG-A zur Hälfte Gipsplattenbruch (GPB). Da diese Variante nur geringe Festigkeiten aufwies, konnte daraus keine stabile Demonstratorplatte hergestellt werden. Daher wurde auf die Rezeptur 47 zurückgegriffen, die nur 25 Ma.-% Granulat, zusammengesetzt aus 12,5 Ma.-% PBG-A_{fein} und 12,5 Ma.-% GPB, enthielt. Diese Rezeptur wurde für die Herstellung der Demonstratorplatte modifiziert (47 modifiziert), indem Fließmittel in einer Menge von 0,45 Ma.-% der Bindemittelmasse eingesetzt wurde, um eine weichere Konsistenz zu erzielen, ohne den R-Wert zu erhöhen. Durch den Einsatz des Fließmittels konnte zudem die Verzögererdosierung um 0,047 Ma.-% der Trockenmörtelmasse gesenkt werden. Auf diese Weise konnte gewährleistet werden, dass eine stabile Demonstratorplatte mit anteiligen Gipsplattenbruch hergestellt werden konnte.

Neben Rezepturen mit Stuckgips wurde eine Rezeptur mit RC-Gips ausgewählt. Alle Platten enthielten Verzögerer. Eingesetzt wurden der Verzögerer VZ1 wie auch der Verzögerer VZ2. Zudem wurden Rezepturen mit Fließmittel (FM) und Luftporenbildner (LP) für die Herstellung von Demonstratorplatten ausgetestet.

Tabelle 38: Parameter der für die Demonstratorplattenherstellung ausgewählten Rezepturen

Rez.-Nr.	Substitution [Ma.-%]	Granulat	Binde- mittel	Anteil VZ [Ma.-% d. TMM]	Anteil LP [Ma.-% d. TMM]	Anteil FM [Ma.-% d. BMM]	Ausbreit- maß [mm]	R- Wert [-]
19	40	PBG- A _{fein}	Stuckgips	0,005 (VZ1)	0	0	202	0,495
21	40	PBG- A _{fein}	Stuckgips	0,015 (VZ1)	0	0	197	0,495
22	40	PBG- A _{fein}	Stuckgips	0,005 (VZ2)	0	0	198	0,495
24	40	PBG- A _{fein}	Stuckgips	0,015 (VZ2)	0	0	196	0,495
35	40	PBG- A _{fein}	Stuckgips	0,005 (VZ1)	0	0,45	168	0,317
40	40	PBG- A _{fein}	Stuckgips	0,005 (VZ1)	0,20	0	165	0,420
42	40	PBG- A _{fein}	RC-Gips	0,05 (VZ1)	0	0	165	0,560
51	40	PBG- A _{fein} /GPB	Stuckgips	0,31 (VZ1)	0	0,45	220	0,560
47 modifiziert	25	PBG- A _{fein} /GPB	Stuckgips	0,263 (VZ1)	0	0,45	220	0,419

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Ein höherer Verzögereranteil in der Rezeptur hatte positive Auswirkungen auf die Prozessschritte „Mischen“ und „Einfüllen“. Hierbei erwies sich der Verzögerer VZ1 im Vergleich zur VZ2 als besser geeignet. Eine Dosierung von 0,005 Ma.-% VZ2 erwies sich als ungeeignet für die Herstellung von Demonstratorplatten.

Platten, die Fließmittel enthielten, wiesen bei geringeren R-Werten eine verlängerte Verarbeitbarkeitszeit auf. Zudem konnten positive Effekte auf die Verarbeitbarkeit der Mörtel festgestellt werden.

Mit dem Einsatz eines Luftporenbildners sollten erwartungsgemäß bessere Verarbeitungseigenschaften erzielt werden. Dieser Mörtel (Rezeptur 40) erwies sich jedoch für die Prozessschritte „Mischen“ und „Einfüllen“ nur mit Einschränkungen als geeignet.

Tabelle 39 bietet einen Überblick über die Eignung der jeweiligen Rezepturen in den verschiedenen Schritten des Herstellungsprozesses.

Abbildung 65 zeigt die frisch in die Form gegossene Rezeptmischung und eine bereits aus der Form genommene Platte im größeren Format.

Tabelle 39: Herstellung der Demonstratorplatten - Eignung der ausgesuchten Rezepturen für die jeweiligen Prozessschritte (Legende: dunkelgrün = geeignet; hellgrün = geeignet mit Einschränkungen; orange = bedingt geeignet; rot = nicht geeignet)

Rezeptnr. Prozess	19	21	22	24	35	40	42	51	47 (modifiziert)
Mischen	orange	dunkelgrün	orange	hellgrün	dunkelgrün	hellgrün	dunkelgrün	dunkelgrün	dunkelgrün
Einfüllen	orange	dunkelgrün	orange	hellgrün	dunkelgrün	hellgrün	dunkelgrün	dunkelgrün	dunkelgrün
Ausschalen	dunkelgrün	dunkelgrün	dunkelgrün	dunkelgrün	dunkelgrün	dunkelgrün	dunkelgrün	dunkelgrün	dunkelgrün
Demoplatte	dunkelgrün	dunkelgrün	rot	dunkelgrün	dunkelgrün	dunkelgrün	dunkelgrün	rot	dunkelgrün

Quelle: Yuwei Chang, HSN/ThiWert



Abbildung 65: Frisch in die Schalung gefüllter PBGM (links) und ausgeschaltete Demonstratorplatte (rechts)

Quelle: Simon Eichhorn, HSN/ThiWert

Um die angestrebte Verwendung als Bauplatte zu überprüfen, wurden die Demonstratorplatten ausgeschalt und verschiedenen Verarbeitungsschritten unterzogen. Dies umfasste:

- Anfasen der Plattenstöße;
- Zuschnitt auf benötigtes Maß;
- Verschrauben der Platten an der Demonstratorwand.

Das Anfasen der Plattenstöße für die spätere Verspachtelung konnte problemlos mit einem Cuttermesser durchgeführt werden. Ebenso war das Zuschneiden der Platten mittels Cuttermesser möglich (siehe Abbildung 66). Darüber hinaus ließen sich die Platten mühelos mit der Unterkonstruktion an der Demonstratorwand verschrauben (siehe Abbildung 67).



Abbildung 66: Zuschneiden der Demonstratorplatten mit dem Cuttermesser (links) und angefaste Plattenstöße (rechts)

Quelle: Simon Eichhorn, HSN/ThiWert



Abbildung 67: Verschraubung einer Platte aus PBGM an einer Unterkonstruktion

Quelle: Simon Eichhorn, HSN/ThiWert

Um die Verarbeitbarkeit der Demonstratorplatten in realen Situationen zu überprüfen, wurde die Trockenbauwand mit zwei unterschiedlichen Unterkonstruktionen aufgebaut. In der Front wurden OSB-Platten als stabilisierender Unterbau auf der Ständerwand aufgeschraubt und nachfolgend die Demonstratorplatten montiert. Auf der Rückseite der Trockenbauwand wurden die Demonstratorplatten direkt auf der Ständerkonstruktion verschraubt, ohne stabilisierenden Unterbau. Die unterschiedlichen Montagearten wurden gewählt, um die in der Praxis häufig genutzten Varianten der Trockbauwände nachzustellen. Dies konnte erfolgreich an der Trockenbauwand/dem Demonstrator im ThiWert/ HSN nachgewiesen werden.

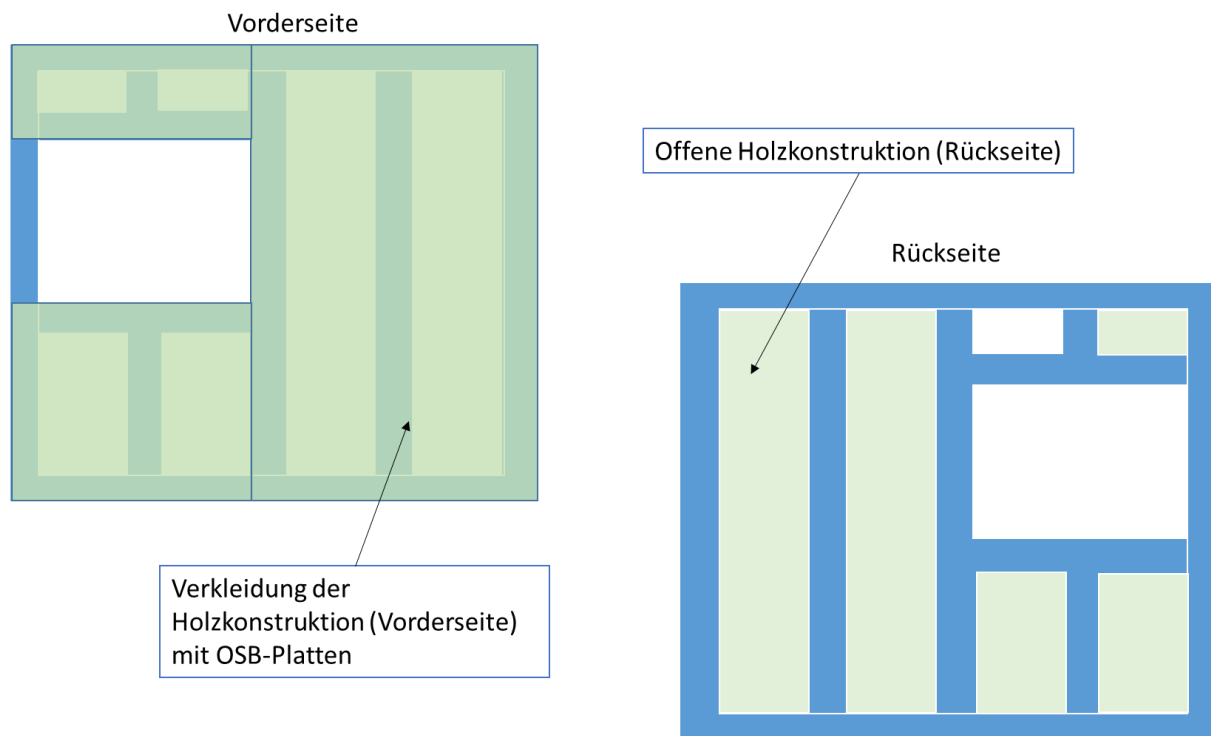


Abbildung 68: Unterkonstruktion Demonstrator

Quelle: Simon Eichhorn, HSN/ThiWert

Anhand des Demonstrators (Abbildung 70) konnte aufgezeigt werden, dass die hergestellten PB-Gipsplatten sich wie herkömmliche Gipsprodukte aus Primärmaterial verarbeiten ließen. In der Front der Trockenbauwand wurden Demonstratorplatten unterschiedlicher Rezepturen befestigt. Die offene und unverputzte Darstellung dient zur Anschauung der entwickelten Rezepturen. Insbesondere soll interessierten Fachleuten die Möglichkeit gegeben werden, die haptischen Eigenschaften und die Verarbeitbarkeit zu betrachten. Die Rückseite des Demonstrators ist mit Platten aus einer ausgewählten Rezeptur (Nr. 35) sowie einer Gipskarton- und einer Gipsfaserplatte aufgebaut. Die aus der Rezeptur 35 hergestellten Demonstratorplatten wiesen gleichmäßige und glatte Oberflächeneigenschaften auf, was qualitativ mit den beiden Referenzplatten vergleichbar ist. Ziel ist es, wie in Abbildung 70 (rechtes Bild) dargestellt, die Trockenbauwand gänzlich in die Großraumstruktur zu integrieren.

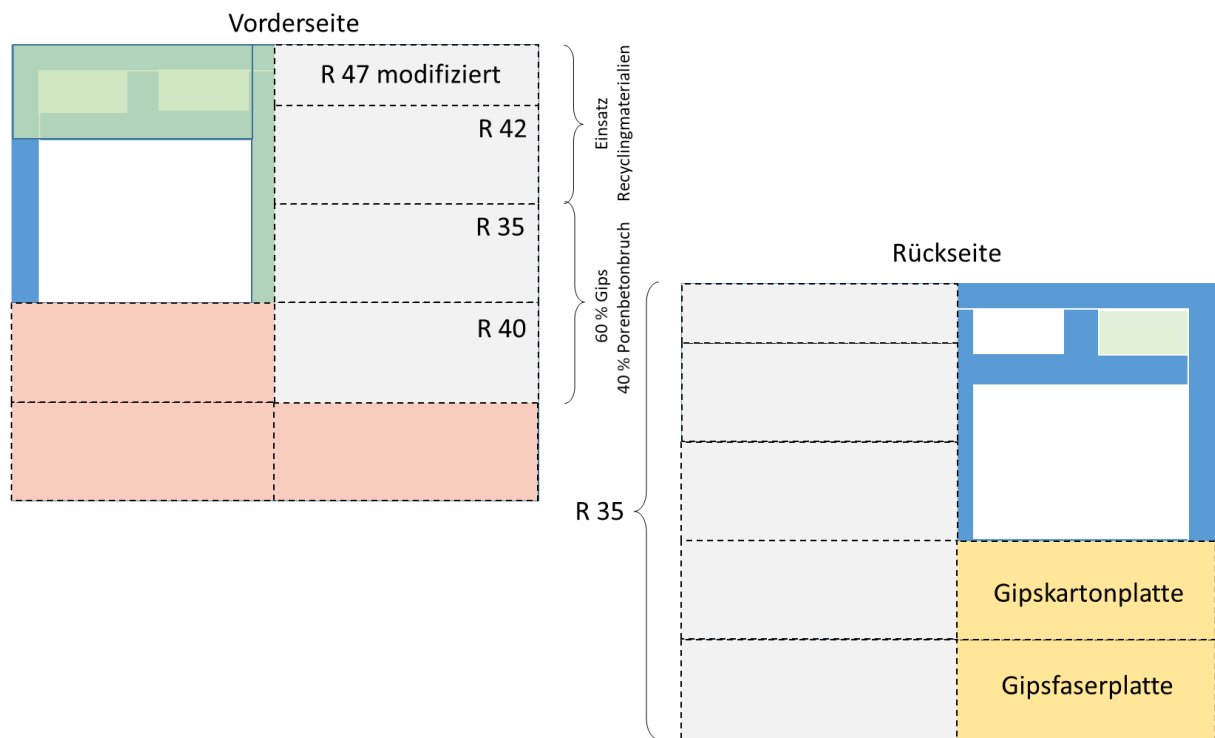


Abbildung 69: Montageplan Demonstrator

Quelle: Simon Eichhorn, HSN/ThiWert



Abbildung 70: Gesamtansicht des Demonstrators (links: Vorderseite; rechts: Rückseite)

Quelle: Simon Ballüer, HSN/ThiWert

Industrierversuch

Die Laborergebnisse wurden bei einem Gipsplattenhersteller hochskaliert.

Vor der Herstellung von Gipsfaserplatten für ein Doppelboden-System wurden im Werk Voruntersuchungen zum Filtrationsverhalten, zum Wasseranspruch, zur Reaktionszeit und zur Verarbeitung von Mischungen mit unterschiedlichen PBG-Gehalten durchgeführt. Untersucht wurden Mischungen aus 100 Ma.-% Stuckgips sowie mit 25- und 40 Ma.-% feinem Porenbetongranulat aus Abbruchmaterial (PBG-A_{fein}).

Mischungen aus 500 g Wasser und 100 g Feststoff wurden zunächst mit oberseitigem Druck durch ein Sieb filtriert. Die Suspension aus Gips und Wasser ließ sich am schnellsten entwässern. Mit zunehmendem PBG-Gehalt der Suspension nahm zwar die Entwässerungsgeschwindigkeit ab, jedoch wurden weiterhin gute Entwässerungseigenschaften erzielt.

In einem nächsten Schritt wurde der Gips bzw. Trockenmörtel mit einer Pulpe (Gemisch aus Papierfasern und Wasser), Verzögerer und Wasser gemischt und der Wasseranspruch für ein Ausbreitmaß von (140±2) mm ermittelt.

Die Reaktionszeiten wurden an frischen Nassmischungen sowie an entwässert und ausgeformten Probekörpern bestimmt. Hierbei wurde festgestellt, dass der Reaktionsbeginn durch die Zugabe von PBG früher eintritt als bei der reinen Gipsmischung. Anhand der Nassmischung wurden um 4 % (25 Ma.-% PBG) bzw. 10 % (40 Ma.-% PBG) geringere Reaktionszeiten ermittelt. Mittels der entwässert und ausgeformten Probekörper wurden um 15 bzw. 23 % geringere Reaktionszeiten gegenüber einer Mischung mit 100 % Gips ermittelt. Dennoch konnten Verarbeitungszeiten von mindestens 1,5 Stunden gewährleistet werden, was für die Herstellung von Gipsfaserplatten mehr als ausreichend ist.

Zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit wurden Nassmischungen mit Pulpe und Verzögerer hergestellt und auf einer Vakuumpresse mit Siebgewebe entwässert. Hierbei wurde festgestellt, dass sich alle Mischungen gut entwässern ließen.

Das Ergebnis der Voruntersuchungen war, dass sich Mischungen mit bis zu 40 Ma.-% PBG zu Gipsfaserplatten verarbeiten lassen. Hierbei muss beachtet werden, dass der Reaktionsbeginn schneller eintritt, ein erhöhter Wasseranspruch vorliegt und die Entwässerung geringfügig länger dauert.

Für die Herstellung der Gipsfaserplatten mit dem Stuckgips aus den Voruntersuchungen wurde ein PBG-Gehalt von 25 Ma.-% gewählt. PBG und Gips wurden zunächst in einem Behälter trocken vorgemischt. Nachdem die Pulpe mit Verzögerer und Wasser in den Mischer eingefüllt und für 30 s gemischt wurde, wurde die Trockenmischung aus PBG und Gips hinzugegeben und die gesamte Masse 180 s lang gemischt. Die fertige Mischung wurde anschließend in das Presswerkzeug eingefüllt, filtriert und mit Druck verdichtet. Die geformte Platte wurde entnommen und bis zum Abbinden auf einer stabilen Unterlage abgelegt.

Zudem wurden Platten mit RC-Gips und einem PBG-Gehalt von 40 Ma.-% hergestellt. Hierzu wurden keine weiteren Vorversuche durchgeführt. Die Zusammensetzung beruhte auf Erfahrungswerten der Werksmitarbeiter. Zur Herstellung von reaktivem RC-Gips wurden Gipskartonplatten zerkleinert und suspendiert. Anschließend erfolgte die Umwandlung in einem Druckrührbehälter zu einer faserigen Calciumsulfat-Alpha-Halbhydrat-Suspension. Das Vorliegen des Bindemittels als Suspension erforderte einen geänderten Mischprozess. Daher wurde die Pulpe zunächst mit PBG und Verzögerer 180 s lang vorgemischt, bevor die RC-Gips-Suspension dazugegeben wurde und die Komponenten für weitere 180 s gemischt wurden.

Die Gipsfaserplatten mit PBG wiesen nach dem Pressen Abmessungen von ca. 604 x 605 x 39 mm auf. Nach dem Abbinden des Gipses wurden die Platten bei 60 °C auf eine Feuchte von < 1 Ma.-% getrocknet und abschließend in einer Schleifanlage auf eine Dicke von 32 mm geschliffen.

Die Platten mit 25 Ma.-% PBG wiesen eine Trockenrohichte von ca. 1,3 kg/dm³ auf. Die Trockenrohichte der Platten mit 40 Ma.-% PBG sowie RC-Gips betrug ca. 1,1 kg/dm³. Die Trockenrohichte einer Standardplatte des Herstellers ohne PBG liegt üblicherweise bei ca. 1,5 kg/dm³.

In den folgenden Abbildungen 71 und 72 finden sich Fotos der industriell hergestellten Gipsfaserplatten.

Die Standardplatte ohne PBG weist im Vergleich zu den Platten mit PBG eine dunklere Farbe auf. Vergleicht man die Platten mit PBG untereinander, sind die Platten mit 25 Ma.-% PBG und Stuckgips heller als die Platten mit 40 Ma.-% PBG und RC-Rips. Die dunklere Farbe der Platten mit höherem PBG-Gehalt, wird vermutlich durch die Verwendung des RC-Gipses anstelle des Stuckgipses verursacht, da erwartungsgemäß ein höherer PBG-Gehalt mit einer helleren Farbgebung einhergehen sollte.

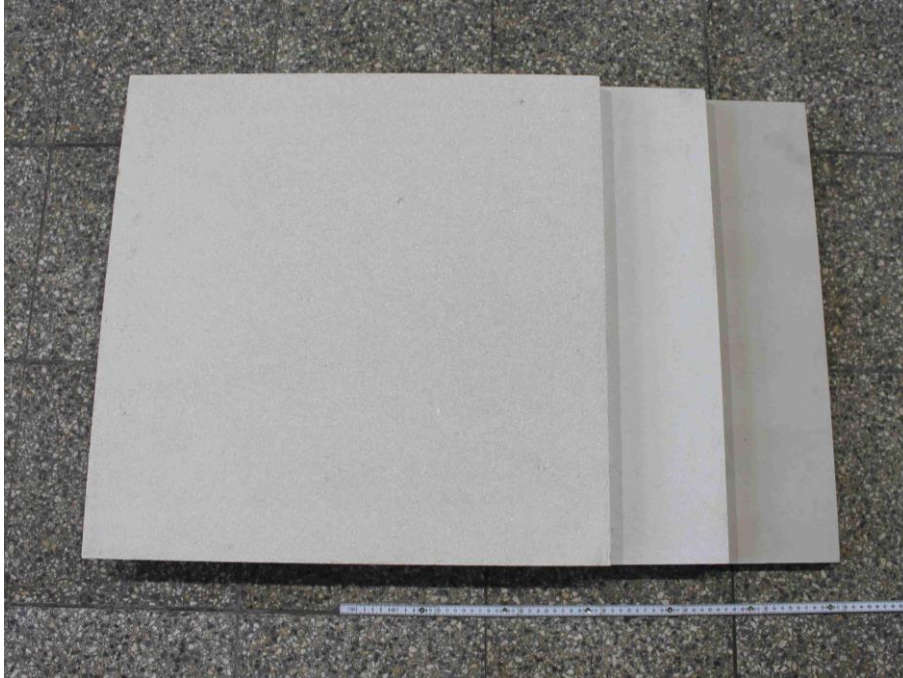


Abbildung 71: Industriell gefertigte Gipsfaserplatten; von oben nach unten: Platte mit 40 Ma.-% PBG und RC-Gips, Platte mit 25 Ma.-% PBG und Stuckgips, Standardplatte ohne PBG

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

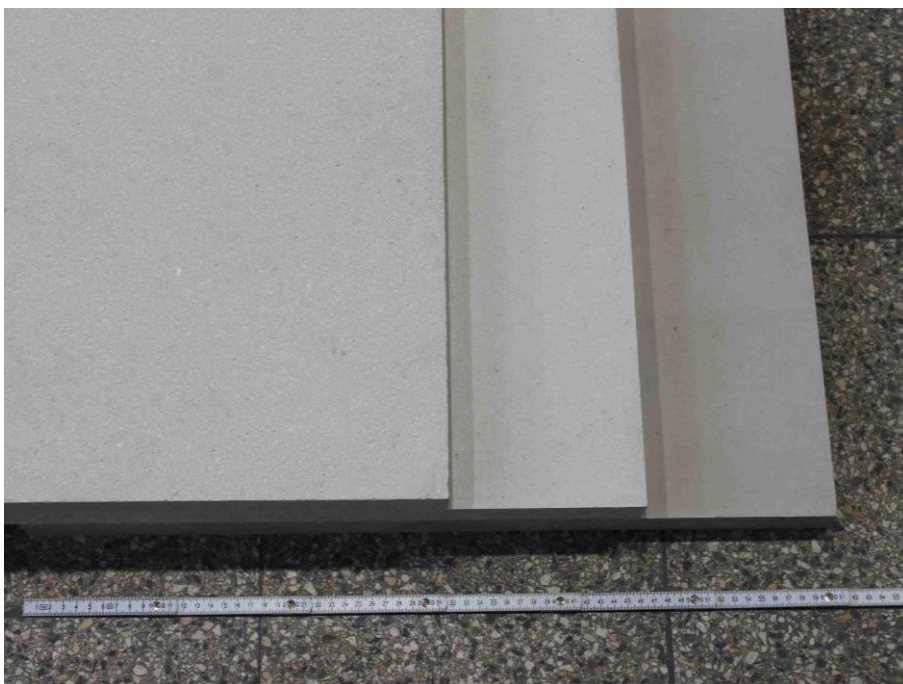


Abbildung 72: Industriell gefertigte Gipsfaserplatten; Nahaufnahme der Platten aus Abbildung 71

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Eine Musterplatte des Herstellers ohne PBG sowie die Platten mit 25 Ma.-% PBG und 40 Ma.-% PBG wurden zur Prüfung der Biegezugfestigkeit in jeweils 10 Proben mit den Abmessungen von ca. 300 x 50 x 32 mm gesägt. Aufgrund der im Vergleich zu den Labor-Probepplatten höheren Dicke der Fußbodenplatten, wurde die Stützweite von 100 mm auf 267 mm und die Belastungsgeschwindigkeit von 1,5 N/s auf 18 N/s erhöht. Vor der Prüfung wurden die Proben bei 40 °C bis zur Massenkonzanz getrocknet.

Die Ergebnisse der Biegezugprüfung sind als Mittelwerte in der folgenden Tabelle Nr. 40 aufgeführt.

Tabelle 40: Eigenschaften der industriell hergestellten Bodenplatten

Platte	Trockenrohdichte [kg/dm ³]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]
Musterplatte ohne PBG	1,57	14,6
Platte mit 25 Ma.-% PBG und Stuckgips	1,27	7,7
Platte mit 40 Ma.-% PBG und RC-Gips	1,10	6,2

Quelle: Hakan Aycil, Leibniz-IWT

Die Trockenrohdichte der Musterplatte ohne PBG betrug 1,57 kg/dm³. Im Mittel erzielte diese Platte eine Biegezugfestigkeit von 14,6 N/mm². Die Platte mit 25 Ma.-% PBG und Stuckgips wies eine Biegezugfestigkeit von 7,7 N/mm² bei einer Trockenrohdichte von 1,27 kg/dm³ auf. Die Biegezugfestigkeit der Platte aus 100 % Recyclingmaterial (40 Ma.-% PBG und RC-Gips) betrug 6,2 N/mm² bei einer Trockenrohdichte von 1,10 kg/dm³.

Zusammenfassung

Als Ausgangsstoffe kamen Porenbetongranulate aus Abbruchmaterial sowie aus Neuware, ein handelsüblicher Stuckgips, kalzinierter RC-Gips, Verzögerer auf Basis von modifizierter Aminosäure, Fließmittel auf Basis von modifiziertem Polycarboxylat und Luftporenbildner auf Basis von anionischem Tensid zum Einsatz.

Der Porenbetonabbruch sowie die Porenbetonneuware wurde über einen zweistufigen Brechvorgang zu Porenbetongranulat (PBG) der Körnung 0/4 mm aufbereitet und eingehend charakterisiert. Der RC-Gips wurde in eine reaktive Form überführt, indem er gemahlen und für ca. 4 Stunden bei 140 °C kalzinert wurde.

Untersucht wurden reine Gipsleime sowie Porenbeton-Gipsmörtel (PBGm) mit unterschiedlich hohen Gehalten an PBG. Das PBG wurde trocken wie auch vorgehängt verwendet. Am Frischmörtel wurden das Ausbreitmaß, der Versteifungsbeginn und die Frischmörtelrohdichte bestimmt. Am Festmörtel erfolgte die Ermittlung der Trockenrohdichte, der Biegezugfestigkeit sowie der Druckfestigkeit an Prismen mit den Abmessungen von 40 mm x 40 mm x 160 mm. An ausgesuchten Rezepturen wurden Gefüge- und Dauerhaftigkeitsuntersuchungen durchgeführt.

Durch das Vornässen der PBG konnte kein positiver Einfluss auf die Mörtel Eigenschaften beobachtet werden, so dass eine trockene Verwendung des PBG aufgrund des geringeren Aufwands zu favorisieren ist.

Die Substitution des Bindemittels durch PBG führte zu einer Senkung der Trockenrohdichte und den Festigkeiten. Die Biegezugfestigkeit des Gipskerns einer handelsüblichen Gipskartonplatte betrug 1,8 N/mm². Der PBGM mit einem PBG-Gehalt von 50 Ma.-% wies eine Biegezugfestigkeit auf dem selben Niveau auf, so dass eine technische Nutzung von Gipsplattenprodukten aus Porenbeton-Brechsand bis zu einem Substitutionsgehalt von bis zu 50 Ma.-% möglich erscheint.

Da die PBGM ein sehr schnelles Ansteifverhalten aufwiesen, war es erforderlich, verzögernde Zusatzmittel einzusetzen. Die Gewährleistung einer Verarbeitbarkeitszeit von mindestens 20 min erforderte die Dosierung von 0,005 Ma.-% der Trockenmörtelmasse des Verzögerers VZ1 und 0,010 Ma.-% der Trockenmörtelmasse des Verzögerers VZ2. Der Einsatz von Verzögerern hatte eine Erhöhung des Ausbreitmaßes zur Folge.

Durch die Verwendung eines Luftporenbildners in Dosierungen von 0,025 bis 0,2 Ma.-% der Trockenmörtelmasse konnte die Trockenrohdichte der PBGM um bis zu 0,12 kg/dm³ gesenkt werden. Die Druckfestigkeit wurde dadurch merklich gesenkt. Tendenziell sank auch die Biegezugfestigkeit, jedoch nicht so deutlich wie die Druckfestigkeit. Da die Verarbeitbarkeit der Mörtel durch die Zugabe von Luftporenbildner nicht verbessert und die Trockenrohdichte nur mäßig gesenkt wurde, ist die eine Erhöhung des PBG-Gehalts der Verwendung eines Luftporenbildners vorzuziehen.

Der Wassergipswert konnte durch den Einsatz eines Fließmittels in Dosierungen von 0,15 bis 0,45 Ma.-% der Bindemittelmasse von 0,460 auf bis zu 0,317 gesenkt werden. Dies führte zu einer moderaten Steigerung der Druckfestigkeit um 2 N/mm². Die Biegezugfestigkeit blieb nahezu unverändert. Die Verwendung des Fließmittels führte zu einer deutlichen Erhöhung der Verzögerungswirkung. Bei der Höchstdosierung von 0,45 Ma.-% trat der Versteifungsbeginn im Vergleich zur Mischung ohne Fließmittel ca. eine Stunde später ein.

Durch das Mahlen und Kalzinieren konnte der RC-Gips in einen reaktionsfähigen Zustand gebracht werden und somit Proben aus 100 % Recyclingmaterial hergestellt werden. Der Referenzleim wies eine Druckfestigkeit von 12,7 N/mm² und eine Biegezugfestigkeit von 3,1 N/mm² auf. Im Vergleich zu den Mörteln mit Stuckgips hatten die Mörtel mit RC-Gips einen höheren Wasseranspruch und wiesen niedrigere Trockenrohdichten auf. Zudem war eine um den Faktor 10 höhere Verzögererdosierung erforderlich, um eine Verarbeitbarkeitszeit von mindestens 20 min zu gewährleisten. Bei einer Substitution des Gipsgehalts durch 25 Ma.-% PBG wurde eine Druckfestigkeit von 7,7 N/mm² und eine Biegezugfestigkeit von 2,4 N/mm² erzielt. Diese Festigkeiten lassen die Herstellung von Gipsplattenprodukten erwarten.

Auf Basis der Mörtelentwicklungen im Labor wurden Probeplatten mit den Abmessungen von 300 mm x 400 mm x 12 mm hergestellt und ihre Trockenrohdichte sowie ihre Biegezugfestigkeit ermittelt. Zudem wurden Platten mit den Abmessungen von 500 mm x 1000 mm x 12 mm zur Errichtung einer Demonstratorwand erfolgreich hergestellt. Die Eigenschaften, die anhand der Probeplatten ermittelt wurden, deckten sich im Wesentlichen mit den Ergebnissen der Prismenprüfungen. Die Demonstratorplatten konnten wie herkömmliche Gipsplatten aus Primärmaterial verarbeitet werden und wurden auf OSB-Platten sowie auf einer Holzständerkonstruktion montiert.

Das Gefüge ausgesuchter Proben wurde im Lichtmikroskop untersucht. Hierbei konnte festgestellt werden, dass die PBG gut in die Gipsmatrix eingebettet wurden. Dauerhaftigkeitsuntersuchungen belegten, dass ungünstige Umgebungsbedingungen, die z. B. während der Bauphase vorliegen können, zu keinen Treiberscheinungen an PBGM führen.

Ein zweiter Recyclingzyklus wurde simuliert, indem Platten aus PBGM gebrochen und aufbereitet wurden. Dieser Plattenbruch wurde eingesetzt, um neue Platten herzustellen. Hierbei wurde festgestellt, dass die Verzögererdosierung von 0,005 Ma.-% auf 0,31 Ma.-% der Trockenmörtelmasse deutlich erhöht werden muss. Die sich ergebenden Festigkeiten waren sehr niedrig und sind für die Herstellung von Gipsplatten als bedingt bis nicht geeignet einzustufen. Die Herstellung einer Demonstratorplatte konnte jedoch durch die Begrenzung des Plattenbruchanteils sowie des PBG-Anteils auf jeweils 12,5 Ma.-%, durch den Einsatz eines Fließmittels bei gleichzeitiger Reduzierung der Verzögererdosierung auf 0,26 Ma.-% ermöglicht werden. Die Untersuchungen zeigen weiteren Forschungsbedarf auf. Die Reaktionsmechanismen, die das Recycling in einem weiteren Zyklus erschweren, sind in möglichen Folgevorhaben zu ergründen.

Die in den Laboruntersuchungen erzielten Ergebnisse wurden hochskaliert. Bei einem Hersteller von Gipsfaserplatten konnten Produkte aus Stuckgips und 25 Ma.-% PBG sowie aus einem RC-Gips und 40 Ma.-% PBG erfolgreich gefertigt werden.

Die Machbarkeit von Gipsplatten aus PB-Brechsand wurde nachgewiesen. Das Ziel des Vorhabens wurde somit erreicht.

Fazit und Ausblick

Der Ausstieg aus der Kohleverstromung und der damit verbundene Wegfall des REA-Gipses zwingt die gipsverarbeitende Industrie, neue Lösungen für die verknappende Rohstoffsituation zu suchen. In erster Linie rückt dabei der vermehrte Naturgipsabbau in den Fokus. Um diesen Umstand der stärkeren Nutzung von Primär-Ressourcen abzumindern, sehen Industrie und Forschungsinstitutionen Handlungsbedarf.

Die derzeitige Notwendigkeit nach Gipsersatzbaustoffen zu forschen, um den Wegfall des REA-Gipses teilweise zu kompensieren, führte zu der im Forschungsvorhaben aufgestellten Arbeitshypothese. Ziel war es, sulfatisch gebundene Mörtel unter Verwendung von Porenbeton-Brechsand zur Herstellung von Bauprodukten zu entwickeln und zu erproben, die den gängigen Gipsbaustoffen ähneln. Ressourcenschonende und bautechnisch attraktive Gipsbauprodukte mit minimalen Gipsgehalten und maximalen PBG-Gehalten waren angestrebt.

Die im Rahmen des Projektes entwickelten Rezepturen wurden erst im Labormaßstab geprüft und in Bezug auf ihre Anwendbarkeit zur Herstellung von Bauprodukten sowie ihre Nutzung nach dem Vorbild gängiger Gipsbaustoffe bestätigt. Die im Projekt entwickelten Rezepturen aus Gips und PBG zeigen grundlegend die Machbarkeit des Forschungsansatzes auf. Die Eigenschaften der untersuchten Mörtel weisen darauf hin, dass eine Substitution von bis zu 50 % des Gipsgehalts durch PBG möglich ist. Eine Vielzahl an Analysen, die die mechanischen Eigenschaften berücksichtigten, wurden anhand von Mörtelprismen, Laborprobeplatten und industriell hergestellten Produkten getestet.

Im Verlauf des Vorhabens wurde die Recyclingfähigkeit der gipsgebundenen Bauplatten mit PB-Brechsand überprüft und es wurde festgestellt, dass das Granulat aus Plattenbruch (GPB) nur in geringen Anteilen in neuen PB-Gipsplatten eingesetzt werden kann.

Die Wiederverwendung des GPB wird in künftigen Projekten eine zentrale Forschungsaufgabe darstellen, um eine Kreislaufführung des entwickelten Produktes zu stärken. Die grundlegende Machbarkeit der Verwendung von PB-Brechsand als Substitut in gipsgebundenen Bauplatten konnte bereits in diesem Projekt nachgewiesen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Die Bundesregierung, Pressemitteilung: Abschied von der Kohleverstromung, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/kohleausstiegsgesetz-1716678>, zuletzt abgerufen am: 22.11.2023
- [2] DERA Rohstoffinformationen, Abschlussbericht Dialogplattform Recyclingrohstoffe, Steckbrief Gips, S.160, https://www.recyclingrohstoffe-dialog.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-58.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt abgerufen am: 23.11.2023
- [3] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Rohstoffkonferenz 2022 Rohstoffversorgung Deutschland, https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Veranstaltungen/Rohstoffkonferenz_2022_Rohstoffversorgung_Deutschlands/Ruff.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt abgerufen am: 27.11.2023
- [4] Steins, J. et al. (2021): Altporenbeton aus dem Abbruch und Rückbau in Deutschland bis 2050 – eine Vorhersage. Mauerwerk 25, Heft 4, 2021, S. 145-150
- [5] Kreft, O. (2016): Geschlossener Recyclingkreislauf für Porenbeton, Mauerwerk 20 (2016), Heft 3, S. 183-190
- [6] Fenyvesi, O., Jankus, B. (2015): Opportunities in recycling AAC waste as aggregate for lightweight concrete; Journal of silicate Based and Composite Materials, 2015/2, Vol. 67, No. 2, pp. 66-70
- [7] Bergmann, J., Nielsen, P., Snellings, R., Broos, K. (2016): Recycling of autoclaved aerated concrete in floor screeds: Sulfate leaching reduction by ettringite formation; Construction and Building Materials 111 (2016), pp. 9-14
- [8] Bundesverband Porenbetonindustrie e. V. (2018): Porenbeton-Handbuch, 7. Auflage, Dezember 2018
- [9] <https://32ograd.de/2020/04/02/wie-porenbeton-im-kreislauf-gehalten-werden-kann/>; Interview mit Dr. Kreft, zuletzt abgerufen am: 23.11.2023
- [10] Hlawatsch, F. et al. (2022) Der Wertstoff Porenbeton-Bruch - Vorschlag für eine umfassende Verwertungsstrategie. Vorträge-Konferenzband zur 16. Recy & DepoTech-Konferenz, Leoben, S. 687-692
- [11] Hlawatsch, F., Aycil, H., Kropp, J. (2019) Neue Recyclingbaustoffe auf Porenbetonbruch: In Werk trockenmörteln für Mauerwerk, in Mauersteinen und in leichten Schaumsteinen. Mauerwerk 23, Heft 6, 2019, S. 364-377
- [12] Hochschule Nordhausen, Thüringer Innovationszentrum für Wertstoffe, Forschung: <https://www.hs-nordhausen.de/forschung/thiwert/forschungsprojekte/>, zuletzt abgerufen am: 23.11.2023
- [13] REWIMET-SYMPOSIUM 2021 Ressourcenmanagement, Gipsrecycling – Forschungsfeld am Thüringer Innovationszentrum für Wertstoffe: https://www.rewimet.de/images/downloads/symposium2021_ruff.pdf, zuletzt abgerufen am: 30.11.2023
- [14] Bundesverband der Gipsindustrie e.V., GIPS-Datenbuch: https://www.gips.de/fileadmin/user_upload/download/publikationen/buecher/gipsdatenbuch_2013.pdf, zuletzt abgerufen am: 30.11.2023
- [15] DIN EN 933-1:2012-03 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren (EN 933-1:2012). Beuth, Berlin.
- [16] DIN EN 1097-3:1998-06 Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 3: Bestimmung von Schüttdichte und Hohlraumgehalt (EN 1097-3:1998). Beuth, Berlin.
- [17] DIN EN 1097-6:2013-09 Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme (EN 1097-6:2013). Beuth, Berlin.
- [18] Aycil, H.; Hlawatsch, F.; Kropp, J. (2015) Bestimmung der Kernfeuchte wassergesättigter Bauschuttzyklate anhand des Trocknungsverhaltens. Beton, 3/2015, S. 88-93

-
- [19] DIN EN 196-2:2013-10 Prüfverfahren für Zement – Teil 2: Chemische Analyse von Zement (EN 196-1:2016). Beuth, Berlin.
- [20] DIN 5033-9:2018-04 Farbmessung – Teil 9: Weißstandard zur Kalibrierung in Farbmessung und Photometrie. Beuth, Berlin.
- [21] DIN EN 196-1:2016-11 Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit (EN 196-1:2016). Beuth, Berlin.
- [22] DIN EN 13279-2:2014-03 Gipsbinder und Gips-Trockenmörtel – Teil 2: Prüfverfahren (EN 13279-2:2014). Beuth, Berlin.
- [23] DIN EN 520:2009-12 Gipsplatten – Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren (EN 520:2004+A1:2009). Beuth, Berlin.
- [24] DIN 18180:2014-09 Gipsplatten – Arten und Anforderungen. Beuth, Berlin.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Historische und zukünftige Gipsbereitstellung	8
Abbildung 2: Gipskreislauf	10
Abbildung 3: Arbeits- und Zeitplan des Projektes	14
Abbildung 4: In sechs Big Bags angelieferter Porenbetonabbruch	17
Abbildung 5: Nahaufnahme eines Big Bags mit Porenbetonabbruch	17
Abbildung 6: Exemplarische Porenbeton-Bruchstücke aus Abbruchmaterial	18
Abbildung 7: Stiftmühle	19
Abbildung 8: In Metallschalen gefüllter RC-Gips im Trockenschrank	19
Abbildung 9: Bestimmung des Kristallwassergehaltes vom RC-Gips	20
Abbildung 10: Kristallwassergehalt einer Teilmenge des RC-Gipses im Laufe des Kalzinierungsprozesses	20
Abbildung 11: Korngrößenverteilung des Stuckgipses mittels Lasergranulometrie	21
Abbildung 12: Korngrößenverteilung des RC-Gipses mittels Lasergranulometrie	21
Abbildung 13: Vorzerkleinerung des grobstückigen Porenbetonabbruchs im Einwellenzerkleinerer	22
Abbildung 14: Grobes Porenbetongranulat aus Abbruchmaterial (PBG-A _{grob}) nach dem ersten Brechvorgang	22
Abbildung 15: Zweiter Schritt der Aufbereitung im Backenbrecher	23
Abbildung 16: Feines Porenbetongranulat (PBG-A _{fein}) nach dem zweiten Brechvorgang	23
Abbildung 17: Sieblinien der Porenbetongranulate	24
Abbildung 18: Proben für die Bestimmung des Weißgrades	27
Abbildung 19: Bestimmung des Weißgrades mit dem Spektralphotometer	28
Abbildung 20: Trockenrohdichte und Festigkeiten der Gipsleime in Abhängigkeit vom R-Wert	31
Abbildung 21: Ausbreitmaß von PBGM mit trockenem und vorgehängtem PBG	34
Abbildung 22: Festigkeiten von PBGM und des Referenz-Gipsleims sowie Biegezugfestigkeit des Gipskerns einer handelsüblichen Gipskartonplatte in Abhängigkeit der Trockenrohdichte	36
Abbildung 23: Sieblinien von grobem PBG-A vor und nach dem Mischen/Waschen sowie Sieblinie des feinen PBG-A	38
Abbildung 24: Versteifungsbeginn von PBGM mit 40 Ma.-% PBG unter Verwendung von zwei Verzögerern mit variierender Dosierung	41
Abbildung 25: Festmörteleigenschaften von PBGM mit 25 und 40 Ma.-% PBG und dem Verzögerer VZ1 in Abhängigkeit der Zugabe eines Luftporenbildners	44
Abbildung 26: R-Wert und Festigkeiten von PBGM mit 40 Ma.-% PBG und VZ1 in Abhängigkeit der Zugabe eines Fließmittels	46
Abbildung 27: R-Wert und Festigkeiten von PBGM mit 40 Ma.-% PBG, VZ1 und LP in Abhängigkeit der Zugabe eines Fließmittels	48
Abbildung 28: Biegezugfestigkeit der Gipsleime sowie PBGM mit RC-Gips und Stuckgips	50
Abbildung 29: Druckfestigkeit der Gipsleime sowie PBGM mit RC-Gips und Stuckgips	51

Abbildung 30: Sieblinie des Granulats aus Plattenbruch (GPB) im Vergleich zum feinen Porenbetongranulat aus Abbruchmaterial (PBG-A _{fein})	53
Abbildung 31: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Übersichtsaufnahme; Beleuchtung: Polarisation parallel; Objektiv 2,5x	55
Abbildung 32: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Übersichtsaufnahme; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 2,5x; helle Granulate: kalkreich, dunkle Granulate: kalkarm	55
Abbildung 33: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 31/32; Beleuchtung: Polarisation parallel; Objektiv 10x	56
Abbildung 34: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 31/32; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 10x; helles Granulat: kalkreich, dunkle Granulate: kalkarm	56
Abbildung 35: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 33/34; Beleuchtung: Polarisation parallel; Objektiv 20x	57
Abbildung 36: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 33/34; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 20x; helles Granulat: kalkreich, dunkle Granulate: kalkarm	57
Abbildung 37: Dünnschliff aus einer Probeplatte der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Übersichtsaufnahme; Beleuchtung: Polarisation parallel; Objektiv 2,5x	58
Abbildung 38: Dünnschliff aus einer Probeplatte der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Übersichtsaufnahme; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 2,5x	58
Abbildung 39: Dünnschliff aus einer Probeplatte der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 37/38; Beleuchtung: Polarisation parallel; Objektiv 10x	59
Abbildung 40: Dünnschliff aus einer Probeplatte der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 37/38; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 10x	59
Abbildung 41: Dünnschliff aus einer Probeplatte der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 39/40; Beleuchtung: Polarisation parallel; Objektiv 20x	60
Abbildung 42: Dünnschliff aus einer Probeplatte der Rezeptur Nr. 12; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 39/40; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 20x; helles Granulat: kalkreich, dunkles Granulat: kalkarm, Anhydritpartikel oben links	60
Abbildung 43: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 25; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Übersichtsaufnahme; Beleuchtung: Polarisation parallel; Objektiv 2,5x	61
Abbildung 44: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 25; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Übersichtsaufnahme; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 2,5x	61
Abbildung 45: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 25; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 43/44; Beleuchtung: Polarisation parallel; Objektiv 10x	62
Abbildung 46: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 25; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 43/44; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 10x	62
Abbildung 47: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 25; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 45/46; Beleuchtung: Polarisation parallel; Objektiv 20x	63
Abbildung 48: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 25; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 45/46; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 20x	63

Abbildung 49: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 40; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Übersichtsaufnahme; Beleuchtung: Polarisation parallel; Objektiv 2,5x; zahlreiche Luftporen	64
Abbildung 50: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 40; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Übersichtsaufnahme; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 2,5x; zahlreiche Luftporen	64
Abbildung 51: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 40; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 49/50; Beleuchtung: Polarisation parallel; Objektiv 10x	65
Abbildung 52: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 40; Porenbetongranulate eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 49/50; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 10x	65
Abbildung 53: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 40; Porenbetongranulat eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 51/52; Beleuchtung: Polarisation parallel; Objektiv 20x	66
Abbildung 54: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 40; Porenbetongranulat eingebettet in einer Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 51/52; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 20x	66
Abbildung 55: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 42; Porenbetongranulate eingebettet in einer RC-Gipsmatrix; Übersichtsaufnahme; Beleuchtung: Polarisation parallel; Objektiv 2,5x	67
Abbildung 56: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 42; Porenbetongranulate eingebettet in einer RC-Gipsmatrix; Übersichtsaufnahme; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 2,5x	67
Abbildung 57: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 42; Porenbetongranulate eingebettet in einer RC-Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 55/56; Beleuchtung: Polarisation parallel; Objektiv 10x	68
Abbildung 58: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 42; Porenbetongranulate eingebettet in einer RC-Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 55/56; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 10x	68
Abbildung 59: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 42; Porenbetongranulat eingebettet in einer RC-Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 57/58; Beleuchtung: Polarisation parallel; Objektiv 20x	69
Abbildung 60: Dünnschliff aus einem Prisma der Rezeptur Nr. 42; Porenbetongranulat eingebettet in einer RC-Gipsmatrix; Detail aus Abbildungen 57/58; Beleuchtung: Polarisation gekreuzt; Objektiv 20x	69
Abbildung 61: Längenänderung von Prismen ausgewählter Rezepturen bei wechselnden klimatischen Bedingungen	70
Abbildung 62: Feuchtegehalt von Prismen ausgewählter Rezepturen bei wechselnden klimatischen Bedingungen	71
Abbildung 63: Holzschalung zur Herstellung von Laborplatten mit den Abmessungen von 300 mm x 400 mm x 12 mm (links: mit einem Trennmittel bestrichene Schalung; rechts: mit PBGM gefüllte Schalung)	73
Abbildung 64: Hergestellte Labor-Probenplatten	74
Abbildung 65: Frisch in die Schalung gefüllter PBGM (links) und ausgeschaltete Demonstratorplatte (rechts)	77
Abbildung 66: Zuschneiden der Demonstratorplatten mit dem Cuttermesser (links) und angefasten Plattenstößen (rechts)	78
Abbildung 67: Verschraubung einer Platte aus PBGM an einer Unterkonstruktion	78
Abbildung 68: Unterkonstruktion Demonstrator	79
Abbildung 69: Montageplan Demonstrator	80
Abbildung 70: Gesamtansicht des Demonstrators (links: Vorderseite; rechts: Rückseite)	80
Abbildung 71: Industriell gefertigte Gipsfaserplatten; von oben nach unten: Platte mit 40 Ma.-% PBG und RC-Gips, Platte mit 25 Ma.-% PBG und Stuckgips, Standardplatte ohne PBG	82
Abbildung 72: Industriell gefertigte Gipsfaserplatten; Nahaufnahme der Platten aus Abbildung 71	82

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Meilensteine	15
Tabelle 2: Schüttdichten der Porenbetongranulate aus Abbruchmaterial und Neuware	25
Tabelle 3: Wasseraufnahme und Rohdichten der feinen Porenbetongranulate aus Abbruchmaterial und Neuware	25
Tabelle 4: Sulfatgehalt der feinen Porenbetongranulate aus Abbruchmaterial und Neuware	26
Tabelle 5: Weißgrad von Stuckgips (Referenz und Versuch), PBG-A _{fein} , GPB, RC-Gips und PBG-A _{grob}	27
Tabelle 6: Rezepturen der Gipsleime	30
Tabelle 7: Frischleimeigenschaften der Gipsleime	30
Tabelle 8: Festleimeigenschaften der Gipsleime	30
Tabelle 9: Rezepturen von Porenbeton-Gipsmörteln (PBGM) mit 25, 50 und 75 Ma.-% PBG, trocken und vorgehäst	32
Tabelle 10: Frischmörteleigenschaften von PBGM mit 25, 50 und 75 Ma.-% PBG, trocken und vorgehäst	32
Tabelle 11: Festmörteleigenschaften von PBGM mit 25, 50 und 75 Ma.-% PBG, trocken und vorgehäst	33
Tabelle 12: Rezepturen von PBGM mit 30 - 45 Ma.-% PBG	34
Tabelle 13: Frischmörteleigenschaften von PBGM mit 30 - 45 Ma.-% PBG	35
Tabelle 14: Festmörteleigenschaften von PBGM mit 30 - 45 Ma.-% PBG	35
Tabelle 15: Rezepturen von PBGM mit unterschiedlichen Porenbetongranulaten	37
Tabelle 16: Frischmörteleigenschaften von PBGM mit unterschiedlichen Porenbetongranulaten	37
Tabelle 17: Festmörteleigenschaften von PBGM mit unterschiedlichen Porenbetongranulaten	38
Tabelle 18: Rezepturen von PBGM mit VZ1 und VZ2	39
Tabelle 19: Frischmörteleigenschaften von PBGM mit VZ1 und VZ2	40
Tabelle 20: Festmörteleigenschaften von PBGM mit VZ1 und VZ2	41
Tabelle 21: Rezepturen von PBGM mit VZ1 und LP	42
Tabelle 22: Frischmörteleigenschaften von PBGM mit VZ1 und LP	43
Tabelle 23: Festmörteleigenschaften von PBGM mit VZ1 und LP	43
Tabelle 24: Rezepturen von PBGM mit VZ1 und FM	45
Tabelle 25: Frischmörteleigenschaften von PBGM mit VZ1 und FM	45
Tabelle 26: Festmörteleigenschaften von PBGM mit Verzögerer VZ1 und FM	45
Tabelle 27: Rezepturen PBGM mit VZ1, LP und FM	47
Tabelle 28: Frischmörteleigenschaften PBGM mit VZ1, LP und FM	47
Tabelle 29: Festmörteleigenschaften PBGM mit VZ1, LP und FM	47
Tabelle 30: Rezepturen des Gipsleims und der PBGM mit RC-Gips im Vergleich zu den Rezepturen mit Stuckgips	49
Tabelle 31: Frischleim-/Frischmörteleigenschaften der Rezepturen mit RC-Gips im Vergleich zu den Rezepturen mit Stuckgips	49

Tabelle 32: Festleim-/Festmörteleigenschaften der Rezepturen mit RC-Gips im Vergleich zu den Rezepturen mit Stuckgips	50
Tabelle 33: Rezepturen der PBGM mit Anteilen von Granulat aus Plattenbruch (GPB)	52
Tabelle 34: Frischmörteleigenschaften der PBGM mit Anteilen von GPB	52
Tabelle 35: Festmörteleigenschaften der PBGM mit Anteilen von GPB	53
Tabelle 36: Rezepturparameter der für die mikroskopischen Untersuchungen ausgewählten Proben	54
Tabelle 37: Festmörteleigenschaften der Labor-Probeplatten	74
Tabelle 38: Parameter der für die Demonstratorplattenherstellung ausgewählten Rezepturen	76
Tabelle 39: Herstellung der Demonstratorplatten - Eignung der ausgesuchten Rezepturen für die jeweiligen Prozessschritte (Legende: dunkelgrün = geeignet; hellgrün = geeignet mit Einschränkungen; orange = bedingt geeignet; rot = nicht geeignet)	77
Tabelle 40: Eigenschaften der industriell hergestellten Bodenplatten	83

Abkürzungsverzeichnis

AAC:	autoclaved aerated concrete
C&D wastes:	construction and demolition wastes
REA-Gips:	Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen
Leibniz-IWT:	Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien - IWT
HSN/ThiWert:	Hochschule Nordhausen/Thüringer Innovationszentrum für Werkstoffe
PB:	Porenbeton
PBG:	Porenbetongranulat
PBG-A:	Porenbetongranulat aus Abbruchmaterial
PBG-N:	Porenbetongranulat aus Neuware
GPB:	Granulat aus Plattenbruch
PBGM:	Porenbeton-Gipsmörtel
R-Wert:	Wassergipswert
Wasser _{ges.} :	Gesamtwassermenge
Wasser _{frei} :	freie Wassermenge (Gesamtwassermenge abzüglich der Wasseraufnahme des PBG nach 10 min)
VZ:	Verzögerer
LP:	Luftporenbildner
FM:	Fließmittel
RC-Gips:	Recyclinggips
TMM:	Trockenmörtelmasse
BMM:	Bindemittelmasse