

Einfluss der hydrothermalen Härtungsdauer auf die Eigenschaften des leichten Schaumsteins aus groben Porenbetonrezyklaten

Masterarbeit

Eingereicht von: Julian Rojem
Matrikelnummer: 4330204

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
Fachgebiet Baustoffe
Technische Universität Braunschweig

Erstprüfer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Lowke
Zweitprüfer: Dr.-Ing. H.-W. Krauss
Betreuer: Dr.-Ing. Thorsten Leusmann

Braunschweig, Februar 2019

Danksagung

Zum Gelingen dieser Arbeit haben fachlich und persönlich einige Personen beigetragen, denen ich an dieser Stelle danken möchte.

Zunächst danke ich Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Lowke und Dr.-Ing. Hans-Werner Krauss für die Begutachtung meiner Arbeit sowie Dr.-Ing. Thorsten Leusmann für die gute universitätsseitige Betreuung.

Außerdem möchte ich mich bei Maike Peters und Frank Hlawatsch von der MPA Bremen für die Bereitstellung dieses spannenden Forschungsthemas bedanken. Beide haben mich darüber hinaus umfassend und sehr nett betreut und standen jederzeit für fachliche und organisatorische Fragen zur Verfügung.

Ein großer Dank gilt außerdem Sophie Bauer, die mich sowohl bei der Herstellung als auch bei der Prüfung der Schaumsteinproben großartig unterstützt hat. Insgesamt möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für den sehr freundlichen Umgang während der schönen und spannenden Zeit in der MPA Bremen bedanken.

Auch Dr. Bernd Schulte von der Firma Wehrhahn GmbH spreche ich für die mehrmalige, sehr aufwändige Bereitstellung des Autoklavs für die Härtung der eigenen Proben meinen Dank aus.

Des Weiteren danke ich Ricarda Küstermann vom IWT Bremen für das informative Gespräch über das Forschungsprojekt des leichten Schaumsteins.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern, meinen Schwiegereltern und an erster Stelle meiner Frau Theresa für ihre große Unterstützung, ihre offenen Ohren und ihre Ermutigung während meines gesamten Studiums herzlichst bedanken. Auch meiner Tochter Runa danke ich für schöne und kraftgebende Auszeiten.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	IV
1 Einleitung.....	1
2 Der Baustoff Porenbeton.....	3
2.1 Historischer Kontext	3
2.2 Herstellung	4
2.3 Chemische Reaktionen während der Herstellung	5
2.4 Einsatzmöglichkeiten	7
2.5 Entsorgungswege	8
3 Forschung zum Porenbetonrecycling.....	9
3.1 Recyclingansätze aus der Literatur	10
3.1.1 Rücknahme durch Porenbetonhersteller	10
3.1.2 Sonstige Recyclingansätze	11
3.2 Forschung der MPA Bremen	12
3.2.1 Methanox	12
3.2.2 PB-Mörtel und Leichtstein.....	12
3.2.3 Leichter Schaumstein	14
4 Ziel dieser Arbeit.....	22
5 Versuchsprogramm	25
5.1 Probenherstellung.....	27
5.2 Probenaufbereitung	33
5.3 Prüfung der Feststoffeigenschaften.....	35
6 Ergebnisse und Diskussion.....	37
6.1 Frischmörteleigenschaften	37
6.2 Optische Eindrücke der autoklavierten Schaumsteine	39
6.3 Trockenrohdichte und Druckfestigkeit	42
6.3.1 Einfluss der Autoklavtechnik.....	42
6.3.2 Einfluss der Schaummörtelinjektion.....	43
6.3.3 Einfluss der Granulate.....	48
6.3.4 Einfluss des Schaumgehalts	49
6.3.5 Einfluss der Härtungsdauer.....	50

6.4	Elastizitätsmodul	51
6.5	Wärmeleitfähigkeit.....	52
6.6	Ergebnisse aus der Lichtmikroskopie	55
6.7	Schlussfolgerungen	59
6.7.1	Autoklavtechnik und Härtungsdauer	60
6.7.2	Schaumgehalt des Frischmörtels.....	60
6.7.3	Grad der Aufbereitung der Granulate	61
7	Zusammenfassung.....	62
8	Ausblick	66
	Literaturverzeichnis.....	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Typische Porenbetonrezeptur (in M-% der Feststoffe).....	4
Tabelle 2:	Eigenschaften von PORIT-Porenbetonplansteinen.....	8
Tabelle 3:	Rezepturen der drei Bindemittelvarianten und jeweilige Einbindung des Schaummörtels in ein RC-Haufwerk	19
Tabelle 4:	Feststoffeigenschaften der Schaummörtel und der Schaumsteine der drei Bindemittelvarianten	21
Tabelle 5:	Daten zu den Härtungskurven aus Abbildung 18	25
Tabelle 6:	Versuchsprogramm	26
Tabelle 7:	Frischmörteleigenschaften	38
Tabelle 8:	Rohdichten und Festigkeiten von labor- und industrieautoklavierten Proben	42
Tabelle 9:	Rohdichten und Festigkeiten bei unterschiedlichen Härtungsdauern und Schaumgehalten	44
Tabelle 10:	Rohdichten und Festigkeiten der Balken aus folgenden Abbildungen	47
Tabelle 11:	Elastizitätsmoduln bei unterschiedlichen Härtungsdauern und Schaumgehalten .	51
Tabelle 12:	Wärmeleitfähigkeiten bei unterschiedlichen Härtungsdauern und Schaumgehalten	53
Tabelle 13:	Festigkeitssteigerung durch die industrielle Autoklavierung.....	64

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Produktionstechnik für Porenbeton.....	5
Abbildung 2: Fünf Stadien der Hydratation von Portlandzement bzw. C_3S	6
Abbildung 3: Porenbetonrezyklat: Korngruppe 0/2 (links) und 2/8 mm (rechts).....	13
Abbildung 4: PB-Mörtel als Werk trockenmörtel.....	14
Abbildung 5: Leichtstein.....	14
Abbildung 6: PB-Granulat (links) und RC-Granulat (rechts).....	15
Abbildung 7: Eine Auswahl an Fremdstoffen aus dem RC-Material.....	15
Abbildung 8: Bindemittelleim (ohne Schaum).....	16
Abbildung 9: Schaumzugabe.....	16
Abbildung 10: Unterheben des Schaums.....	16
Abbildung 11: Fertiger Schaummörtel.....	16
Abbildung 12: Haufwerksschüttungen von PB-Granulaten (links) und RC-Granulaten (rechts).....	17
Abbildung 13: Lichtmikroskopische Aufnahme einer Verbundzone des Schaumsteins.....	17
Abbildung 14: Injektion des gepumpten Schaummörtels.....	18
Abbildung 15: Mörtelaustritt nach Injektionsdurchlauf.....	18
Abbildung 16: Frischinjizierter Schaumstein.....	18
Abbildung 17: Ausgeschalter und ausgehärteter Schaumstein.....	18
Abbildung 18: Zwei Härtingkurven des Autoklavs.....	24
Abbildung 19: Autoklav der Firma Wehrhahn GmbH.....	27
Abbildung 20: Vorgenässte Porenbetongranulate.....	28
Abbildung 21: Mit Granulaten befüllte Balkenschalungen.....	28
Abbildung 22: Verschlussene Schalungen vor der Schaummörtelinjektion.....	28
Abbildung 23: Mischen des Bindemittelleims.....	29
Abbildung 24: Herstellen des Schaummörtels.....	29
Abbildung 25: Bestimmung der Rohdichte.....	30
Abbildung 26: Bestimmung der Konsistenz (Auslauftrichter Versuch).....	30
Abbildung 27: Gießen einer Schaummörtelprobe.....	31
Abbildung 28: Schaummörtelinjektion.....	31
Abbildung 29: Schaummörtelproben (oben links) und injizierte Schaumsteine.....	31
Abbildung 30: Einsetzen der Proben in den Autoklav.....	32
Abbildung 31: Autoklavierte Schaumsteine (PB-Variante links, RC-Variante rechts).....	33
Abbildung 32: Mit Gips abgegliche Prisma (für die E-Modul-Bestimmung).....	33
Abbildung 33: Zusammensetzen von Proben für die Wärmeleitfähigkeitsprüfung.....	34
Abbildung 34: Druckfestigkeitsprüfung.....	36
Abbildung 35: Prüfung des Elastizitätsmoduls.....	36
Abbildung 36: Zweiplattengerät zur Prüfung der Wärmeleitfähigkeit.....	36
Abbildung 37: Verschmutzungen von Schaumsteinbalken mit RC-Granulaten.....	39
Abbildung 38: Schnitt eines Schaumsteins mit PB-Granulaten (20er-Würfel).....	40
Abbildung 39: Schnitt eines Schaumsteins mit RC-Granulaten (20er-Würfel).....	41
Abbildung 40: Schnitt einer Schaummörtelprobe (10er-Würfel).....	41

Abbildung 41: Rohdichte- und Festigkeitsgefälle der Schaumsteinbalken (PB-Granulate) in Richtung Austrittsende des Injektionsschaummörtels.....	45
Abbildung 42: Rohdichte- und Festigkeitsgefälle der Schaumsteinbalken (RC-Granulate) in Richtung Austrittsende des Injektionsschaummörtels.....	46
Abbildung 43: Schnitt des Balkens Nr. 1 (1:1_PB_A+)	47
Abbildung 44: Schnitt des Balkens Nr. 2 (1:1_PB_A+)	47
Abbildung 45: Schnitt des Balkens Nr. 3 (1:1_PB_A+)	47
Abbildung 46: Vergleich der Rohdichte und Festigkeit zwischen Schaumsteinen aus PB- und RC-Granulaten und Schaummörtelproben	48
Abbildung 47: Vergleich der Rohdichte und Festigkeit zwischen den beiden Schaumgehalten (1:1 und 1:1,5).....	50
Abbildung 48: Vergleich der Rohdichte und Festigkeit zwischen den beiden Härtungsdauern (A und A+).....	51
Abbildung 49: Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit der Rohdichte von Schaumsteinen aus PB- und RC-Granulaten und Schaummörtelproben	54
Abbildung 50: Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit der Rohdichte und bei unterschiedlichen Härtungsdauern der Proben	55
Abbildung 51: Lichtmikroskopie eines Granulats im Schaumstein.....	55
Abbildung 52: Lichtmikroskopie der Schaumsteinmatrix	55
Abbildung 53: Gut ausgebildete Verbundzone zwischen Granulat (links) und Matrix (rechts)	57
Abbildung 54: Schlecht ausgebildete Verbundzone zwischen Granulat (links) und Matrix (rechts)	57
Abbildung 55: Schaumsteinmatrix mit normalem Schaumgehalt (1:1).....	58
Abbildung 56: Schaumsteinmatrix mit erhöhtem Schaumgehalt (1:1,5).....	58
Abbildung 57: Matrixgefüge eines laborautoklavierten Schaumsteins.....	58
Abbildung 58: Matrixgefüge eines industriell autoklavierten Schaumsteins (A).....	59
Abbildung 59: Matrixgefüge eines industriell autoklavierten Schaumsteins mit verlängerter Härtungsdauer (A+).....	59

1 Einleitung

Nicht zuletzt im Bausektor stellt das Konstrukt der Nachhaltigkeit bei der Planung und Umsetzung von Projekten und Maßnahmen einen sinnvollen Leitfaden dar. Eine nachhaltige Entwicklung bringt dabei die drei Aspekte Ökonomie, Ökologie und Soziales in Einklang; „Maßnahmen/Projekte sollen also so geplant und realisiert werden, dass sie eine wirtschaftliche Entwicklung ermöglichen, dabei sozial verträglich sind und die Umwelt nicht schädigen.“ [Schröter (2014), S. 9] Soziale Aspekte werden beim Bauen zunehmend durch Öffentlichkeitsarbeit berücksichtigt, während ökonomische Faktoren ohnehin eine hohe Relevanz haben. In den letzten Jahren entstand zunehmend der Wille, auch der Ökologie Rechnung zu tragen. Für den Bereich der Rohstoffgewinnung wurden zahlreiche politische Ziele zur umweltfreundlichen Ressourcenschonung geäußert bzw. in rechtliche Regelungen wie z. B. der Abfallrahmenrichtlinie der EU umgesetzt [vgl. Bahn-Walkowiak/Steger (2013), S. 33 ff.].

Um ressourcenschonend zu bauen, stellt neben der Langlebigkeit von Bauwerken die Verwendung von Sekundärrohstoffen ein wichtiges Ziel dar; dies schließt v. a. ein Recycling abgebrochener Baumaterialien ein. Einen großen Anteil des Abbruchmaterials bilden mineralische Baustoffe wie Beton, der aktuell eine Wiederverwertung in großen Mengen im Erdbau, im Straßenbau oder als rezyklierte Gesteinskörnung in der Betonherstellung erfährt [vgl. Müller (2018), S. 205 ff.]. Für den Baustoff Porenbeton sind diese Verwertungswege wegen einer geringen Festigkeit, einer fehlenden Frostbeständigkeit durch hohe Wasseraufnahme und einer Auslaugbarkeit von Sulfaten jedoch nahezu ausgeschlossen [vgl. Müller (2018), S. 258]. Infolgedessen wird Porenbetonbruch meist einer Deponierung zugeführt, die jedoch nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) die letzte Option der Abfallbewirtschaftung darstellen sollte [vgl. KrWG, § 6].

Aus dieser Motivation heraus wurde an der *Amtlichen Materialprüfanstalt der Freien Hansestadt Bremen* (kurz *MPA Bremen*) als Geschäftsbereich des *Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien (IWT)* intensive Forschung zum Recycling von Porenbeton betrieben. In bereits abgeschlossenen Forschungsvorhaben wurden dabei zwei Recyclingbaustoffe aus feinem Porenbetonbruch der Korngruppe 0/8 mm entwickelt [vgl. Hlawatsch/Aycil/Kropp (2016), S. 439 ff.]. Das aktuell laufende Forschungsprojekt „Leichter Schaumstein aus groben Porenbetongranulaten“ [vgl. MPA Bremen (2019)] beinhaltet nun eine Verwertung von groben Porenbetonrezyklaten (≥ 8 mm). Diese werden als Haufwerksschüttung in eine Schalung eingebracht und anschließend durch einen injizierten Schaummörtel in eine Matrix eingebunden. In der vielversprechendsten von drei untersuchten Bindemittelvarianten wird hierfür ein porenbetonähnlicher Mörtel verwendet; in dieser Variante härtet der Schaumstein außerdem nach dem Vorbild der Porenbetonherstellung in einem Autoklav aus.

Im Zuge der aktuellen Forschung am leichten Schaumstein wird ein Festigkeitspotential der porenbetonähnlichen Matrix vermutet, welches nun in der vorliegenden Arbeit untersucht wird. Hierfür werden eigene Proben hergestellt, die im Gegensatz zu bisherigen Schaumsteinen in einem industrieähnlichen Autoklav gehärtet werden, um bei besseren Härtungsbedingungen bereits eine mögliche Festigkeitssteigerung zu erzielen. Diese Autoklavhärtung wird des Weiteren in ihrer Dauer variiert, um den Einfluss der hydrothermalen Härtungsdauer auf die

Eigenschaften des leichten Schaumsteins zu analysieren. Neben dieser Kernfragestellung wird außerdem der Schaumgehalt des Frischmörtels variiert, um ein weiteres mögliches Optimierungspotential des Schaumsteins hervorzurufen. Darüber hinaus werden sowohl reine Porenbetongranulate als auch verunreinigte, rezyklierte Granulate aus dem Abbruch für die Herstellung des Schaumsteins verwendet, um den nötigen Grad der Aufbereitung zu untersuchen. Für eine bessere Interpretation der Ergebnisse wird außerdem der nicht injizierte, reine Schaummörtel an gesondert hergestellten Proben untersucht.

Die Parameter Härtungsdauer, Schaumgehalt und Art der Granulate werden bei den herzustellenden Proben systematisch variiert, um die jeweilige Auswirkung auf die Eigenschaften des Schaumsteins zu untersuchen. Als relevante Eigenschaften werden hierbei die Trockenrohichte, die Druckfestigkeit, der Elastizitätsmodul und die Wärmeleitfähigkeit geprüft. Außerdem wird eine Lichtmikroskopie für eine Untersuchung des Gefüges an ausgewählten Schaumsteinproben durchgeführt. Des Weiteren sind auch die Schaummörtelrohichte und -konsistenz während verschiedener Phasen der Herstellung aufschlussgebend.

Im Verlauf der vorliegenden Arbeit wird zunächst der Baustoff Porenbeton vorgestellt. Dabei wird die Herstellung inkl. der chemischen Härtungsreaktionen im Autoklav, der Einsatz während der primären Nutzung und die gegenwärtige Situation der Entsorgung erläutert. Im nächsten Kapitel wird dann die Relevanz eines Porenbetonrecyclings hergeleitet, bevor verschiedene Ansätze einer Wiederverwertung aus der Literatur kurz aufgeführt werden. Die Entwicklungen zum Recycling von Porenbeton münden in den Forschungsvorhaben der MPA Bremen zu diesem Thema. Hierbei werden zunächst zwei abgeschlossene Projekte kurz erläutert, bevor das aktuell laufende Forschungsvorhaben des leichten Schaumsteins ausführlich beschrieben wird.

Im vierten Kapitel wird die zu untersuchende Fragestellung dieser Arbeit aus Ergebnissen der MPA zum Schaumsteinprojekt abgeleitet. Daran anknüpfend werden die im Rahmen des Versuchsprogramms durchzuführende Herstellung der Schaumsteine und Schaummörtelproben inkl. Messung der Frischmörteleigenschaften, die Probenaufbereitung für die Feststoffuntersuchungen sowie die entsprechenden Feststoffprüfungen beschrieben. Die Ergebnisse aus dem Versuchsprogramm werden im sechsten Kapitel aufgeführt und diskutiert. Teil dieses Ergebnisteils sind außerdem Schlussfolgerungen, die die Ergebnisse zusammenfassend und strukturiert darstellen und darüber hinaus Optimierungspotentiale entwickeln. Nach einer Zusammenfassung des gesamten Inhalts dieser Arbeit werden abschließend im Zuge eines Ausblicks die entwickelten Verbesserungs- und Forschungspotentiale des leichten Schaumsteins aufgeführt.

2 Der Baustoff Porenbeton

Im folgenden Kapitel wird der Baustoff Porenbeton umfassend vorgestellt. Nachdem dieser mithilfe des historischen Kontextes zunächst zu anderen Baustoffen abgegrenzt wird, wird die Herstellung von Porenbeton mit besonderem Blick auf die chemischen Reaktionen beschrieben. Außerdem werden Nutzungsmöglichkeiten sowie die aktuelle Situation der Entsorgung aufgezeigt.

2.1 Historischer Kontext

Porenbeton ist ein dampfgehärtetes Gemisch aus Sand, Zement, Kalk, Anhydrit, einem Porosierungsmittel und Wasser. Wie durch die Namensgebung ersichtlich, wird er den (Leicht-) Betonen zugeordnet, obwohl sich Porenbeton von anderen Betonarten grundlegend unterscheidet. Gemeinsamkeiten zu anderen Leichtbetonen bestehen lediglich in der Porosität und anfänglichen Zementklinkerreaktionen.

Größere Ähnlichkeiten des Porenbetons sind dagegen zum Kalksandstein feststellbar. So ist die entscheidende Härtungsreaktion (die Verbindung von gelöster Kieselsäure mit Kalkhydrat) bei beiden Baustoffen identisch. Der Kieselsäurespender Sand des Porenbetons fungiert dabei nicht wie bei sonstigen Betonen als (inert)er Zuschlag, sondern ist in Stoffumwandlungsprozesse bei der Herstellung aktiv eingebunden. Außerdem ist Porenbeton im Gegensatz zu Normalbeton kein an der Atmosphäre aushärtender Baustoff. Lediglich ein Ansteifen und eine leichte Verfestigung finden unter atmosphärischen Bedingungen statt, bevor die eigentliche Aushärtung des Porenbetons wie beim Kalksandstein im Autoklav geschieht. Somit wird Porenbeton ausschließlich im Werk hergestellt. [Vgl. Schober (2005), S. 65 ff.; Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. (2018a), o. S.]

Die Gemeinsamkeiten zum Kalksandstein lassen sich darüber hinaus im historischen Kontext verdeutlichen. Im Jahr 1880 wurde durch ein steifes, im gespannten Wasserdampf gehärtetes Sand-Kalk-Gemisch von Dr. Wilhelm Michaelis ein gemeinsamer Grundstein für die Entwicklung beider Baustoffe gelegt. [Vgl. Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. (2018b), o. S.; Schramm (2008), S. 346] Später wurde im Jahr 1927 von Axel Eriksson zum ersten Mal ein mit modernem Porenbeton vergleichbarer Baustoff entwickelt. Die wesentlichen Zutaten waren hierbei weiterhin Sand, Kalk und Wasser. Durch Beimengung eines Metallpulvers wurde die Porosität hergestellt. Im Jahr 1933 wurde anschließend eine Variante mit Portlandzement statt Kalk entwickelt. [Vgl. Homann (2008), S. 11] In Deutschland wurde dieses porosierte und dampfgehärtete Sand-Kalk/Zement-Gemisch zunächst unter dem Titel „Gasbeton“ bekannt, welcher später in „Porenbeton“ geändert wurde [vgl. Schramm (2008), S. 346]. Durch die Autoklavhärtung besaß Porenbeton eine gesteigerte Festigkeit und ein geringes Schwinden, wodurch er praxistauglich war und sich zu einem begehrten Baustoff entwickelte [vgl. Kristen/Meyer (1953), S. 132 f.].

2.2 Herstellung

Moderner Porenbeton stellt neben seiner Kernkompetenz der geringen Wärmeleitfähigkeit Anforderungen an i. W. Festigkeit, Wasserdampftransport, Trockenschwindung und Schalldämmung. Dies erfordert den Einsatz hochwertiger Rohstoffe. Es werden ein möglichst reiner gemahlener Quarzsand sowie Weißfeinkalk und Portlandzement mit ebenfalls wenig Fremdbestandteilen und gutem Reaktionsvermögen eingesetzt. Außerdem werden Gips oder Anhydrit, Aluminium als Paste oder Pulver und Wasser zur Herstellung des Porenbetons benötigt. Eine typische Rezeptur ist in Tabelle 1 dargestellt. In der realen Produktion werden zudem Verschnitt und andere Reste aus vorheriger Porenbetonherstellung feingemahlen der Rezeptur hinzugefügt. Die Wassermenge liegt zwischen 55 und 75 M.-% der Feststoffe. [Vgl. Homann (2008), S. 14 f.; Schober (2005), S. 64 f.; Karlstetter (2014), S. 17]

Tabelle 1: Typische Porenbetonrezeptur (in M-% der Feststoffe) [vgl. Schober (2005), S. 64]

Quarzsand	66
Weißfeinkalk	12
Portlandzement	18
Gips / Anhydrit	3,9
Aluminiumpulver	0,1

Die Produktionstechnik für Porenbeton ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Alle Ausgangsstoffe werden gemischt, wobei das Porosierungsmittel Aluminium als letztes zugegeben wird. Anschließend wird der Frischmörtel in eine eingeeölte Stahlform gefüllt. In dieses Mörtelbad wird je nach Nutzungsanforderungen ein Bewehrungskorb mit Korrosionsschutz eingetaucht. In der Schalung bläht der Mörtel auf und erreicht zudem seine Grünstandfestigkeit. Nach einer Standzeit von einer bis sechs Stunden kann der noch weiche aber raumbeständige Porenbetonkuchen ausgeschalt, in kleinere Blöcke geschnitten und profiliert werden. Anschließend wird der Porenbeton im Autoklav unter Satttdampfbedingungen bei einer Temperatur zwischen 180 und 200 °C und einem Druck von etwa 11 bar sechs bis zwölf Stunden lang ausgehärtet.

Der Autoklavprozess gliedert sich dabei in die Aufdampfphase, in der eine wasserdampfgesättigte Atmosphäre hergestellt wird sowie Temperatur und Druck allmählich ansteigen, in die Druckhaltezeit, in der der Porenbeton mehrere Stunden lang aushärtet, und den Druckabbau, wo Temperatur und Druck langsam wieder abfallen. Nach der Autoklavhärtung ist der (abgekühlte und getrocknete) Porenbeton einsatzbereit und voll belastbar. [Vgl. Homann (2008), S. 13 ff.; Schober (2005), S. 66; Karlstetter (2014), S. 17]

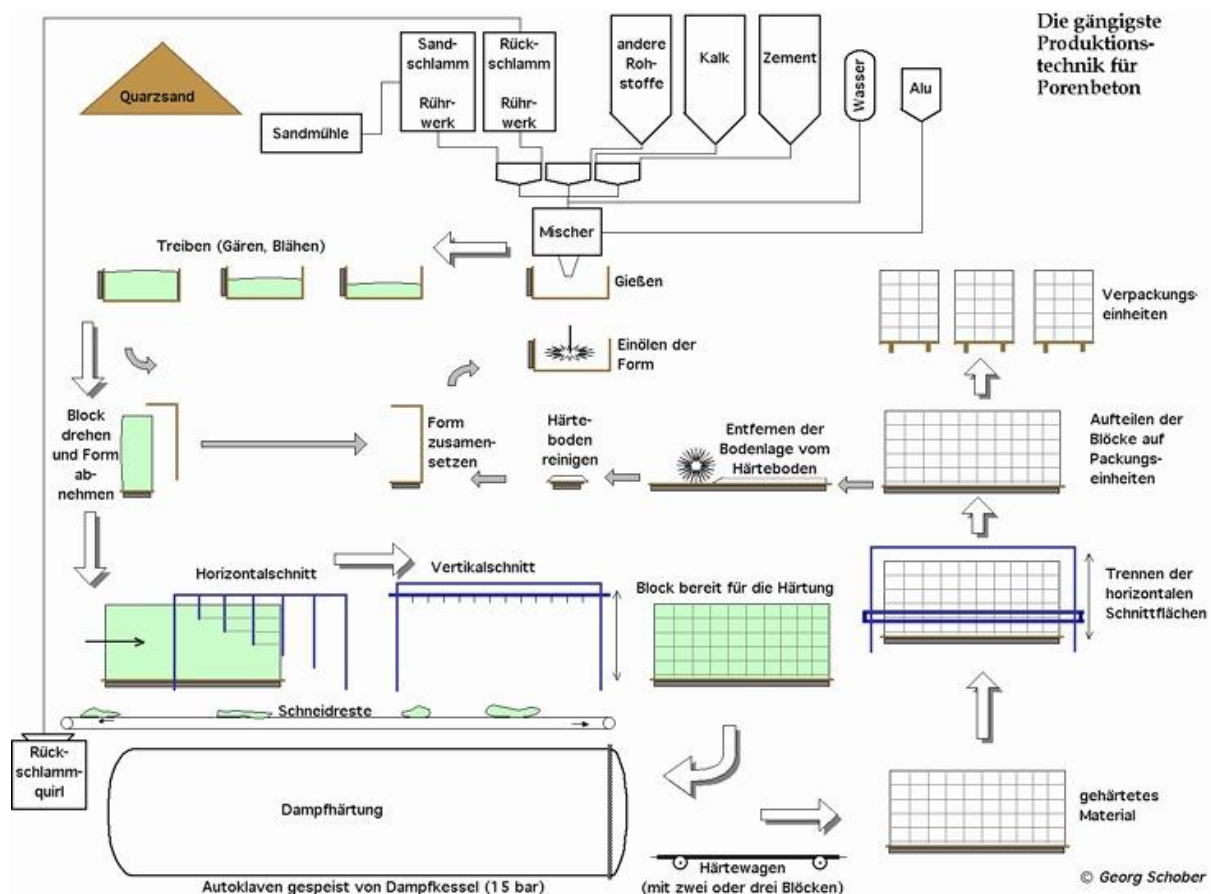
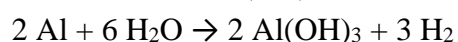
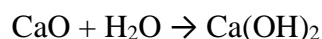


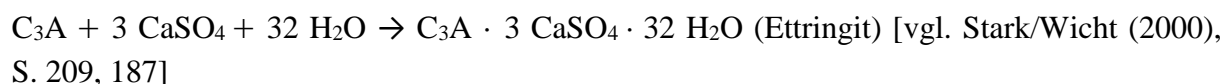
Abbildung 1: Produktionstechnik für Porenbeton [Schober (2012), o. S.]

2.3 Chemische Reaktionen während der Herstellung

Während der Herstellung von Porenbeton finden zahlreiche chemische Reaktionen statt. Nach dem Anmachen der Rohstoffmischung führen zunächst die stark exotherme Reaktion des Kalkablöschens und die Umsetzung des Aluminiums unter Wasserstoffbildung zu einer Temperaturerhöhung der bereits warmen Ausgangsmischung auf etwa 80 °C. Die Aluminiumreaktion lässt den Porenbetonmörtel aufblähen, vergleichbar mit der Wirkung von Backpulver in einem Kuchen. [Vgl. Schober (2005), S. 65 ff.]



Im weiteren Verlauf beginnt der Portlandzement zu reagieren. Die Klinkerreaktionen laufen dabei ähnlich wie bei der Zementerstarrung (s. Darstellung der Wärmeentwicklungsrate in Abbildung 2), jedoch wegen der hohen Temperatur deutlich intensiver ab. [Vgl. Schober (2005), S. 65] Sie werden im Folgenden kurz und vereinfacht dargestellt. In der ersten von fünf Stadien (Induktionsperiode) reagiert das Klinkermineral Tricalciumaluminat (C_3A) mit dem Gips bzw. Anhydrit unter hohem Wasserverbrauch zu Ettringit:



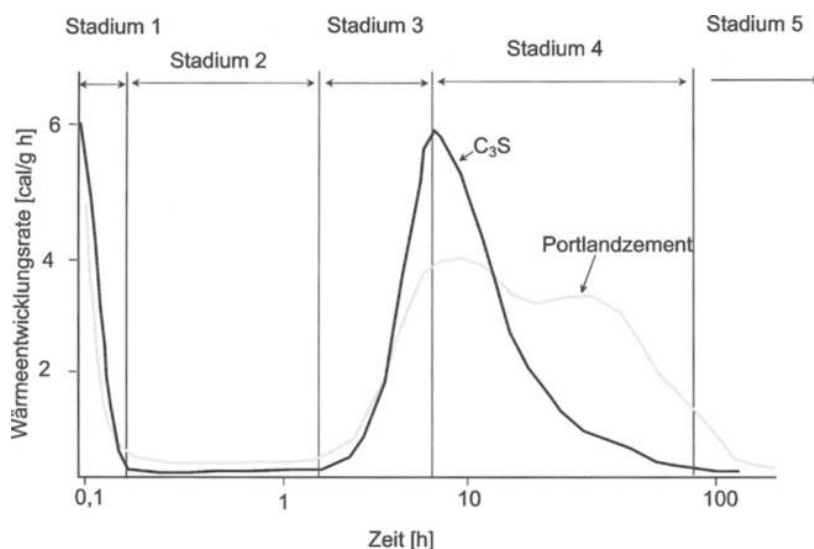
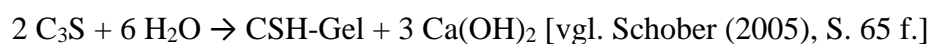


Abbildung 2: Fünf Stadien der Hydratation von Portlandzement bzw. C_3S [Stark/Wicht (2000), S. 185]

Ein wesentlicher Unterschied zur typischen Zementerstarrung liegt hierbei im größeren Angebot des Sulfatträgers, wodurch diese Reaktion im zweiten Stadium (dormante Periode) im Normalfall nicht zum Erliegen kommt [vgl. Schober (2005), S. 65 f.; Stark/Wicht (2000), S. 209]. In der Accelerationsperiode beginnt dann die Bildung von weiteren Hydratationsprodukten. [Stark/Wicht (2000), S. 209] Das Mineral Tricalciumsilicat (C_3S) ist dabei am reaktivsten und bildet gelartige Calciumsilicathydrat (CSH)-Phasen und Portlandite (Calciumhydroxid – $Ca(OH)_2$):



Langsamer reagieren darüber hinaus die anderen Klinkerminerale Dicalciumsilicat (C_2S) und Dicalciumaluminatferrit ($C_2(A,F)$) [vgl. Schober (2005), S. 66]. Die darauffolgenden beiden letzten Stadien der Zementerhärtung werden bei der Porenbetonherstellung nach Angaben in der Literatur wahrscheinlich nicht mehr erreicht, bevor der Autoklavprozess startet. In der Decelerationsperiode würde die Geschwindigkeit der Reaktionen abnehmen und Hydratationsprodukte würden diffusionskontrolliert weiter ausgebildet werden. Im finalen Stadium (stetige Periode) wäre der Reaktionsumsatz dann nur noch sehr gering und der Zement würde seine Endfestigkeit erreichen. [Stark/Wicht (2000), S. 185]

Nach der Standzeit des Porenbetonkuchens haben sich durch das Aufblähen etwa 1 mm große Poren gebildet. Die Stege zwischen diesen Poren sind durch das schwerlösliche Calciumhydroxid und die Ettringitbildung angesteift und durch die CSH-Gelbildung in geringem Maße verfestigt. [Vgl. Schober (2005), S. 66]

In der Aufdampfphase des Autoklavs läuft zunächst die Hydratation der Zementklinker weiter ab. Wenn im Weiteren eine Temperatur von etwa 130 °C erreicht ist, zerfällt das zuvor gebildete Ettringit und bildet andere Sulfatphasen (u. a. Hydroxylellestadit). Ab nachweislich 180 °C kommt es dann zur entscheidenden Härtungsreaktion: Aus den Quarzkörnern löst sich Kieselsäure und verbindet sich mit dem nun ebenfalls gelösten Calciumhydroxid. Dies führt

zur Bildung von CSH-Phasen, die sich von den CSH-Phasen aus der Zementerhärtung stark unterscheiden. [Vgl. Schober (2005), S. 66 f.]

Zunächst werden kalkreiche (CSH(II)) oder kalkärmere (CSH(I)) Verbindungen gebildet, welche nur schwach kristallisiert sind und eine geringe Kristallgröße aufweisen [vgl. Gundlach (1973), S. 79, 90]. Man spricht auch von fehlgeordneten tobermoritischen Phasen [vgl. Mörtel (1980), S. 65]. Diese werden schichtenweise um die Quarzkörner herum aufgebaut [vgl. Mörtel (1980), S. 52]. Durch weiteres Kieselsäureangebot kristallisieren diese Phasen dann schrittweise unter zusätzlichem SiO₂-Einbau zu einem 11,3-Å-Tobermorit aus [vgl. Schober (2005), S. 68]. Bei langer Härtedauer kann außerdem Xonotlit entstehen [vgl. Mörtel (1980), S. 57]. Darüber hinaus gibt es eine weitere Tobermoritquelle: Das zuvor gebildete Hydroxyllestadit reagiert mit der gelösten Kieselsäure zu Tobermorit und Anhydrit. [Vgl. Schober (2005), S. 68] Allgemein sind die gebildeten Tobermoritkristalle latten-, bänder- oder plattenförmig und in einer Kartenhausstruktur angeordnet [vgl. Schober (2005), S. 68; Mörtel (1980), S. 65].

Um auf der quarzabgewandten Seite weitere CSH-Phasen bilden zu können, muss die Kieselsäure durch die zuvor gebildeten Schichten hindurchdiffundieren. Die anfänglich lösungskontrollierte Reaktion geht somit zunehmend in eine diffusionskontrollierte über. [Vgl. Mörtel (1980), S. 52] Ein Zustand, in dem alle wesentlichen Reaktionen abgeschlossen sind, wird erreicht, wenn das Hydroxyllestadit aufgebraucht und alle nicht- bzw. teilkristallinen CSH-Phasen zu Tobermorit umgebildet worden sind. Dies erfordert – in Abhängigkeit von der Rohstoffmischung und den Autoklavbedingungen – eine Druckhaltezeit im Autoklav von einigen Stunden. [Vgl. Schober (2005), S. 69]

Die gebildete Kartenhausstruktur des gut kristallisierten Tobermorits ist für eine hohe Festigkeit des Porenbetons verantwortlich. Die geringe innere Oberfläche des Tobermorits begünstigt außerdem eine geringe Trockenschwindung. [Vgl. Müller/Chucholowski/Thienel (2016), S. 9] Diese (für die Festigkeits- und Schwindeigenschaften wichtige) gute Gefügeausbildung wird bei der Rezeptur durch die Gips- bzw. Anhydritzugabe erreicht. Stand des Wissens ist, dass die zwischenzeitliche Bildung der Sulfatphasen Ettringit oder Hydroxyllestadit für die positive Ausbildung des Tobermoritgefüges verantwortlich ist. [Vgl. Schober (2005), S. 69] Überträgt man Forschungsergebnisse zu Kalksandstein auf Porenbeton, wird bei der Autoklavhärtung ein Festigkeitsmaximum erreicht, wenn sich die ersten Xonotlitkristalle bilden [vgl. Mörtel (1980), S. 62].

2.4 Einsatzmöglichkeiten

Als Plansteine/-elemente, Wandtafeln, Decken-/Dachplatten oder ergänzende Bauteile wird Porenbeton im Wohnungs- und Gewerbebau verbaut. Vor allem im Dünnbettverfahren des Mauerwerksbaus kann Porenbeton vorteilhaft eingesetzt werden, da in der Herstellung geringe Maßtoleranzen eingehalten werden. Ein großes Anwendungsfeld von Porenbeton sind monolithische Bauweisen, bei denen ein hoher Wärmeschutz gefordert ist. [Vgl. Bundesverband Porenbetonindustrie e.V. (2018a), o. S.]

Porenbetonbauteile weisen eine Rohdichte zwischen $0,3 \text{ kg/dm}^3$ und $1,0 \text{ kg/dm}^3$ auf [vgl. Bundesverband Porenbetonindustrie e.V. (2018b), o. S.]. Die Festigkeit und die Wärmeleitfähigkeit nehmen mit steigender Rohdichte zu. In Tabelle 2 sind beispielhaft für verschiedene Rohdichteklassen die Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit dargestellt. Hieraus ist ersichtlich, dass Porenbeton insgesamt eine verhältnismäßig geringe Festigkeit und ein hohes Wärmedämmvermögen besitzt. Eine mangelnde Zugfestigkeit von Porenbeton kann des Weiteren durch eine während der Herstellung eingebrachte Bewehrung kompensiert werden. Bei größeren Bauteilen ohne statische Bewehrung kann eine Transportbewehrung notwendig sein. [Vgl. Homann (2008), S. 31] Darüber hinaus ist Porenbeton dampfdiffusionsoffen und nicht brennbar [vgl. Bundesverband Porenbetonindustrie e.V. (2018b), o. S.]

Tabelle 2: Eigenschaften von PORIT-Porenbetonplansteinen

[vgl. Porenbetonwerk Laussnitz (2018), o. S.]

Rohdichteklasse [kg/dm ³]	Steinfestigkeitsklasse [N/mm ²]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]
0,35	2	0,08 - 0,09
0,40	2	0,10
0,50	4	0,12
0,60	4	0,16
0,65	6	0,18

Im 20. Jahrhundert verbreitete sich der Baustoff Porenbeton zunehmend auf dem deutschen Markt. Die Produktpalette und die Normung wurden dabei kontinuierlich erweitert. [Vgl. Schramm (2008), S. 347 ff.] Im 21. Jahrhundert lagen die Produktionsmengen in Deutschland bis 2013 jährlich zwischen etwa $4,3 \text{ Mio. m}^3$ und $6,3 \text{ Mio. m}^3$ mit leicht abnehmender Tendenz [vgl. Stier/Forberger (2016), S. 507].

2.5 Entsorgungswege

Auf der Baustelle anfallender Porenbetonabfall aus Verschnitt kann durch die Hersteller zurückgenommen werden. Diese nicht verunreinigte Neuware ersetzt wie der Produktionsabfall entweder einen Teil der Sandfraktion in der Porenbetonherstellung oder wird zu Granulaten weiterverarbeitet und z. B. als Hygienestreu oder Ölbinder vertrieben. [Vgl. Homann (2008), S. 29]

Aus Abbruch entstehender Porenbetonabfall wird dagegen weitestgehend nicht recycelt. Im Gegensatz zu den meisten anderen mineralischen Baustoffen weist Porenbeton durch die Gips- bzw. Anhydritzugabe einen hohen Sulfatgehalt auf. Sulfat kann ausgelaugt werden und in zu

hohen Konzentrationen die Umwelt schädigen. In der primären Nutzung stellt dies kein Problem dar, da Porenbeton in Bauwerken stets witterungsgeschützt verbaut ist. In für mineralischen Bauschutt üblichen Verwertungswegen wie dem Einsatz im Straßen- und Wegebau ist der Einsatz sulfathaltiger Stoffe hingegen zu vermeiden. Dazu kommt eine für Bettungsschichten notwendige fehlende Frostbeständigkeit des Porenbetons. [Vgl. Stier/Forberger (2016), S. 508] Diese Gründe führen dazu, dass lediglich ein Anteil von etwa einem Drittel des Porenbetonabfalls eine bauschuttähnliche Verwertung erfährt [vgl. Kreft (2016), S. 184].

Abgebrochener und aufbereiteter Porenbeton ist des Weiteren kein sortenreines Material, sondern enthält diverse Beimengungen anderer Stoffe wie Putz- oder Tapetenanhaftungen, Kunststoffe, bituminöse oder keramische Baustoffe. Dies schließt bisher eine Verwertung durch die Hersteller aus, da die Fremdstoffe Probleme in der Produktionstechnik und optische Mängel am Produkt hervorrufen würden. [Vgl. Nielsen/Vrijders/Broos/Quaghebeur (2012), S. 8] Durch die fehlende Rückführung des sekundären Porenbetons in die Produktion und den erschwerten Weg eines konventionellen Bauschuttrecyclings wird dieser Baustoff nach seiner primären Nutzung überwiegend deponiert (Deponieklasse 1) [vgl. Stier/Forberger (2016), S. 508].

3 Forschung zum Porenbetonrecycling

Die bisher ungenügende Wiederverwertbarkeit von Porenbeton begründet die Erforschung möglicher Recyclingwege. Die Notwendigkeit, Verwertungsmöglichkeiten zu finden, ist zunächst für die Europäische Union gegeben. Sie hat sich das Ziel gesetzt, „bis zum Jahr 2020 eine Recyclingquote von mindestens 70 % bei Bau- und Abbruchabfällen zu erreichen.“ [Kreft (2016), S. 184 f.] Wenn man Bodenaushub als Abfallart und Erdbau als Verwertungsweg unberücksichtigt lässt, ergibt sich für Deutschland eine Recyclingquote von Bau- und Abbruchabfällen von ca. 60 %, wobei die Daten für Abfallaufkommen und Wiederverwertung aus unterschiedlichen Jahren stammen (2013 und 2012) [vgl. Kreft (2016), S. 184]. Um die in Deutschland fehlenden 10 % zu erreichen, könnte das Recycling von Porenbeton einen ersten Schritt darstellen.

Damit in der Industrie tatsächlich Porenbetonrecycling entwickelt und betrieben wird, könnte ein politischer Druck hergestellt werden, um die Hersteller von Porenbeton extrinsisch zu motivieren. Dies könnte in naher Zukunft passieren, da seit dem Jahr 2013 eine Neuerung in der europäischen Bauproduktenverordnung (BauPVO) in Kraft getreten ist, welche eine „nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen“ als siebte Grundanforderung an Bauwerke vorschreibt. Der alternative Weg ginge über den entscheidenden Aspekt der Wirtschaftlichkeit. Es müsste ein Recyclingweg gefunden werden, bei dem Mehrkosten bzw. geringere Umsätze durch andere Verfahren, Qualitäten oder Produkte kompensiert werden. Dies könnte mit einer Kosteneinsparung durch (u. a.) einen geringeren Primärrohstoffverbrauch erreicht werden.

Darüber hinaus würde ein Recycling bei erschwerter Deponierung in den Vordergrund rücken. Verschärfte Annahmekriterien für Deponien oder das Fehlen neuer Deponieräume könnten

Argumente für eine Weiternutzung des Baustoffs bilden. [Vgl. Stier/Forberger (2016), S. 508] Außerdem würden höhere Deponierungskosten das Recycling wirtschaftlicher machen.

Bei der Forschung zum Porenbetonrecycling ist zunächst die aufkommende Menge des wiederzuverwertenden Baustoffs interessant. Die mengenmäßige Erfassung von Porenbetonabfällen ist allerdings nur schätzungsweise möglich, da Porenbeton keinen eigenen Abfallschlüssel besitzt. In der Aufbereitung wird er meist dem mineralischen Bauschutt oder gipsbasierten Baustoffen zugeordnet. [Vgl. Stier/Forberger (2016), S. 509 f.] In der Literatur stehen Werte von Kreft von 0,5 bis 1,0 Mio. Tonnen jährlichem Porenbetonabfall [vgl. Kreft (2016), S. 184] einer Befragung von Stier und Forberger entgegen. In letzterer gaben einige Abbruchunternehmen ihre Mengen an Porenbetonabfall an, welche dann auf den gesamten deutschen Abbruchsektor hochgerechnet wurden. Diese Hochrechnung kommt auf eine deutlich höhere Abfallmasse von etwa 2,05 Mio. Tonnen. In der Interpretation dieses Ergebnisses gehen Stier und Forberger davon aus, dass die reale Masse etwas geringer sein dürfte, da die Unternehmen nicht den reinen Porenbeton, sondern die Gesamtmengen der jeweiligen Abfallschlüssel angegeben haben könnten. [Stier/Forberger (2016), S. 512]

Der heute anfallende Porenbetonbruch ist meist mehrere Jahrzehnte alt und besitzt daher eine mittlere Rohdichte von schätzungsweise $0,7 \text{ t/m}^3$ [vgl. Schlegel/Hums (2002), S. 83]. Legt man die Befragungsergebnisse zugrunde, fallen daher aktuell 2,9 Mio. m^3 Porenbetonabfall an. Diese Zahl liegt erwartungsgemäß unter der aktuellen Produktion von Porenbeton, da die jährliche Produktionsmenge in den letzten Jahrzehnten insgesamt angestiegen ist [vgl. Schramm (2008)]. Hieraus folgt, dass in Zukunft mit höheren Abfallmengen aus Porenbeton zu rechnen ist.

3.1 Recyclingansätze aus der Literatur

Aus der Literatur entnommene, verschiedene Ansätze für ein Recycling von Porenbeton werden im Folgenden vorgestellt. Auf ein Projekt wird dabei zunächst näher eingegangen, da es von einem Porenbetonhersteller stammt und wegen der unmittelbaren Praxisnähe eine konkrete Realisierung vermuten lässt.

3.1.1 Rücknahme durch Porenbetonhersteller

Ein aktuelles Forschungsprojekt zum Thema Porenbetonrecycling kommt aus der Industrie von der Unternehmensgruppe *Xella International GmbH*, einem Porenbetonhersteller mit mehreren untergeordneten Produktmarken. Dort konnte in einem Pilotprojekt erfolgreich abgebrochener Porenbeton in die normale Produktion rückgeführt werden. Das Problem der fehlenden Sortenreinheit des Sekundärmaterials wurde durch eine aufwändigere Aufbereitung gelöst. In einem mehrstufigen Prozess werden dabei Störstoffe durch Windsichtung, Magnetabscheidung, sensorunterstützte Sortierverfahren, Sink-Schwimm-Trennverfahren und händische Sortierung entfernt. Der nahezu sortenreine Porenbeton kann im Anschluss – so wie es beim Produktionsausschuss und den Baustellenrückläufern bereits üblich ist – feingemahlen einen Teil des Quarzsandes in der Produktion neuen Porenbetons ersetzen. [Vgl. Kreft (2016)]

Mengenmäßig konnte das Altmaterial maximal 15 M.-% des Rohstoffs ersetzen, wobei die werksmäßige Probeproduktion nur mit einer Konzentration von 10 M.-% durchgeführt wurde [vgl. Kreft (2016), S. 188 f.]. Hier wird nicht näher darauf eingegangen, ob sich die angegebenen Prozentwerte auf die Sandfraktion, auf alle Feststoffe oder auf die gesamte Rohstoffmischung inkl. Wasser beziehen. In jedem Fall besitzt die Recyclingmethode aufgrund dieser mengenmäßigen Beschränkung eine geringe Kapazität, mit der aufkommende Abfallmassen nur ansatzweise verwertet werden könnten. Hinzu kommt, dass von den 15 M.-% noch der Anteil des Produktionsrücklaufs von primärem Porenbeton abgezogen werden muss. In belgischen Xella-Werken beispielsweise erreicht der Produktionsausschuss bereits dieses Substitutionsniveau von 15 M.-% der Feststoffe [vgl. Nielsen/Vrijders/Broos/Quaghebeur (2012), S. 8]. Die wenige Literatur lässt insgesamt kaum Rückschlüsse auf die Wirksamkeit dieses Verfahrens zu.

3.1.2 Sonstige Recyclingansätze

Neben Xellas Verwertungsansatz eines Porenbetonkreislaufs gibt es eine Reihe anderer Recyclingideen, sekundären Porenbeton einzusetzen. Diese werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Die belgische Forschungsorganisation *Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek* erforschte einen möglichen Einsatz alten Porenbetons in Estrichen. Eine aufbereitete Korngruppe 0/8 mm würde dabei den Sand als Rohstoff in einem Zementestrich ersetzen. Um die Auslaugbarkeit der Sulfate aus dem Recyclingmaterial zu verringern, werden diese durch das im Zementklinker enthaltene Tricalciumaluminat zu Ettringit gebunden. Als notwendige Randbedingungen für diesen Verwertungsweg werden die Verwendung eines Portlandzementes (um einen hohen pH-Wert von über 12 zu erreichen) und sehr geringe Gipskonzentrationen im Recyclingmaterial angegeben. [Vgl. Bergmans/Nielsen/Snellings/Broos (2016)]

Eine andere Möglichkeit Porenbetonabfall zu verwerten, ist der Einsatz als Gesteinskörnung in Leichtbetonen. Hierzu gibt es jeweils einen Forschungsansatz der *Technischen und Wirtschaftswissenschaftlichen Universität Budapest* [vgl. Fenyvesi/Jankus (2015)] und der *Bauhaus-Universität Weimar*. Letztere hat eine leichte Gesteinskörnung bestehend aus Porenbeton- und Ziegelbruch entwickelt. Hierbei werden zunächst Porenbeton- und Ziegelabfälle gebrochen bzw. zerkleinert und anschließend gemischt und granuliert. Zuletzt werden die Granulate bei knapp 1300 °C im Drehrohrofen zu einer mineralischen Gesteinskörnung gebrannt. [Vgl. Reinhold/Müller (2000)]

Einen anderen Verwertungsansatz verfolgt darüber hinaus die *Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV*. In einem Forschungsvorhaben soll ein heterogenes Abbruchmaterial, in dem Porenbeton nur ein Bestandteil neben diversen anderen Baustoffen wie Beton, Ziegel, Naturstein, Kalksandstein, Putz, Mörtel und Begleitstoffen ist, recycelt werden. Aus diesem Gemisch wird ein Werkstein unter Anwendung der Kalksandsteintechnologie – also Pressen eines Rohlings mit anschließender Autoklavhärtung – hergestellt. [Vgl. Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV (2006)]

Neben den beschriebenen baustofflichen Nutzungen gibt es auch zwei Verwertungsideen aus der Umwelttechnik. Zum einen forschte die Bauhaus-Universität Weimar an einer Aufbereitung zu einem Kalk-Sulfat-Düngemittel [vgl. Volk/Schirmer (2010)] und zum anderen entwickelte die *Königliche Technische Hochschule* in Stockholm ein Filtermedium aus Porenbetonrezyklaten für die Abwasserreinigung. [Vgl. Renman/Renman (2012)]

Einen interessanten Beitrag zum Thema Porenbetonrecycling liefert des Weiteren die *Universität der Bundeswehr München*. In einem dortigen Forschungsvorhaben wird die Recyclingfähigkeit von primärem Porenbeton verbessert, indem in der Rezeptur der Gips bzw. Anhydrit und ein Teil des Zements durch calcinierten bzw. hochgebrannten Ton ersetzt werden. Der Gehalt an auslaugbaren Sulfaten kann dadurch deutlich verringert werden, was eine sekundäre Wiederverwertung erleichtert. [Vgl. Müller/Chucholowski/Thienel (2016)]

3.2 Forschung der MPA Bremen

Bereits seit vielen Jahren beschäftigt sich auch die MPA Bremen mit der Forschung und Entwicklung von Recyclingmöglichkeiten für Porenbeton. Im Folgenden werden dabei zunächst ein umwelttechnisches Projekt und anschließend zwei entwickelte Recyclingbaustoffe erläutert, bevor das aktuell laufende Forschungsvorhaben des „Leichten Schaumsteins“ als Gegenstand der vorliegenden Arbeit ausführlich beschrieben wird.

3.2.1 Methanox

Die Entwicklung des „Methanox“ sieht keine baustoffliche, sondern eine umwelttechnische Weiternutzung des Porenbetons vor. Für den Einsatz von abgebrochenem Porenbeton in diesem und den folgenden Projekten der MPA wird der Porenbetonbruch soweit zerkleinert, dass grobe Granulate einer maximalen Korngröße von 32 mm und feinere Brechsande entstehen. Die bei Methanox verwendeten Porenbetongranulate werden „mit methanoxidierenden Bakterien befrachtet und im Gemisch mit deutlich festeren Kalksandstein-Granulaten als stabilisierendes Korngerüst in einer ungebundenen Funktions-Schicht im Deponiebau eingesetzt.“ [Hlawatsch/Aycil/Kropp (2016), S. 436] Diese Bakterien setzen das im Deponiegas enthaltene Methan zu Kohlenstoffdioxid um und schützen somit die Umwelt vor dem erheblich schädlicheren Methangas [vgl. Hlawatsch/Aycil/Kropp (2016), S. 436].

3.2.2 PB-Mörtel und Leichtstein

Im Zuge weiterer Forschungsvorhaben der MPA wurde zunächst aus feinen Porenbetonbrechsanden ein Werk trockenmörtel auf Zementbasis entwickelt. Der Brechsand besteht dabei aus der Korngruppe 0/2 mm (s. Abbildung 3 links) inkl. der abschlämmbaren Bestandteile und wird als Gesteinskörnung eingesetzt. Im Recyclingmaterial gemessene Sulfatgehalte von 2 M.-% bis 12 M.-% begründen des Weiteren den Einsatz eines SR-Zements, um ein Sulfatreiben zu vermeiden. Außerdem kommen die Zusätze Methylhydroxyethylcellulose sowie Luftporenbildner oder Weißkalkhydrat zum Einsatz, welche sich positiv auf die Verarbeitbarkeit und das Haftvermögen des Mörtels auswirken. Bis auf ein höheres Schwinden (etwa 2 mm/m) werden im Vergleich zu einem Normalmörtel ähnliche oder bessere

Eigenschaften erzielt. Somit erfüllt der in zwei Varianten entwickelte „PB-Mörtel“ die Mindestanforderungen eines Leichtmauermörtels LM36 nach DIN V 18580 an die Druckfestigkeit ($11,1 \text{ N/mm}^2$ bzw. $7,5 \text{ N/mm}^2$), die Trockenrohichte ($0,95 \text{ t/m}^3$ bzw. $0,92 \text{ t/m}^3$) und den E-Modul (3400 N/mm^2 bzw. 4200 N/mm^2) jeweils nach 28 Tagen. [Vgl. Hlawatsch/Aycil/Kropp (2016), S. 439 ff.]



Abbildung 3: Porenbetonrezyklat: Korngruppe 0/2 (links) und 2/8 mm (rechts) [Hlawatsch/Aycil/Kropp (2016), S. 435]

Aus der Forschung zum Werk trockenmörtel ging darüber hinaus die Entwicklung eines Formsteins hervor. Dieser wird durch eine Rüttelpressverdichtung eines erdfeucht eingestellten Porenbetonmörtels hergestellt. Der entsprechende Mörtel besteht neben den feinen Körnungen auch aus größeren Korngruppen des Rezyklats bis 8 mm (s. Abbildung 3 rechts), welche durch die Rüttelpresstechnik (6 N/mm^2 Pressendruck; 200 Hz Vibrationsfrequenz) nicht zerdrückt werden. Des Weiteren kommt ebenfalls ein Zement mit hohem Sulfatwiderstand zum Einsatz. Für eine optimale Verdichtung wird darüber hinaus Steinkohlenflugasche hinzugegeben. Nach 28 Tagen erreichte der entwickelte „Leichtstein“ eine Trockenrohichte von $1,00 \text{ t/m}^3$, eine Druckfestigkeit von $6,2 \text{ N/mm}^2$ (Endfestigkeit $11,0 \text{ N/mm}^2$) und einen Elastizitätsmodul von 5300 N/mm^2 . [Vgl. Hlawatsch/Aycil/Kropp (2016), S. 445 ff.]

Unter gemeinsamer Anwendung kamen der Leichtstein und der PB-Mörtel in einem realen Bauvorhaben bereits zum Einsatz. In einer im Jahr 2017 eröffneten Bremer Recyclingstation wurden zwei nichttragende Innenwände aus diesen recycelten Mauerwerksbaustoffen hergestellt. [Vgl. Zeidler (2017), o. S.] Hierfür wurden Steine und Mörtel auf industrieller Ebene hergestellt (s. Abbildung 4 und Abbildung 5) und zuvor im Verbund als Mauerwerk geprüft. Dabei wurde eine Druckfestigkeit des Mauerwerks von $7,0 \text{ N/mm}^2$ (PB-Mörtel-Variante 1) bzw. $6,6 \text{ N/mm}^2$ (PB-Mörtel-Variante 2) festgestellt. [Vgl. Hlawatsch/Aycil/Kropp (2016), S. 443 ff.] Ein begleitendes Monitoring wird seit der Errichtung durch die MPA Bremen durchgeführt.



Abbildung 4: PB-Mörtel als Werk trockenmörtel [Hlawatsch/Aycil/Kropp (2016), S. 444]



Abbildung 5: Leichtstein [Hlawatsch/Aycil/Kropp (2016), S. 449]

3.2.3 Leichter Schaumstein

Die Motivation, einen weiteren Recyclingweg für Porenbetonbruch zu entwickeln, lag zum einen in der Verwertbarkeit größerer Körnungen als 8 mm (welche in den bisherigen Entwicklungen ausgeschlossen waren). Grobe Granulate stattdessen in kleinere Korngruppen zu zerkleinern, würde einen Verlust der Energie, die bei der Herstellung in den Aufbau des Porenbetongefüges geflossen ist, bedeuten und darüber hinaus selbst Energie kosten. Zum anderen sollte ein Sekundärbaustoff geschaffen werden, der ähnliche Eigenschaften wie der primäre Porenbeton aufweist. Ziel war es also, grobe Porenbetongranulate in eine neue poröse Matrix einzubetten. [Vgl. Hlawatsch/Küstermann/Kropp (2018a), S. 337]

Um zu untersuchen, ob abgebrochener Porenbeton mit seinen vorhandenen Verunreinigungen für den Einsatz im Schaumstein zu einem sortenreinen Material aufbereitet werden muss, wurden zwei verschiedene Arten von Granulaten erprobt. Zum einen wurden sortenreine Granulate aus gebrochenem Porenbeton (*PB-Granulate*, s. Abbildung 6 links) und zum anderen ein recycelter Porenbeton aus dem Abbruch (*RC-Granulate*, s. Abbildung 6 rechts) verwendet. Die RC-Granulate enthielten dabei verschiedenste Fremdstoffe wie Bitumen, Holz, Polystyrol, Plexiglas, Dübel und andere Kunststoffe (s. Abbildung 7).

Für eine poröse Matrix des neuen Recyclingbaustoffs eignete sich ein Schaummörtel gut, d. h. ein durch einen untergemischten Schaum hergestellten porigen Mörtel. Da bei einem Untermischen des Rezyklats in diesen Schaummörtel empfindliche Porenstege der Porenbetongranulate zerstört werden könnten, wurde stattdessen ein anderes Verfahren entwickelt. [Vgl. MPA Bremen (2014), S. 5] Die Granulate werden dabei zunächst lose in eine Schalung geschüttet, um anschließend in den entstehenden Haufwerksporenraum den Schaummörtel zu injizieren.



Abbildung 6: PB-Granulat (links) und RC-Granulat (rechts)



Abbildung 7: Eine Auswahl an Fremdstoffen aus dem RC-Material

Mit der Technik einer Schaummörtelinjektion wurden in der Literatur bereits an zwei Stellen Erfahrungen gemacht. Stürmer entwickelte als Erstes ein Injektionsmörtelsystem für eine Sanierung historischen Mauerwerks. Bei diesem Verfahren wird zunächst ein Zement- oder Romankalkmörtel angemacht und unter einen separat hergestellten Schaum gemischt. Dieser Schaummörtel wird anschließend mithilfe einer Pumpe und Injektionspackern in das Mauerwerk eingebracht. Durch diese Methode kann wenig tragfähiges oder stark salzbelastetes Mauerwerk mit einem anpassungsfähigen Schaummörtel bauwerksgerecht saniert werden. [Vgl. Stürmer (1997)]

Des Weiteren injizierten Stark, Seyfarth und Mielke Schaummörtel auf Zementbasis in Haufwerke aus leichter Gesteinskörnung. Diese modifizierten Leichtbetone besitzen im Gegensatz zu den lediglich verkitteten Gesteinskörnungen von haufwerksporigen Leichtbetonen eine durchgängige Matrix. Dadurch sind sie dichter und belastbarer und werden gleichzeitig energieärmer hergestellt als Porenbeton. Einen weiteren Vorteil des Verfahrens sehen Stark und Mitarbeiter in einem möglichen Einsatz recycelter Gesteinskörnung. In einem ersten Tastversuch verwenden sie daher bereits gebrochenen Porenbeton als Haufwerk und weisen hierbei auf ein Forschungspotential hin. [Vgl. Stark/Seyfarth/Mielke (2003)]

Der zu injizierende Schaummörtel für die Herstellung des „leichten Schaumsteins“ der MPA Bremen besteht nach den Vorbildern von Stürmer sowie Stark und Mitarbeitern aus einem Bindemittelleim und einem separat hergestellten Schaum. Dieser Schaum auf Tensidbasis wird mit Wasser und Druckluft in einer Schaumkanone produziert und anschließend dem Leim hinzudosiert und untergemischt (s. Abbildung 8 - Abbildung 11). Verschiedene Volumenverhältnisse zwischen Bindemittelleim und Schaum wurden erprobt, woraufhin ein bewährtes Verhältnis von 1 : 1 als Standard festgelegt wurde. [Vgl. Hlawatsch/Küstermann/Kropp (2018a), S. 339]



Abbildung 8: Bindemittelleim (ohne Schaum)



Abbildung 9: Schaumzugabe



Abbildung 10: Unterheben des Schaums



Abbildung 11: Fertiger Schaummörtel

Parallel zur Herstellung des Schaummörtels wird eine Schalung für das Porenbetonhaufwerk vorbereitet. Diese wird mit einem Schalöl eingölt, mit groben Porenbetongranulaten (≥ 8 mm) befüllt und umseitig geschlossen. Als Granulate werden entweder PB-Granulate (s. Abbildung 12 links) mit einer Rohdichte von 550 kg/m^3 oder RC-Granulate (s. Abbildung 12 rechts) eingesetzt. Die verwendeten RC-Granulate weisen wegen des alten, dichteren Porenbetons und zum Teil schwerer Fremdstoffe eine im Mittel höhere Rohdichte auf. In Untersuchungen wurde darüber hinaus festgestellt, dass ein Vornässen der Granulate einen verbesserten Verbund zur Matrix bewirkt. Bei trockenen Granulaten würde dem Schaummörtel hingegen Wasser entzogen und dadurch Luftporen zerstört. Außerdem bewirke dieser Wasserentzug ein Ansteifen des Mörtels und dadurch eine schlechtere Verfüllung des Haufwerksporenraums. [Vgl. Hlawatsch/Küstermann/Kropp (2018a), S. 339 f.] In Abbildung 13 (lichtmikroskopische Aufnahme eines Dünnschliffs) ist eine gute Verbundzone zwischen einem vorgehässeten Granulat (links) und der Matrix (rechts) dargestellt.



Abbildung 12: Haufwerksschüttungen von PB-Granulaten (links) und RC-Granulaten (rechts)

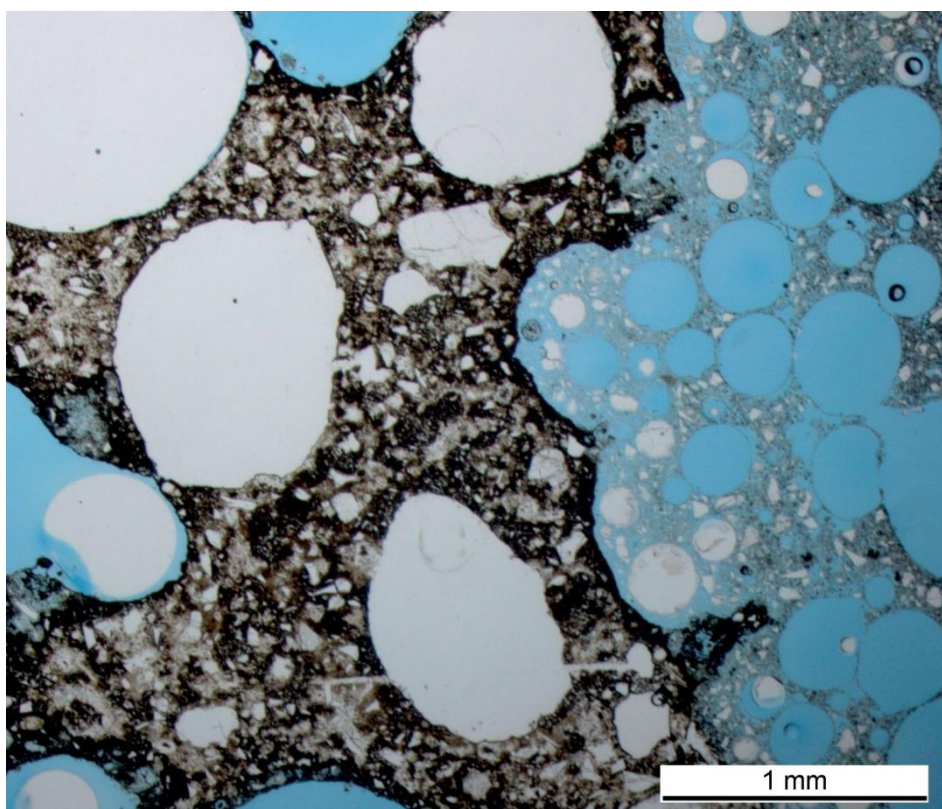


Abbildung 13: Lichtmikroskopische Aufnahme einer Verbundzone des Schaumsteins [MPA Bremen (2019)]

Im weiteren Herstellungsverlauf sieht das von Stark und Mitarbeitern entwickelte Injektionsverfahren eine Injektionsrichtung von unten nach oben vor, damit sich der Schaummörtel über alle Haufwerksporen gleichmäßig verteilen kann. Dadurch kann die Luft aus den Poren kontinuierlich nach oben hin entweichen. [Vgl. Stark/Seyfarth/Mielke (2003)] Für dieses Verfahren besitzt die Schalung am unteren und am oberen Ende eine Öffnung. An der unten liegenden Öffnung wird ein Pumpenschlauch angeschlossen, um mithilfe einer Schneckenpumpe den Schaummörtel in die Schalung zu pumpen (s. Abbildung 14). An der

oben liegenden, kleinen Öffnung tritt die Luft aus. Die Injektion ist abgeschlossen, sobald der Mörtel die gesamte Schalung durchlaufen hat und an der oberen Öffnung austritt (s. Abbildung 15 und Abbildung 16). Ein injizierter Schaumstein besteht zu etwa 70 V.-% aus dem Granulathaufwerk und zu 30 V.-% aus der injizierten Matrix. Wenn der Schaummörtel erstarrt und ausreichend frühfest ist, kann der Schaumstein nach wenigen Tagen ausgeschalt werden und aushärten (s. Abbildung 17). [Vgl. MPA Bremen (2014), S. 6] Die Einbindung der Schaummörtelmatrix in ein Haufwerk aus RC-Granulaten ist in den Abbildungen der Tabelle 3 zu sehen.



Abbildung 14: Injektion des gepumpten Schaummörtels



Abbildung 15: Mörtelaustritt nach Injektionsdurchlauf





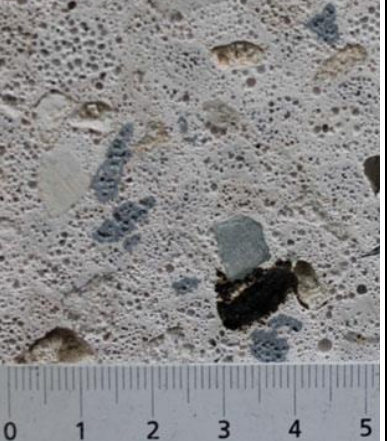
Abbildung 16: Frischinjizierter Schaumstein



Abbildung 17: Ausgeschalteter und ausgehärteter Schaumstein

Der Bindemittelleim für den Schaummörtel wurde in drei Varianten entwickelt (s. Tabelle 3). Die erste beinhaltet einen zementbasierten Schaummörtel, der auch in den Forschungsansätzen von Stark und Mitarbeitern sowie Stürmer überwiegend untersucht wurde. Wegen der Sulfatbelastung der Porenbetongranulate eignete sich hierfür ein CEM I 42,5 R-SR gut. Für eine bessere Verarbeitbarkeit wurde außerdem Steinkohlenflugasche hinzugegeben. Darüber hinaus wurde ein Stabilisierer (ST3 von Sika) verwendet, um einem Entmischen des Schaumes vorzubeugen und die Luftporen zu stabilisieren; [vgl. Hlawatsch/Küstermann/Kropp (2018a), S. 339; MPA Bremen (2014), S. 9] hierdurch konnte außerdem die Pumpfähigkeit des Schaummörtels verbessert werden. [Vgl. Stürmer (1997), S. 74] Der leichte Schaumstein der Variante 1 entspricht somit einem matrixporigen Leichtbeton mit künstlicher Gesteinskörnung aus gebrochenem Porenbeton.

Tabelle 3: Rezepturen der drei Bindemittelvarianten und jeweilige Einbindung des Schaummörtels in ein RC-Haufwerk [vgl. Hlawatsch/Küstermann/Kropp (2018a), S. 339]

Variante 1 (Zement)	Variante 2 (Gips)	Variante 3 (Porenbeton)
85 % Zement (CEM I 42,5 R-SR) 15 % Steinkohlenflugasche	93 % Anhydrit (REA-Gips) 7 % Weißkalkhydrat	60 % Quarzmehl 30 % Zement (CEM I 52,5 R) 10 % Weißkalkhydrat
Stabilisierer (ST3 von Sika)	Anreger (Kaliumsulfat) Stabilisierer (Methylcellulose)	Stabilisierer (Methylcellulose)
W/Z = 0,50 Bindemittelleim/Schaum = 1 : 1	W/B = 0,50 Bindemittelleim/Schaum = 1 : 1	W/Feststoffe = 0,60 Bindemittelleim/Schaum = 1 : 1
		
[Hlawatsch/Küstermann/Kropp (2018b), S. 462]	[Hlawatsch/Küstermann/Kropp (2018b), S. 463]	[Hlawatsch/Küstermann/Kropp (2018b), S. 463]

In der zweiten Variante wurde hauptsächlich Gips als Bindemittel für den Schaummörtel verwendet. Dieser wird als technischer Anhydrit aus der Rauchgasentschwefelung in Kraftwerken oder Verbrennungsanlagen bezogen (REA-Gips) und stellt somit ein industrielles Nebenprodukt dar. Die Entwicklung der Variante 2 war vor allem ökologisch motiviert, da der leichte Schaumstein aus Gips somit größtenteils aus Sekundärrohstoffen besteht und natürliche Ressourcen schont. Des Weiteren wurden dem Gipsmörtel Weißkalkhydrat,

Kaliumsulfat als Anreger und der Stabilisierer Methylcellulose beigemischt. [Vgl. Hlawatsch/Küstermann/Kropp (2018a), S. 339; MPA Bremen (2014), S. 9 f.]

Als dritte Bindemittelvariante wurde eine Art Porenbetonmörtel entwickelt. Nach dem Vorbild der Porenbetonrezeptur besteht dieser Mörtel hauptsächlich aus Quarzmehl, Kalk und Zement. Im Gegensatz zur Porenbetonherstellung wurde die Porosität hierbei nicht über die Treibreaktion des Aluminiums, sondern über das Untermischen des Schaums erzielt. Aus Gründen der Verarbeitbarkeit und Sicherheit auf Laborebene wurde des Weiteren kein Branntkalk, sondern bereits gelöschtes Weißkalkhydrat verwendet. Als Zement kam außerdem ein CEM I 52,5 R für eine möglichst hohe Frühfestigkeit zum Einsatz. Wie bei den anderen Bindemittelvarianten wurde darüber hinaus ein Stabilisierer (Methylcellulose) eingesetzt. Im entscheidenden Unterschied zu den vorherigen Varianten erhärtet der leichte Schaumstein nur anfangs atmosphärisch. Nach einer Ausschaltfrist von wenigen Tagen wird er hingegen wie Porenbeton im Autoklav ausgehärtet. Hierdurch soll die Matrix ein porenbetonähnliches Gefüge ausbilden und der gesamte Schaumstein einen möglichst homogenen Verbundbaustoff bilden. [Vgl. Hlawatsch/Küstermann/Kropp (2018a), S. 339; MPA Bremen (2014), S. 10]

In der Entwicklungsphase der Variante 3 wurden bei einem konstanten Quarzgehalt von 60 M.-% der festen Mörtelrohstoffe eine kalkreiche (30 M.-% Kalk – 10 M.-% Zement), eine zementreiche (10 – 30) und eine ausgeglichene (20 – 20) Rezeptur untersucht. Der zementreiche Mörtel erwies sich dabei als am geeignetsten, um eine ausreichende Grünstandfestigkeit der ausgeschalteten Probe zu gewährleisten. Darüber hinaus wurde im Laufe des Forschungsprojekts festgestellt, dass auf eine Zugabe von Gips oder Anhydrit verzichtet werden kann. Die positive Wirkung des Sulfatträgers auf die Schwindeigenschaften von Porenbeton wird hierbei nicht benötigt, da bei Untersuchungen des Schaummörtels der Variante 3 kein Schwinden, sondern lediglich ein leichtes Quellen festzustellen war. Auf ein möglicherweise vorhandenes Festigkeitspotential durch Sulfatzugabe wird außerdem verzichtet, um die Recyclingfähigkeit des leichten Schaumstein durch eine geringe Sulfatkonzentration zu verbessern. [Gespräch mit Frau Küstermann am 05.12.2018]

Um Eigenschaften der injizierten Schaumsteine besser interpretieren zu können, sollten auch die reinen Schaummörtel untersucht werden. Hierfür wurden Schaummörtelproben hergestellt, indem der Mörtel nach dem Pumpendurchlauf direkt in eine leere Schalung gegossen wurde. Hierdurch kann die Matrix der Schaumsteine allerdings nur bedingt abgebildet werden, da der Injektionsprozess einen Einfluss auf den Schaummörtel ausübt. Der Mörtel muss sich beim Injizieren in engen Windungen an den scharfkantigen Granulaten vorbeischieben, wodurch Mörtelporen zerstört werden. Wegen dieses Effekts besitzt der nach dem Injektionsdurchlauf oben aus der Schalung austretende Schaummörtel eine höhere Rohdichte als vor der Injektion. Demnach ist die Rohdichte der Schaumsteinmatrix generell höher als die der Schaummörtelprobe. [Vgl. MPA Bremen (2019)]

Schaumsteine und Schaummörtelproben wurden auf ihre Feststoffeigenschaften geprüft (s. Tabelle 4). Bei den atmosphärisch ausgehärteten Steinen der Varianten 1 und 2 wurde die Druckfestigkeit nach 28 Tagen (20 °C, 65 % rel. Luftfeuchte) gemessen; die Proben der Variante 3 besitzen nach der Autoklavhärtung direkt ihre Endfestigkeit. Außerdem wurde der Wasserdampfdiffusionswiderstand gemäß DIN EN ISO 12572 festgestellt. Bei den hygrischen

Dehnungen handelt es sich darüber hinaus um das Endschwindmaß (20 °C, 65 % rel. Luftfeuchte).

Tabelle 4: Feststoffeigenschaften der Schaummörtel und der Schaumsteine der drei Bindemittelvarianten [vgl. Hlawatsch/Küstermann/Kropp (2018b)]

Bindemittel-variante	Probenart	Rohdichte [kg/m ³]	Druckfestigkeit ¹ [N/mm ²]	λ ² [W/(m·K)]	μ ⁴ [-]	hygrische Dehnung ⁵ [mm/m]
1 (Zement)	Schaumstein (PB-Granulate)	620	2,6	(0,059) ³	6,6	-1,1
	Schaumstein (RC-Granulate)	680	1,8	(0,062) ³	6,6	-1,2
	reiner Schaummörtel	740	6,8	(0,064) ³	4,8	-3,8
2 (Gips)	Schaumstein (PB-Granulate)	750	2,1	(0,066) ³	4,9	-0,04
	Schaumstein (RC-Granulate)	820	1,3	(0,068) ³	4,8	-0,02
	reiner Schaummörtel	800	1,2	(0,072) ³	3,7	0,08
3 (Porenbeton)	Schaumstein (PB-Granulate)	610	2,6	(0,052) ³	5,6	0,38
	Schaumstein (RC-Granulate)	530	2,8	(0,054) ³	5,4	0,39
	reiner Schaummörtel	510	3,7	(0,051) ³	3,8	0,37

¹ Prüfung nach 28 Tagen (20 °C, 65 % rel. Luftfeuchte)

² in Anlehnung an DIN EN 12667

³ fehlerbehafteter Wert wegen eines Problems im Prüfverfahren

⁴ gemäß DIN EN ISO 12572

⁵ Endschwindmaß (20 °C, 65 % rel. Luftfeuchte)

Die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessungen (in Anlehnung an DIN EN 12667) sind generell mit einem deutlichen Fehler behaftet, da im Nachhinein ein Problem im Prüfverfahren festgestellt wurde. Die realen λ -Werte lägen insgesamt höher. In einem Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten untereinander ist jedoch eine zu erwartende Korrelation zu den Rohdichten ersichtlich.

Die Proben der Bindemittelvariante 2 weisen insgesamt die höchsten Rohdichten (≈ 790 kg/m³) und die im Mittel niedrigsten Festigkeiten ($\approx 1,5$ N/mm²) auf. Als Vorteil bringt die Gips-Variante aber eine hohe Volumenstabilität mit sich. Der Wasserdampfdiffusionswiderstand liegt generell bei allen Bindemittelvarianten in einem sehr niedrigen Bereich.

Bei der Bindemittelvariante 1 heben sich des Weiteren die Schaumsteine deutlich vom reinen Schaummörtel ab. Bei den Schaumsteinen sind jeweils deutlich geringere Druckfestigkeiten und hygri-sche Dehnungen ersichtlich. Die niedrigeren Festigkeiten können dabei durch den Verbund zwischen Matrix und Korn als Schwachstelle oder durch unverfüllte Haufwerks-porenräume als Fehlstellen erklärt werden. Dass darüber hinaus eine Schwindverformung von der zementären Schaummörtelmatrix ausgeht, konnte auch von Stark und Mitarbeitern gezeigt werden [vgl. Stark/Seyfarth/Mielke (2003), S. 65]. Sowohl der Schaummörtel als auch die Schaumsteine weisen ein großes Schwinden auf.

Die Proben der Bindemittelvariante 3 sind generell am leichtesten (\varnothing 550 kg/m³) und besitzen gleichzeitig mit Ausnahme des reinen Zementschaummörtels (Variante 1) die höchsten Festigkeiten (\varnothing 3,0 N/mm²). Im Gegensatz zu einem Schwinden von primärem Porenbeton tritt des Weiteren durchgängig ein Quellen in Erscheinung. Außerdem lässt sich der oben beschriebene Effekt der im Vergleich zur Mörtelprobe höheren Rohdichte der Schaumsteinmatrix durch den schwereren Schaumstein mit PB-Granulaten beobachten.

4 Ziel dieser Arbeit

Die Ergebnisse der bisherigen Forschungsarbeit der MPA Bremen am leichten Schaumstein zeigen, dass sich das entwickelte Verfahren der Schaummörtelinjektion in ein Haufwerk aus groben Porenbetongranulaten als ein Verwertungsweg für Porenbetonbruch eignet. Darüber hinaus liefert die Bindemittelvariante 3 insgesamt die vielversprechendsten Ergebnisse. Hierbei wird nämlich bei ausreichend hoher Festigkeit eine sehr niedrige Rohdichte erreicht. Diese führt folglich auch zu den geringsten gemessenen Wärmeleitfähigkeiten. Des Weiteren stellt Variante 3 den attraktivsten Ansatz dar, da durch das Recycling mithilfe einer porenbetonähnlichen Matrix der Schaumstein eine sehr homogene Struktur aufweist. Durch die Autoklavhärtung gibt es darüber hinaus das Potential, dass die Matrix und die alten Granulate ineinander verwachsen und somit die Verbundzone nicht die klassische Schwachstelle eines Kompositbaustoffs darstellt. Als weiteren Vorteil besitzt der leichte Schaumstein in der Porenbetonvariante durch die Homogenität eine gute Recyclingfähigkeit, da der Schaumstein dieser Variante nach Erreichen seiner Lebensdauer wieder diesem Recyclingansatz zugeführt werden kann. Aus diesen Gründen wird in der vorliegenden Arbeit ausschließlich der Schaumstein der Bindemittelvariante 3 weiterverfolgt.

Die Schaummörtelmatrix besitzt zwar das Vorbild eines Porenbetons, weist aber Unterschiede in der Rohstoffzusammensetzung und folglich in den chemischen Umwandlungsprozessen während der Herstellung auf. Der größte Unterschied beim Schaummörtel ist der bereits gelöschte Kalk und das fehlende Aluminium als Treibmittel. Dadurch bleibt der starke Temperaturanstieg nach dem Anmachen des Mörtels aus und der Zementklinker reagiert deutlich langsamer. Hieraus folgt eine längere Ausschfrist für den Schaumstein und die zementreiche Rezeptur des Schaummörtels, um die nötige Frühfestigkeit zu erreichen. Diese hohe Festigkeit beim Ausschalen ist darüber hinaus besonders wichtig, da ein Großteil der Proben im Labor der MPA mittels Druckluft entschalt werden. Auf diese Technik reagieren die Grünlinge besonders empfindlich und können leicht beschädigt werden. Das fehlende

Ablöschen des Kalks führt des Weiteren zu einer höheren Wassermenge, die anfangs ungebunden im Frischmörtel verbleibt. Durch die längere Standzeit der Proben ist außerdem nach Gundlach eine beginnende Lufthärtung des Kalks möglich [vgl. Gundlach (1973), S. 256].

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, besitzt der Sulfatträger als Rohstoffkomponente einen entscheidenden Einfluss auf die hohe Festigkeit von Porenbeton. Durch die in Jahrzehnten weiterentwickelte Rezeptur bildet moderner Porenbeton ein sehr gutes, festigkeitsbildendes Tobermoritgefüge aus. Nach Schlegel und Hums erreiche die Festigkeit dabei ihr Maximum bei einer bestimmten von der Rezeptur und den Autoklavbedingungen abhängigen Härtungsdauer. Über diese Härtezeit hinaus falle die Festigkeit dagegen wieder ab. [Vgl. Schlegel/Hums (2002), S. 86] Durch die fehlende Gips- bzw. Anhydritbeimengung beim Schaummörtel bilden sich Tobermoritkristalle anders aus, was eine geringere Festigkeit bewirken könnte.

Bei der Entwicklung des Schaumsteins an der MPA Bremen zeigte sich, dass die Matrix noch kein perfekt ausgebildetes Tobermoritgefüge darstellt. Wegen der genannten Unterschiede zwischen einem industriellen Porenbeton und der Schaumsteinmatrix lässt sich nun der Stand des Wissens zu Porenbeton nicht einfach auf den Schaummörtel übertragen. Aus der Forschung der MPA geht vielmehr hervor, dass die chemischen Umwandlungsprozesse in der Schaumsteinmatrix während der Autoklavhärtung nicht abgeschlossen sind und bei längerer hydrothormaler Härtedauer weitere CSH-Phasen gebildet werden könnten. Hieraus leitet sich ein Festigkeitspotential ab. [Gespräch mit Herrn Hlawatsch am 07.11.18] Gleichzeitig könnten bei längerer Härtung aber die Porenbetongranulate an Festigkeit verlieren. Diese „Überhärtung“ [Mörtel (1980), S. 57] konnte jedoch nicht nachgewiesen werden [Gespräch mit Frau Küstermann am 05.12.2018]. Das Festigkeitspotential einer längeren Autoklavhärtung wird nun als Gegenstand der vorliegenden Arbeit untersucht.

Ein weiteres Forschungspotential bietet darüber hinaus die Technik der hydrothermalen Härtung. Bisher erfolgte die Härtung der Schaumsteine in einem Laborautoklav der MPA Bremen, der jedoch in seiner Funktionsweise nicht einem Autoklav der industriellen Porenbetonherstellung entspricht. Der wesentliche Unterschied liegt dabei in der Aufheizphase. In dieser Phase wird im Gegensatz zum Industrieautoklav kein externer Wasserdampf eingeleitet. Daher ist die Atmosphäre im Kessel anfänglich trocken und nimmt erst allmählich Wasserdampf auf, indem im Kessel befindliches Wasser während des Temperaturanstiegs zunehmend verdampft. Wie diese Aufdampfphase im Genaueren abläuft und wann eine Sattdampfatmosfera entsteht, lässt sich dabei nicht bestimmen oder kontrollieren. [Gespräch mit Herrn Hlawatsch am 07.11.18]

Durch das Aufheizen des Schaumsteins in einer zunächst trockenen Atmosphäre wird eine negative Beeinflussung der Reaktionsprozesse vermutet. Ein lokales Austrocknen des Steins würde zum Beispiel die Bildung der CSH-Phasen wegen des verringerten Wasserangebots behindern. Durch das Fehlen der energieübertragenden Wasserdampfatmosfera sind darüber hinaus weitere negative Effekte möglich. Auf dieses Problem weisen des Weiteren auch Müller und Kollegen hin [vgl. Müller/Chucholowski/Thienel (2016), S. 28].

Die tatsächlichen Einflüsse auf die Festigkeitseigenschaften des leichten Schaumsteins werden nun in der vorliegenden Arbeit untersucht. Anlass hierzu war die freundliche Bereitschaft der Firma *Wehrhahn GmbH* (Hersteller von Produktionsanlagen für Porenbeton), Proben für das Versuchsprogramm in ihrem industrieähnlichen Autoklav zu härten. Durch diese Möglichkeit kann ein Vergleich zwischen Proben, die innerhalb eines laufenden Forschungsprojekts der MPA im laboreigenen Dampfdruckkessel gehärtet werden, und den eigenen industriell autoklavierten Proben gezogen werden. Da die Untersuchung der laborautoklavierten Proben nicht im Rahmen der vorliegenden Arbeit stattfindet, wird dieser Vergleich auf die Betrachtung der Rohdichte und Festigkeit sowie mikroskopische Untersuchungen beschränkt; bei der Festigkeit werden außerdem die bedeutendsten Unterschiede vermutet. Die Härtung der Schaumsteinproben bei Wehrhahn hat des Weiteren den Vorteil, dass durch ein deutlich höheres Fassungsvermögen des Autoklavs eine hohe Probenanzahl für diese Arbeit realisiert werden kann.

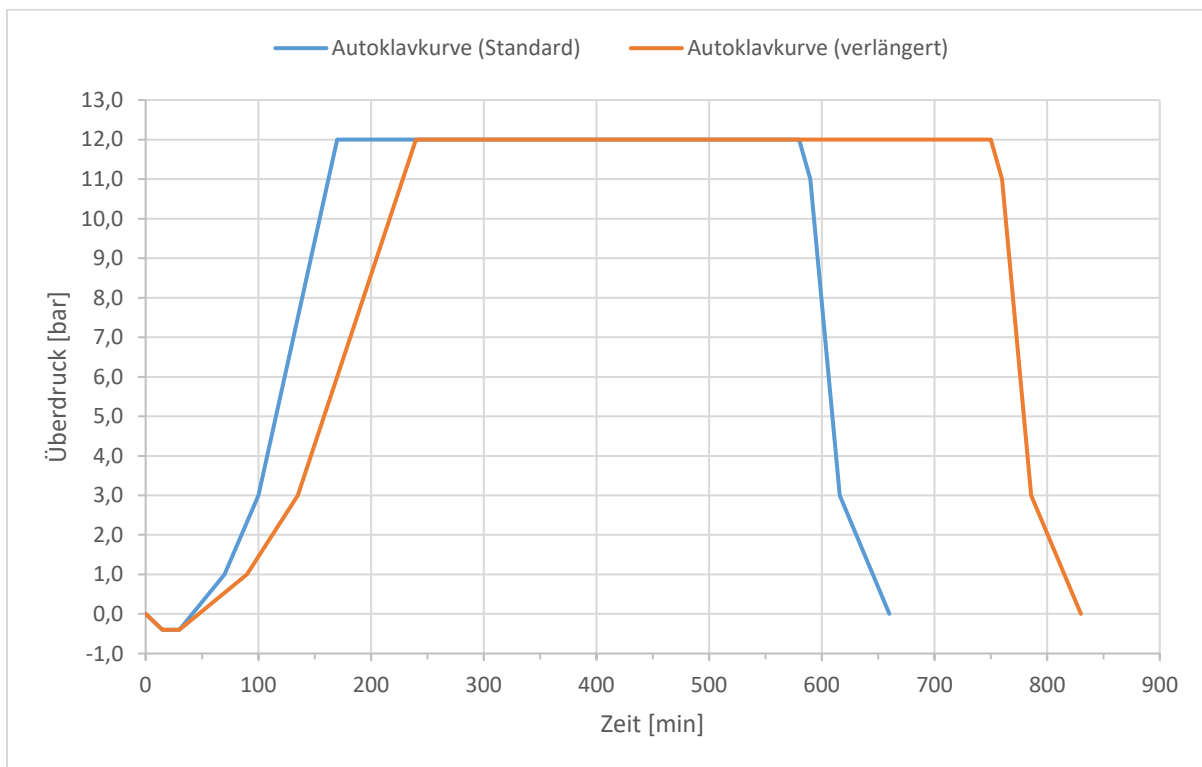


Abbildung 18: Zwei Härtungskurven des Autoklavs

Um darüber hinaus den Einfluss der Härtungsdauer zu untersuchen, werden Proben bei zwei unterschiedlichen hydrothermalen Verläufen im Autoklav von Wehrhahn gehärtet. Die erste Härtungskurve (s. Abbildung 18, blaue Kurve) entspricht dabei einem ungefähren Standard der industriellen Porenbetonproduktion. Dieser Härtungsverlauf wurde gewählt, da er sich in der Porenbetonherstellung bewährt hat und daher gute Ergebnisse verspricht. Außerdem könnte durch diese Härtung bereits wie oben beschrieben die CSH-Bildung im Vergleich zu laborautoklavierten Proben der MPA optimiert werden. Durch eine zweite Härtungskurve (s. Abbildung 18, orangene Kurve) wird folglich untersucht, ob die standardgehärteten Schaumsteine ein (weiteres) Festigkeitspotential aufweisen. Dafür wird die Druckhaltezeit bei 12 bar um 100 Minuten verlängert. Gleichzeitig wird die Aufdampfphase der längeren Härtung

um den Faktor 1,5 verlangsamt, um dem folgenden evtl. auftretenden Effekt vorzubeugen. Durch das Vornässen während der Herstellung befindet sich Wasser in den Granulaten. Ein schnelles Aufheizen im Autoklav würde zu einer plötzlichen Volumenausdehnung des Wassers führen, welche in den Granulaten einen Druck erzeugt. Bei zu hohem Druck (durch zu schnelles Aufheizen) könnten die Granulate aufreißen. Die genauen Verläufe der beiden Härtungskurven sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Daten zu den Härtungskurven aus Abbildung 18

Autoklavkurve (Standard)	Zeit [min]	0	15	30	70	100	170	580	590	616	660
	Überdruck [bar]	0	-0,4	-0,4	1,0	3,0	12,0	12,0	11,0	3,0	0

Autoklavkurve (verlängert)	Zeit [min]	0	15	30	90	135	240	750	760	786	830
	Überdruck [bar]	0	-0,4	-0,4	1,0	3,0	12,0	12,0	11,0	3,0	0

Im Zuge des Festigkeitspotentials soll ein gut ausgebildetes Gefüge des Schaumsteins mit höherer Festigkeit erreicht werden. Im Fall einer gesteigerten Festigkeit könnte darüber hinaus in einer weiteren Entwicklungsstufe eine niedrigere Rohdichte bei immer noch akzeptabler Festigkeit angestrebt werden. Eine geringere Rohdichte ließe sich über einen höheren Schaumgehalt des Schaummörtels einstellen. Die Motivation für diesen Ansatz liegt im primären Ziel einer geringen Wärmeleitfähigkeit von porösen Wandbaustoffen. Daher werden im Rahmen dieser Arbeit zusätzlich Proben mit einem höheren Schaumgehalt (Volumenverhältnis von Bindemittelleim zu Schaum von 1 : 1,5) hergestellt, hydrothermal gehärtet und geprüft.

Außerdem wird wie im Forschungsvorhaben der MPA Bremen zusätzlich der notwendige Grad der Aufbereitung von Porenbetonbruch untersucht, indem sowohl die reinen PB- als auch die verunreinigten RC-Granulate eingesetzt werden. Darüber hinaus werden auch wieder reine Schaummörtelproben hergestellt, um einen Vergleich zwischen der Matrix und dem Schaumstein als Verbundbaustoff ziehen zu können.

Um Eigenschaften der Schaumsteine beurteilen und vergleichen zu können, werden Frischmörteleigenschaften (Rohdichte und Konsistenz) während der Herstellung der Schaumsteine und Feststoffeigenschaften der autoklavierten Proben (Trockenrohichte, Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul und Wärmeleitfähigkeit) untersucht. Die Gefügeausbildung der Schaumsteinmatrix inkl. der Verbundzone zu den Granulaten wird darüber hinaus durch lichtmikroskopische Aufnahmen von Dünnschliffen beobachtet.

5 Versuchsprogramm

Aus Kapitel 4 geht nun folgendes Versuchsprogramm hervor. Insgesamt werden zwölf Probenserien hergestellt (s. Tabelle 6). Dabei wird zum einen das Volumenverhältnis von Bindemittelleim zu Schaum variiert (1 : 1 in der Standardrezeptur und 1 : 1,5 bei höherem Schaumgehalt) und zum anderen werden zwei verschiedene Härtungsdauern vorgesehen

(Standardhärtung und verlängerte Härtung). Außerdem kommen zwei unterschiedliche Granulate als Haufwerksschüttung zum Einsatz (PB- und RC-Granulate). Neben den injizierten Schaumsteinen werden darüber hinaus die reinen (gepumpten) Schaummörtel untersucht. Die Herstellung von Proben, die im Kontext eines Forschungsprojekts der MPA im laboreigenen Autoklav gehärtet werden, bleibt hier unberücksichtigt, da sie nicht Teil der vorliegenden Arbeit ist. Die Eigenschaften dieser Proben lassen jedoch im weiteren Verlauf der Arbeit einen Vergleich zu den eigenen industrieähnlich gehärteten Proben zu.

Tabelle 6: Versuchsprogramm

Bindemittelleim : Schaum = 1 : 1	Schaumstein (PB-Granulate)	Schaumstein (RC-Granulate)	reiner Schaummörtel
Autoklavkurve: Standard	<i>1:1_PB_A</i>	<i>1:1_RC_A</i>	<i>1:1_Schaum_A</i>
Autoklavkurve: verlängert	<i>1:1_PB_A+</i>	<i>1:1_RC_A+</i>	<i>1:1_Schaum_A+</i>

Bindemittelleim : Schaum = 1 : 1,5	Schaumstein (PB-Granulate)	Schaumstein (RC-Granulate)	reiner Schaummörtel
Autoklavkurve: Standard	<i>1:1,5_PB_A</i>	<i>1:1,5_RC_A</i>	<i>1:1,5_Schaum_A</i>
Autoklavkurve: verlängert	<i>1:1,5_PB_A+</i>	<i>1:1,5_RC_A+</i>	<i>1:1,5_Schaum_A+</i>

Jede Probenreihe aus Tabelle 6 weist dabei folgenden Probenumfang auf:

- drei Balken mit den Abmessungen 30 cm · 10 cm · 10 cm für die Bestimmung von Trockenrohichte, Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul
- zwei Würfel mit einer Kantenlänge von 20 cm für Wärmeleitfähigkeitsmessungen
- ein Würfel mit einer Kantenlänge von 15 cm (Schaumstein) bzw. 10 cm (Schaummörtelprobe) für die Herstellung eines Dünnschliffs für die Lichtmikroskopie

Auf die Aufbereitung der Proben für die entsprechenden Feststoffuntersuchungen wird später eingegangen. Die gewählte Probenanzahl war durch vorhandene Schalungen der MPA und die Kapazität des Autoklavs von Wehrhahn begrenzt.

Mit der Firma Wehrhahn konnten vier Termine für eine Autoklavierung vereinbart werden, sodass die Standardrezeptur und die Rezeptur mit höherem Schaumgehalt an jeweils einem Termin standardgehärtet und an einem länger gehärtet wurden (1. Termin: *1:1_A*; 2. Termin: *1:1_A+*; 3. Termin: *1:1,5_A*; 4. Termin: *1:1,5_A+*). Aus diesem Grund und wegen einer mehrfachen Nutzung von Schalungen wurde auch die Herstellung der Proben in vier Einzelherstellungen aufgeteilt. Somit wurden pro Herstellung (für die Schaumsteine in der PB- und RC-Variante und die Schaummörtelproben) neun Balken, sechs 20er-Würfel und drei kleine Würfel produziert. Da dies die Kapazität des Autoklavs von Wehrhahn (s. Abbildung 19) knapp überstieg, wurden zwei zusätzliche Autoklavtermine (A und A+)

vereinbart. Dadurch konnten außerdem Proben, die beim Ausschalen stark beschädigt wurden, in einer weiteren nachträglichen Herstellung ersetzt und an diesen Terminen autoklaviert werden.



Abbildung 19: Autoklav der Firma Wehrhahn GmbH

Die Probenherstellung und -prüfung wurde durch den Autor dieser Arbeit mit Unterstützung der betreuenden wissenschaftlichen Mitarbeiter und einer technischen Mitarbeiterin durchgeführt. Die nachfolgend erläuterte Herstellung der Schaumsteine nimmt Bezug auf Abschnitt 3.2.3, in dem ihr prinzipieller Ablauf bereits beschrieben wurde. Des Weiteren wird die Herstellung beispielhaft an den Balken erläutert.

5.1 Probenherstellung

Zunächst wurden am Vortag einer Herstellung Porenbetongranulate der Korngruppe 8/16 vorgegast. Hierzu wurden sie zehn Minuten lang unter Wasser gesetzt und anschließend 24 Stunden lang zum Abtropfen gelagert (s. Abbildung 20). Die feuchten Granulate wurden anschließend in eingölte Schalungen unter geringem Energieeintrag gefüllt (s. Abbildung 21). Das Haufwerk aus RC-Granulaten war dabei im Mittel etwa 25 % schwerer als die Schüttung aus PB-Granulaten. Der Grund hierfür ist die in Abschnitt 3.2.3 bereits erwähnte höhere mittlere Rohdichte der RC-Granulate durch den älteren Porenbeton und teils schwere Fremdbestandteile. Außerdem wiesen die RC-Granulate augenscheinlich kleinere Körnungen als die PB-Granulate auf, wodurch die Packungsdichte im Haufwerk höher war. Die mit Deckeln verschlossenen Schalungen sind in Abbildung 22 dargestellt. Die Öffnung für den Anschluss des Injektionsschlauchs befindet sich sichtbar im unteren Bereich des Deckels; oben besitzen die Schalungen (nicht sichtbar) die kleinere Austrittsöffnung.



Abbildung 20: Vorgenässte Porenbetongranulate



Abbildung 21: Mit Granulaten befüllte Balkenschalungen



Abbildung 22: Verschlossene Schalungen vor der Schaummörtelinjektion

Im weiteren Verlauf der Herstellung wurden zunächst alle Werkzeuge für die Bearbeitung des Frischmörtels sowie ein Kübel und die Schneckenpumpe mit Wasser befeuchtet. Anschließend wurden die Rohstoffe für den Bindemittelleim nach der Rezeptur aus Tabelle 3 dosiert und in die entsprechende Wassermenge nach und nach mit einem Handrührwerk eingemischt. Nach einer Mischdauer von drei Minuten ist ein homogener Leim entstanden (s. Abbildung 23).

Der im Anschluss mittels Schaumkanone generierte Tensidschaum wurde auf seine Rohdichte kontrolliert, bevor er für die Herstellung des Schaummörtels verwendet worden ist. Ein Volumenverhältnis zwischen Bindemittelleim und Schaum von 1 : 1 bzw. 1 : 1,5 wurde realisiert, indem die Füllhöhe des näherungsweise zylindrischen Kübels vor und nach der Schaumzugabe gemessen wurde. Das darauffolgende Unterheben des Schaums unter den Leim erfolgte behutsam ebenfalls mittels Handrührwerk (s. Abbildung 24). Grundsätzlich werden bei jeder Verarbeitung des Schaummörtels durch den Mischvorgang, das Pumpen und die Injektion Luftporen zerstört. Aus diesem Grund sollte ein unnötig langes Unterrühren des Schaums vermieden werden.



Abbildung 23: Mischen des Bindemittelleims

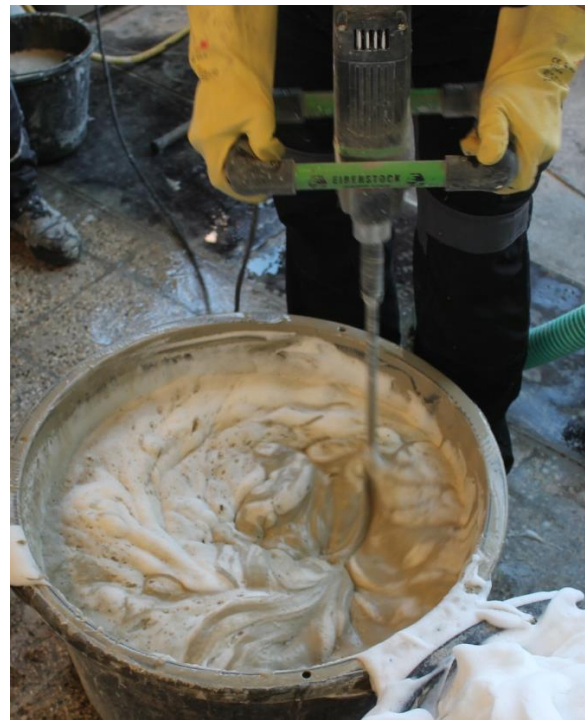


Abbildung 24: Herstellen des Schaummörtels

Um zu beurteilen, wie viele Poren bei der Verarbeitung zerstört werden und wie sich die Frischmörteleigenschaften dabei verändern, wurden die Rohdichte und die Konsistenz in verschiedenen Stadien des Mörtels gemessen. Dabei wurden zunächst der reine Bindemittelleim und anschließend der Schaummörtel direkt nach der Herstellung sowie nach dem Pumpvorgang und nach dem Injektionsdurchlauf untersucht. Für die Bestimmung der Rohdichte wurde das Verfahren aus DIN EN 1015-6 (Bestimmung der Rohdichte von Frischmörtel) angewandt (s. Abbildung 25); dabei wurde das Einfüllverfahren (ohne

Verdichten) gewählt, um die Schaumporen nicht zu zerstören. Für die Bestimmung der Konsistenz wurde außerdem der Auslauftrichterversuch aus der Frischbetonnorm für Selbstverdichtenden Beton (DIN EN 12350-9) durchgeführt (s. Abbildung 26).

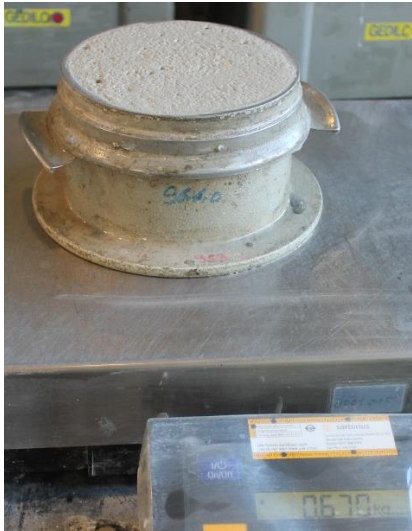


Abbildung 25: Bestimmung der Rohdichte



Abbildung 26: Bestimmung der Konsistenz (Auslauftrichterversuch)

Im nächsten Schritt der Herstellung wurde zunächst der Schaummörtel so lange durch die Schneckenpumpe geführt, bis er am anderen Ende austrat und sich in der Konsistenz augenscheinlich nicht mehr veränderte. Anschließend wurde der Schaummörtel als Erstes in leere, offene Schalungen gepumpt, um die reinen Schaummörtelproben herzustellen (s. Abbildung 27). Für die Injektion der Schaumsteine wurde dann der Pumpenschlauch an die Injektionsöffnung angeschlossen und die Pumpe gestartet. Sobald der Schaummörtel oben aus der Austrittsöffnung austrat (s. Abbildung 28), wurde die Pumpe wieder abgeschaltet. Durch den aufgebauten Injektionsdruck quoll der Mörtel oben noch etwas länger heraus, sodass auch verbliebene Luft noch aus der Schalung austreten konnte. Danach wurde die Austrittsöffnung mit einem Stöpsel verschlossen, die Balkenschalung hingelegt und der Injektionsschlauch wieder abgenommen. Um die Rohdichte und die Konsistenz auch nach der Injektion messen zu können, wurde bei einer bestimmten Schalung (15er-Würfel) ein kleiner Schlauch an die Austrittsöffnung angeschlossen, um den oben austretenden Schaummörtel aufzufangen. Bei manchen Herstellungen funktionierte dies jedoch nicht, da die Austrittsöffnung verstopfte.

Nach abgeschlossener Schaummörtelinjektion wurden die Deckel der Schalungen vorsichtig abgenommen und die Proben bis zur Autoklavhärtung drei Tage lang gelagert. In Abbildung 29 sind die frischen Schaummörtelproben (oben links) und die injizierten Schaumsteine zu sehen. Zum Schluss wurden noch alle Werkzeuge sowie die Schneckenpumpe und die Schaumkanone gereinigt.

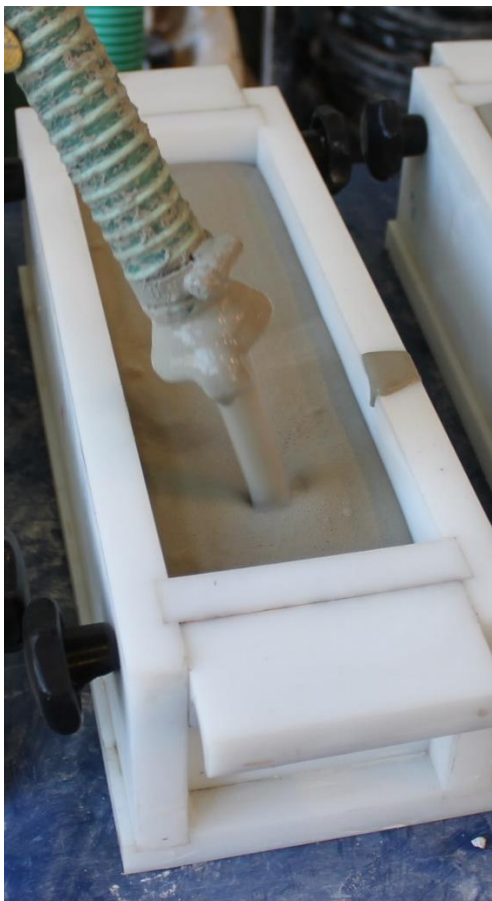


Abbildung 27: Gießen einer Schaummörtelprobe



Abbildung 28: Schaummörtelinjektion



Abbildung 29: Schaummörtelproben (oben links) und injizierte Schaumsteine

Für einen sicheren Transport zum Autoklav der Firma Wehrhahn GmbH verblieben die Proben in der Schalung und wurden erst direkt vor Ort ausgeschalt. Je nach Probenart kamen zwei Entschalungstechniken zum Einsatz. Von den Balkenschalungen wurden die langen beiden Seitenteile einzeln abgenommen, sodass die Probe anschließend herausgelöst werden konnte. Ähnlich konnte auch die Schalung des 10er-Würfels auseinandergenommen werden. Da sich die übrigen Schalungen der größeren Würfel nicht auseinanderbauen ließen, wurden diese Proben mithilfe von Druckluft ausgeschalt. Hierfür wurde die Schalung umgekehrt mit der offenen Seite nach unten zeigend so aufgestellt, dass nach unten der Würfel austreten kann. Anschließend wurde eine Druckluftpistole an einer nun oben liegenden, kleinen Öffnung angesetzt und der Würfel durch einen entstehenden Überdruck herausgepresst. Durch diese Technik wurden die Würfel allerdings nicht einwandfrei herausgelöst, sodass teilweise die oberen Ecken abgebrochen und in der Schalung haften geblieben sind. Durch einen Mitarbeiter von Wehrhahn wurden anschließend die ausgeschalteten Proben in den Autoklav eingesetzt (s. Abbildung 30) und der Härtingsprozess mit der entsprechenden Autoklavkurve gestartet. Außerdem wurden die leeren Schalungen gereinigt und für die nächste Herstellung bereitgestellt. Die autoklavierten Schaumsteinbalken sind in Abbildung 31 zu sehen.



Abbildung 30: Einsetzen der Proben in den Autoklav



Abbildung 31: Autoklavierte Schaumsteine (PB-Variante links, RC-Variante rechts)

5.2 Probenaufbereitung

Die gehärteten Proben wurden als Nächstes für die Prüfungen der Feststoffeigenschaften aufbereitet. Hierzu wurden zunächst die Balken einmal durchgesägt, um daraus ein Prisma für die E-Modul-Bestimmung (20 cm · 10 cm · 10 cm) und einen Würfel für die Prüfung der Druckfestigkeit (Kantenlänge 10 cm) zu erhalten. Bevor diese anschließend weiter aufbereitet worden sind, wurde als Erstes die Trockenrohichte in Anlehnung an die Betonnorm DIN 1048-5 an bei 105 °C getrockneten Proben gemessen.



Abbildung 32: Mit Gips abgegliche Prismen (für die E-Modul-Bestimmung)

Um im weiteren Verlauf eine E-Modul-Prüfung nach dem Verfahren aus DIN 1048-5 durchzuführen, mussten die zu belastenden Flächen der Prismen eben und parallel sein und daher mit Abgleichschichten versehen werden (s. Abbildung 32); für diese war aufgrund der geringen Festigkeit des Schaumsteins ein Gipsmörtel ausreichend. Pro Probenserie standen nun drei abgegliche Prismen und drei Würfel für eine ausreichend genaue Messung von Elastizitätsmodul und Druckfestigkeit zur Verfügung.

Für eine Wärmeleitfähigkeitsmessung mit einem Zweiplattengerät nach DIN EN 12667 werden generell zwei Proben – unterhalb und oberhalb der Heizplatte – benötigt. Für drei Messungen je Probenserie waren demnach sechs Schaumstein- bzw. Schaummörtelproben ursprünglich vorgesehen. Diese sollten als etwa 5 cm dicke Scheiben aus den beiden 20er-Würfeln herausgesägt werden.

Als jedoch ein Fehler aus früheren Wärmeleitfähigkeitsmessungen von Schaumsteinproben festgestellt wurde (vgl. Abschnitt 3.2.3), wurde der geplante Prüfaufbau kurzfristig geändert. Der Fehler wurde dabei in einer zu kleinen Probengröße vermutet. Die zu prüfende Schaumsteinprobe sollte daher im neuen Versuchsplan den gesamten Messausschnitt der Heizplatte bedecken. Das Zweiplattengerät der MPA Bremen besitzt quadratische Heiz- und Kühlplatten von 90 cm · 90 cm, wobei der Messausschnitt der Heizplatte 50 cm · 50 cm groß und der umliegende Schutzring 20 cm breit ist. Um nun eine Schaumsteinprobe von 50 cm · 50 cm prüfen zu können, wurde diese aus mehreren kleineren Proben zusammengesetzt. Vier 20er-Scheiben sollten dabei zu einer 40 cm · 40 cm-Probe aneinandergelegt (s. Abbildung 33) und die fehlenden Randstücke durch Porenbetonelemente ersetzt werden. Für den neuen Prüfaufbau wurden nun also acht etwas dünnere Scheiben aus den beiden 20er-Würfeln benötigt, welche lediglich für eine statt drei Wärmeleitfähigkeitsmessungen verwendet werden konnten.



Abbildung 33: Zusammensetzen von Proben für die Wärmeleitfähigkeitsprüfung

Für die Schaumsteinproben der RC-Variante wurde die externe Herstellung von Dünnschliffen für die Lichtmikroskopie beauftragt. Eine Untersuchung dieser Proben ist ausreichend, um die mikroskopische Struktur der Matrix und der Verbundzone zu beurteilen. Für die Herstellung der Dünnschliffpräparate wurde eine kleine, repräsentative Stelle der entsprechenden 15er-Würfel ausgewählt und herausgesägt sowie mit einer gekennzeichneten Dünnschliffebene eingeschickt. Die fertigen Dünnschliffe waren dann etwa 25 μm dick, in Harz getränkt und auf einer dünnen Glasplatte aufgeklebt.

Im Weiteren wurden die aufbereiteten Proben für die Bestimmung von Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul in einem Klimaraum bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte gelagert. Die Scheiben für die Wärmeleitfähigkeitsmessung wurden des Weiteren in einem Trockenschrank bei 100 °C vollständig getrocknet, um den $\lambda_{10\text{ °C, trocken}}$ -Wert bestimmen zu können.

5.3 Prüfung der Feststoffeigenschaften

Für die Ermittlung der Feststoffeigenschaften wurden zunächst die Druckfestigkeiten der Würfel in Anlehnung an die Betonnorm DIN EN 12390-3 geprüft (s. Abbildung 34), wobei die Belastungsgeschwindigkeit an die geringe Festigkeit der Schaumsteine angepasst wurde und 0,1 N/(mm²·s) betrug. Außerdem wurde der Elastizitätsmodul an den Prismen nach dem Verfahren aus DIN 1048-5 geprüft, wobei auch hier eine von der Norm abweichende Belastungsgeschwindigkeit von 0,2 N/(mm²·s) gewählt wurde. Die Verformung während der Be- und Entlastungszyklen wurde dabei durch einen externen Wegaufnehmer aufgezeichnet (s. Abbildung 35). Auf Grundlage der zuvor ermittelten Würfeldruckfestigkeiten wurde des Weiteren die bei einem Drittel liegende obere Prüfspannung zunächst abgeschätzt. Lag die im Anschluss gemessene reale Druckfestigkeit der Prismen dann niedriger als die geschätzte, wurde eine theoretische Oberspannung für die Berechnung des E-Moduls auf dem Belastungspfad abgelesen. Im anderen Fall war dagegen keine Anpassung möglich. Darüber hinaus wurde keine Probe vorzeitig zerstört, sodass für jedes Prisma ein E-Modul bestimmt werden konnte.

Die für eine Wärmeleitfähigkeitsmessung nach dem Verfahren aus DIN EN 12667 vorgesehenen acht Scheiben aus den beiden 20er-Würfeln konnten nur bei manchen Probenserien realisiert werden. Wegen abgebrochener Ecken während des Ausschalens oder Begrenzungen der Sägetechnik standen dagegen oftmals nur sieben oder sechs Scheiben zur Verfügung. In diesen Fällen wurden Scheiben aus anderen Probenserien ergänzt. Die anschließende Anordnung der Proben inkl. Randsteine im Zweiplattengerät ist in Abbildung 36 erkennbar. Der Schutzring wurde außerdem mit Polystyrolplatten ausgefüllt und die gesamte zusammengesetzte Probe mit einer weichen Matte für einen Ausgleich leichter Unebenheiten bedeckt (s. Abbildung 36 unten). Eine gleichmäßige Oberfläche der zusammengesetzten Probe mit vernachlässigbaren Unebenheiten konnte jedoch wegen größerer Streuungen der Scheibendicke nur bedingt hergestellt werden.

Bei einer jeweiligen Temperaturdifferenz zwischen der Heizeinrichtung und den Kühlplatten von 10 K wurde der Wärmedurchgang in drei Teilmessungen bei unterschiedlichen

Temperaturniveaus (5 - 15 °C; 15 - 25 °C; 25 - 35 °C) untersucht. Bei einer Mitteltemperatur der Probe von 10 °C wurde die Wärmeleitfähigkeit ausgewertet ($\lambda_{10\text{ °C, trocken}}$).



Abbildung 34: Druckfestigkeitsprüfung



Abbildung 35: Prüfung des Elastizitätsmoduls

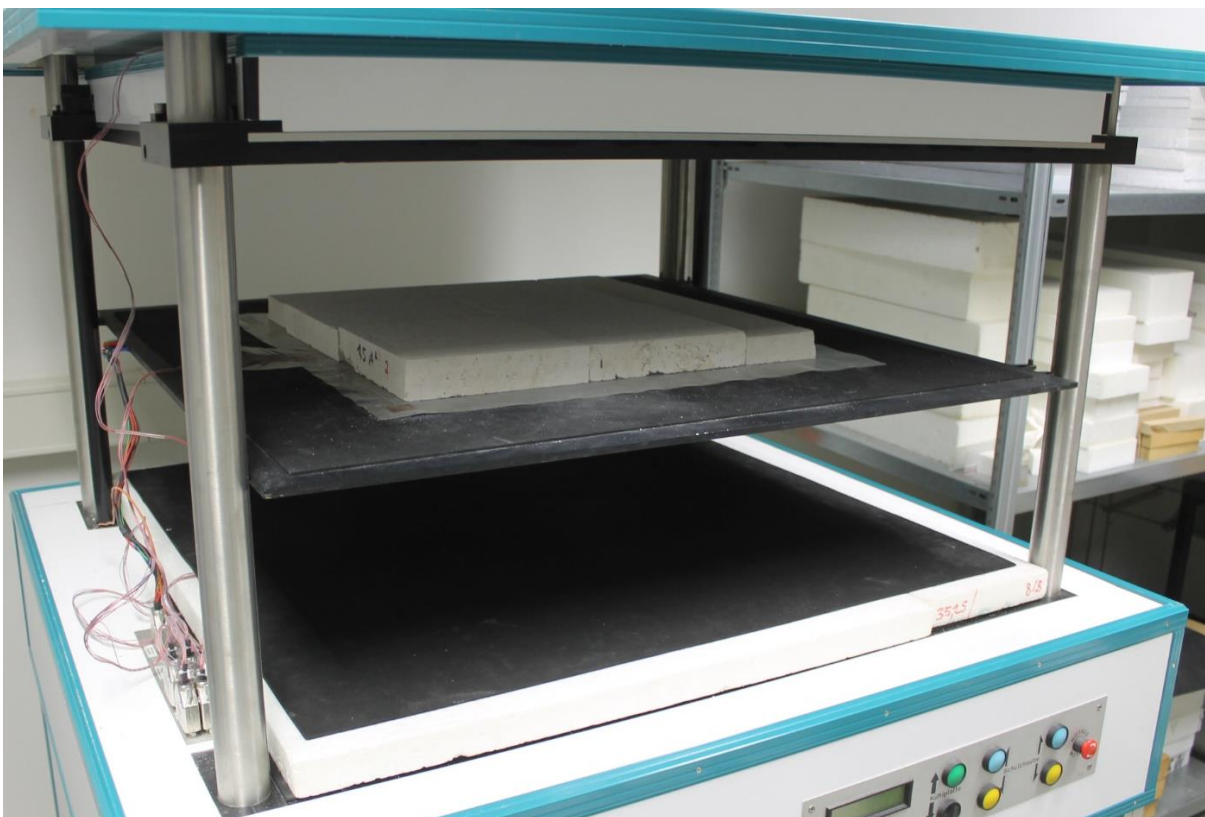


Abbildung 36: Zweiplattengerät zur Prüfung der Wärmeleitfähigkeit

Zuletzt wurde die Lichtmikroskopie der Dünnschliffpräparate durchgeführt. Hierbei kam die Technik der Durchlichtmikroskopie zur Anwendung. Es wurden für die Gefügebildung repräsentative Orte ausgewählt und als digitale Bilder abgespeichert. Für eine gute Vergleichbarkeit zwischen den Proben wurde des Weiteren auf ähnliche Lichtintensitäten und Vergrößerungsfaktoren geachtet.

6 Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse aus den Prüfungen der Frischmörtel- und Feststoffeigenschaften sowie aus optischen Eindrücken und mikroskopischen Untersuchungen aufgeführt und diskutiert. Abschließend werden diese in Schlussfolgerungen zusammenfassend und strukturiert dargestellt.

6.1 Frischmörteleigenschaften

In Tabelle 7 sind die Frischmörteleigenschaften in den verschiedenen Stadien während jeder Herstellung inkl. der nachträglichen aufgeführt. Hieraus ist zunächst ersichtlich, dass sowohl der Bindemittelleim als auch der Tensidschaum gut reproduzierbar waren. Nach Unterheben des Schaums unter den Leim streuen die Eigenschaften des fertigen Schaummörtels dagegen innerhalb einer Rezeptur. Der Grund hierfür liegt in einem unterschiedlich langen Mischen des Schaummörtels. Durch längeres Mischen entsteht dabei ein dichter Mörtel wegen der vermehrten Porenzerstörung. Auch an den Füllständen des Kübels ist erkennbar, dass der Schaummörtel nach dem Mischvorgang durch die ausgetriebenen Luftporen ein verringertes Volumen besitzt. Die größte Höhendifferenz weist dabei Herstellung *III* auf, wodurch die verhältnismäßig hohe Rohdichte dieses Schaummörtels erklärbar ist. Auf der anderen Seite könnte durch zu kurzes Mischen der Schaummörtel noch heterogen sein und dadurch einen Einfluss auf die Messungen haben.

Nach dem Pumpendurchlauf ergeben die Rohdichten der Schaummörtel dagegen ein stimmiges Bild. Die Herstellungen *I* und *II* mit der *1:1*-Rezeptur weisen eine im Mittel 200 g/l höhere Dichte (\varnothing 0,945 kg/l) auf als die Herstellungen *III* und *IV* mit höherem Schaumgehalt (\varnothing 0,745 kg/l). Daraus könnte der Schluss gezogen werden, dass es eine bestimmte Porenmenge gibt, die insgesamt durch das Mischen und den Pumpvorgang zerstört werden. Ein längeres Mischen des Schaummörtels hätte demnach keinen nennenswerten Einfluss auf die Rohdichte des gepumpten Mörtels. Dagegen spricht, dass bei der nachträglichen Herstellung ein wiederholtes Mischen des Schaummörtels zu einem *1:1,5*-Mörtel eine im Vergleich zu den anderen *1:1,5*-Herstellungen höhere Dichte nach der Pumpe zu bewirken scheint.

Nach Stürmer sollte die Rohdichtedifferenz eines Schaummörtels vor und nach der Pumpe 0,3 kg/l nicht übersteigen, um die positiven Eigenschaften des Mörtels zu wahren [vgl. Stürmer (1997), S. 79]. Diese Grenze von 0,3 kg/l entspricht im vorliegenden Fall etwa der mittleren Differenz, wobei die größte Abweichung von 0,42 kg/l auch noch tolerierbar sein dürfte.

Tabelle 7: Frischmörtel Eigenschaften

Herstellung I (1:1_A)	Höhe ¹ [cm]	Dichte [kg/l]	Trichter- auslauf- zeit ² [sec]
Bindemittelleim	14	1,615	1,4
Schaum	28 ³	0,033	
Schaummörtel	27	0,665	2,5
nach Pumpe		0,910	1,5
nach Injektion		n.v.	n.v.

Herstellung III (1:1,5_A)	Höhe ¹ [cm]	Dichte [kg/l]	Trichter- auslauf- zeit ² [sec]
Bindemittelleim	12	1,625	1,3
Schaum	30 ³	0,035	
Schaummörtel	28,5	0,645	3,3
nach Pumpe		0,735	2,6
nach Injektion		1,190	1,6

Herstellung II (1:1_A+)	Höhe ¹ [cm]	Dichte [kg/l]	Trichter- auslauf- zeit ² [sec]
Bindemittelleim	14,5	1,620	1,2
Schaum	29 ³	0,034	
Schaummörtel	28	0,560	2,6
nach Pumpe		0,980	2,6
nach Injektion		n.v.	n.v.

Herstellung IV (1:1,5_A+)	Höhe ¹ [cm]	Dichte [kg/l]	Trichter- auslauf- zeit ² [sec]
Bindemittelleim	12	1,625	1,2
Schaum	30 ³	0,033	
Schaummörtel	29	0,465	6,2
nach Pumpe		0,755	2,1
nach Injektion		1,165	1,1

nachträgl. Herstellung (1:1)	Höhe ¹ [cm]	Dichte [kg/l]	Trichter- auslauf- zeit ² [sec]		Höhe ¹ [cm]	Dichte [kg/l]	Trichter- auslauf- zeit ² [sec]
Bindemittelleim	14	1,625	1,1		1:1-Schaummörtel	17	
Schaum	28 ³	0,034			Schaumzugabe	21,5	
Schaummörtel	27	0,585	2,3		Schaummörtel	21	0,475
nach Pumpe		0,925	1,6		nach Pumpe		0,825

¹ Füllstand des Kübels

² in Anlehnung an DIN EN 12350-9

³ nach Schaumzugabe inkl. Bindemittelleim

Bei den Herstellungen *I* und *II* konnte verfahrensbedingt kein Schaummörtel nach Injektionsdurchlauf zur Untersuchung der Eigenschaften aufgefangen werden. Darüber hinaus war bei der nachträglichen Herstellung kein 15er-Würfel vorgesehen, an dem der injizierte Mörtel hätte geprüft werden können. Aus den vorhandenen Werten der Herstellungen *III* und *IV* geht aber hervor, dass während der Injektion noch einmal zahlreiche Schaumporen zerstört werden, weswegen die Rohdichte deutlich ansteigt (\emptyset 1,18 kg/l).

Die gemessenen Trichterauslaufzeiten in Anlehnung an DIN EN 12350-9 stellen ein Maß für die Konsistenz dar, wobei absolute Aussagen schwierig sind, da die Zeiten generell in einer anderen Größenordnung als bei Selbstverdichtendem Beton liegen. Außerdem wirken sich bei den kurzen Auslaufzeiten die Prüfeinflüsse auf das korrekte Stoppen der Zeit stärker aus. Insgesamt lässt sich aber ein Zusammenhang zur Rohdichte herstellen. Eine höhere Dichte führt

dabei erwartungsgemäß zu einer weicheren Konsistenz. Einzig in Herstellung II bleibt die Konsistenz durch den Pumpvorgang scheinbar unverändert.

Grundsätzlich weist die Herstellungsmethodik der Schaummörtelinjektion verfahrensbedingte Schwankungen auf, welche sich auf die Feststoffeigenschaften auswirken können. Dementsprechend ist der Grad der Porenzerstörung zwischen den Herstellungen und innerhalb der verschiedenen Verarbeitungstechniken nicht konstant. Außerdem sind trotz des eingesetzten Stabilisierers Entmischungen des Schaummörtels möglich. So kann sich zum Beispiel im Kübel der leichtere Tensidschaum nach oben hin absetzen und durch den heterogenen Mörtel eine Rohdichteschwankung während der Herstellung bewirken.

6.2 Optische Eindrücke der autoklavierten Schaumsteine

Nach der Autoklavhärtung waren bei den Schaumsteinen mit RC-Granulaten deutliche Verschmutzungen der Proben sichtbar (s. Abbildung 37). Durch eine chemische Analyse wurde festgestellt, dass es sich dabei um verschiedene Kunststoffe und bituminöse Stoffe handelt, die sich auch in den verwendeten RC-Granulaten wiederfinden. Durch die hohe Temperatur im Autoklav sind diese Stoffe geschmolzen und im Randbereich aus der Probe ausgetreten. In flüssiger Form sind sie außen an der Probe entlanggelaufen oder auf das Rost des Probenregals und ggf. die innere Wandung des Autoklavs abgetropft.



Abbildung 37: Verschmutzungen von Schaumsteinbalken mit RC-Granulaten

Des Weiteren sieht man beispielhaft an einem geschnittenen 20er-Würfel das Ergebnis der Schaummörtelinjektion in ein Haufwerk aus PB-Granulaten (s. Abbildung 38). Hierbei lässt sich feststellen, dass die Matrix einen augenscheinlich guten Verbund zu den Granulaten hergestellt hat und nahezu alle Haufwerksporen mit Schaummörtel verfüllt worden sind. Dies lässt sich auch bei der Probe mit RC-Granulaten beobachten (s. Abbildung 39). Beim Schaumstein mit recyceltem Porenbeton sind darüber hinaus unterschiedliche Färbungen der Granulate sowie verschiedene eingeschlossene Fremdmaterialien zu sehen. Ein Vergleich der Schaumsteinmatrix zu einem nichtinjizierten Schaummörtel lässt sich außerdem durch Abbildung 40 herstellen. Hierbei lässt sich der geringere Porengehalt der Matrix infolge der Injektion erahnen.



Abbildung 38: Schnitt eines Schaumsteins mit PB-Granulaten (20er-Würfel)



Abbildung 39: Schnitt eines Schaumsteins mit RC-Granulaten (20er-Würfel)



Abbildung 40: Schnitt einer Schaummörtelprobe (10er-Würfel)

6.3 Trockenrohichte und Druckfestigkeit

Die Ergebnisse der Trockenrohichte und Druckfestigkeit werden in verschiedene Einflüsse gegliedert. Dabei werden die Auswirkungen der Autoklavtechnik, der Schaummörtelinjektion, der Verwendung von PB- oder RC-Granulaten, der Veränderung des Schaumgehalts sowie der verlängerten Härtungsdauer aufgeführt.

6.3.1 Einfluss der Autoklavtechnik

Im Zuge der Betrachtung der Trockenrohichte und Druckfestigkeit wird als Erstes ein Vergleich zwischen Proben, die innerhalb eines laufenden Forschungsprojekts der MPA im Laborautoklav gehärtet wurden, und den eigenen industrieautoklavierten Proben gezogen (s. Tabelle 8), um den Einfluss der Autoklavtechnik auf die Festigkeitsentwicklung zu beurteilen. Bei letzteren werden hierfür die Proben mit der Standardhärtung (A) und derselben 1:1-Rezeptur wie bei den Proben der MPA für eine gute Vergleichbarkeit herangezogen. Zwei Proben waren des Weiteren Teil der nachträglichen Herstellung.

Tabelle 8: Rohdichten und Festigkeiten von labor- und industrieautoklavierten Proben
[MPA Bremen (2019)]

Laborautoklav (MPA – 1:1)	Trocken- rohichte [kg/m ³]	Druck- festigkeit ¹ [N/mm ²]	Industrieautoklav (Wehrhahn – 1:1_A)	Trocken- rohichte [kg/m ³]	Druck- festigkeit ² [N/mm ²]
Schaumstein (PB-Granulate)	1	650	1	550	4,0
	2	610	2	630	7,2
	3	600	3	630	7,4
	Ø	620	Ø	610	6,2
Schaumstein (RC-Granulate)	1	790	1	670	4,7
	2	820	2	640	3,6
	3	840	3 ³	710	4,9
	Ø	820	Ø	670	4,4
Schaummörtel- probe	1	540	1 ³	580	4,1
	2	570	2	580	4,8
	3	570	3	560	4,5
	Ø	560	Ø	570	4,5

¹ Würfeldruckfestigkeit in Anlehnung an DIN EN 12390-3 (Kantenlänge 15 cm)

² Würfeldruckfestigkeit in Anlehnung an DIN EN 12390-3 (Kantenlänge 10 cm)

³ nachträglich hergestellte Probe

Zunächst sei angemerkt, dass für das Schaumsteinprojekt der MPA ein größerer Probenumfang realisiert werden konnte und daher eigene Würfelproben mit einer Kantenlänge von 15 cm für die Prüfung der Druckfestigkeit hergestellt wurden. Überträgt man nun das Wissen aus der Betontechnologie, fällt die Druckfestigkeit eines 15er-Würfels wegen der höheren

Eintrittswahrscheinlichkeit eines Risses etwas geringer als die eines 10er-Würfels, welcher im eigenen Versuchsprogramm verwendet wurde.

Beim Blick auf die ermittelten Festigkeiten wird dieser Einfluss jedoch vernachlässigbar. Die Druckfestigkeiten der industrieautoklavierten Proben liegen durchweg deutlich höher als die der laborautoklavierten; im Mittel sind sie zwei- bis dreimal so hoch. Bei den Rohdichten ist hingegen bis auf den Schaumstein mit RC-Granulaten kein wesentlicher Unterschied ersichtlich. Die höhere Dichte des MPA-Schaumsteins mit rezyklierten Granulaten dürfte dabei auf eine dichtere Haufwerksschüttung oder Schaummatrix während der Herstellung zurückzuführen sein.

Das deutliche Ergebnis im Festigkeitsvergleich lässt herstellungsbedingte Schwankungen auch wegen der ähnlichen Rohdichten ausschließen. Vielmehr muss ein Einfluss der Autoklavtechnik vorliegen. Hierbei wird vermutet, dass während des Aufheizens im Laborautoklav der MPA wegen der gering wasserdampfhaltigen Atmosphäre Wasser aus der Probe ausdampft und sich dadurch die festigkeitsbildenden CSH-Phasen nur eingeschränkt ausbilden können. Eine ggf. verbleibende Menge nichthydratisierten Zements und ein geringerer Reaktionsumsatz zwischen gelöster Kieselsäure und Kalkhydrat sorgen dabei für die geringere Festigkeitsentwicklung.

6.3.2 Einfluss der Schaummörtelinjektion

Im Folgenden werden nicht mehr die Proben aus dem Forschungsprojekt der MPA, sondern nur noch die eigenen Proben aus dem Versuchsprogramm der vorliegenden Arbeit betrachtet. Die ermittelten Trockenrohichten und Druckfestigkeiten für jede Probenserie sind in Tabelle 9 aufgeführt. Sowohl die Rohdichten als auch die Festigkeiten stammen dabei von den 10er-Würfeln. Des Weiteren wurden fünf nachträglich hergestellte Proben gekennzeichnet.

Zunächst wird festgestellt, dass sowohl die Rohdichte als auch die Festigkeit der injizierten Schaumsteine innerhalb einer Probenserie oft stark streuen. Da ein für die Rohdichte- und Festigkeitsprüfung vorgesehener 10er-Würfel im Zuge der Probenaufbereitung von einem hergestellten Balken abgesägt wurde, wird ein Einfluss vermutet, ob sich der Würfel im Balken auf der Seite der Injektionsöffnung oder der Austrittsöffnung befand. Dieser Einfluss würde implizieren, dass die Eigenschaften durch die Schaummörtelinjektion bedingt über den Balken veränderlich seien. Aus der Zunahme der Frischmörtelrohichte während der Injektion wird im Weiteren ein Dichteanstieg der Schaummörtelmatrix von unten (Einfüllseite) nach oben (Austrittsseite) gefolgert. Eine höhere Dichte könnte darüber hinaus für eine höhere Festigkeit verantwortlich sein. Die aufgestellte Hypothese lautet also, dass ein Würfel vom oberen Ende des Balkens stammend eine höhere Dichte und Festigkeit aufweist als ein vom unteren Ende abgeschnittener Würfel.

Tabelle 9: Rohdichten und Festigkeiten bei unterschiedlichen Härtungsdauern und Schaumgehalten

<i>I:I_A</i>		Trocken- rohichte [kg/m ³]	Druck- festigkeit ¹ [N/mm ²]
Schaumstein (PB-Granulate)	1	550	4,0
	2	630	7,2
	3	630	7,4
	Ø	610	6,2
Schaumstein (RC-Granulate)	1	670	4,7
	2	640	3,6
	3 ²	710	4,9
	Ø	670	4,4
Schaummörtel- probe	1 ²	580	4,1
	2	580	4,8
	3	560	4,5
	Ø	570	4,5

<i>I:I_A+</i>		Trocken- rohichte [kg/m ³]	Druck- festigkeit ¹ [N/mm ²]
Schaumstein (PB-Granulate)	1	660	7,4
	2	500	2,0
	3	510	2,5
	Ø	560	4,0
Schaumstein (RC-Granulate)	1	650	2,7
	2	690	4,3
	3 ²	650	2,8
	Ø	660	3,3
Schaummörtel- probe	1	640	5,7
	2	610	4,8
	3 ²	590	4,4
	Ø	610	5,0

<i>I:1,5_A</i>		Trocken- rohichte [kg/m ³]	Druck- festigkeit ¹ [N/mm ²]
Schaumstein (PB-Granulate)	1	540	2,1
	2	570	3,6
	3	430	0,6
	Ø	520	2,1
Schaumstein (RC-Granulate)	1 ²	590	1,4
	2	550	0,0
	3	620	2,3
	Ø	580	1,3
Schaummörtel- probe	1	470	1,9
	2	450	2,0
	3	440	1,1
	Ø	450	1,6

<i>I:1,5_A+</i>		Trocken- rohichte [kg/m ³]	Druck- festigkeit ¹ [N/mm ²]
Schaumstein (PB-Granulate)	1	480	0,5
	2	480	1,5
	3	480	1,6
	Ø	480	1,2
Schaumstein (RC-Granulate)	1	540	0,0
	2	530	0,5
	3	570	0,2
	Ø	550	0,3
Schaummörtel- probe	1	490	2,8
	2	460	1,6
	3	470	1,5
	Ø	470	1,9

¹ Würfeldruckfestigkeit in Anlehnung an DIN EN 12390-3 (Kantenlänge 10 cm)

² nachträglich hergestellte Probe

Für eine Verifizierung der Annahme wurden die druckgeprüften Würfel begutachtet, um die Einfüllseite bzw. das Austrittsende im Nachhinein zuordnen zu können. Bei den meisten Proben war dies auch möglich, da sich die Austrittsöffnung in der Oberfläche der Probe widerspiegelte. Das Ergebnis dieser Untersuchung beweist nun jedoch das Gegenteil der aufgestellten These. Die dichteren und festeren Würfel innerhalb einer Schaumsteinserie stammten ausnahmslos von der Einfüllseite der Balken ab.

Um dieses von der Einfüllseite aus betrachtende Dichte- und Festigkeitsgefälle der Balken zu bestätigen, wurden zusätzlich die Rohdichten und Festigkeiten der ebenfalls von den Balken stammenden Prismen herangezogen. Eine gemeinsame Betrachtung von Würfeln und Prismen kommt zu demselben Ergebnis. Sowohl die Rohdichte als auch die Festigkeit eines jeden Schaumsteinbalkens nimmt über den Weg des Injektionsschaummörtels ab. Lediglich bei einem der 24 injizierten Balken bleibt die Festigkeit konstant. Graphisch ist dieses Ergebnis in Abbildung 41 und Abbildung 42 dargestellt. In die beiden Diagramme fließen alle ermittelten Druckfestigkeiten und Rohdichten der Schaumsteine – getrennt nach den beiden Granulatvarianten – ein. Im Durchschnitt sind die Würfel bzw. Prismen von der Einfüllseite 60 kg/m^3 schwerer und besitzen eine um $1,7 \text{ N/mm}^2$ höhere Druckfestigkeit. Der Einfluss der Geometrie auf die Druckfestigkeiten der Würfel und Prismen bleibt hierbei unberücksichtigt. Außerdem wurde die Zuordnung von Einfüllseite und Austrittsende in den wenigen Fällen, wo dies nicht sicher möglich war, vermutend ergänzt.

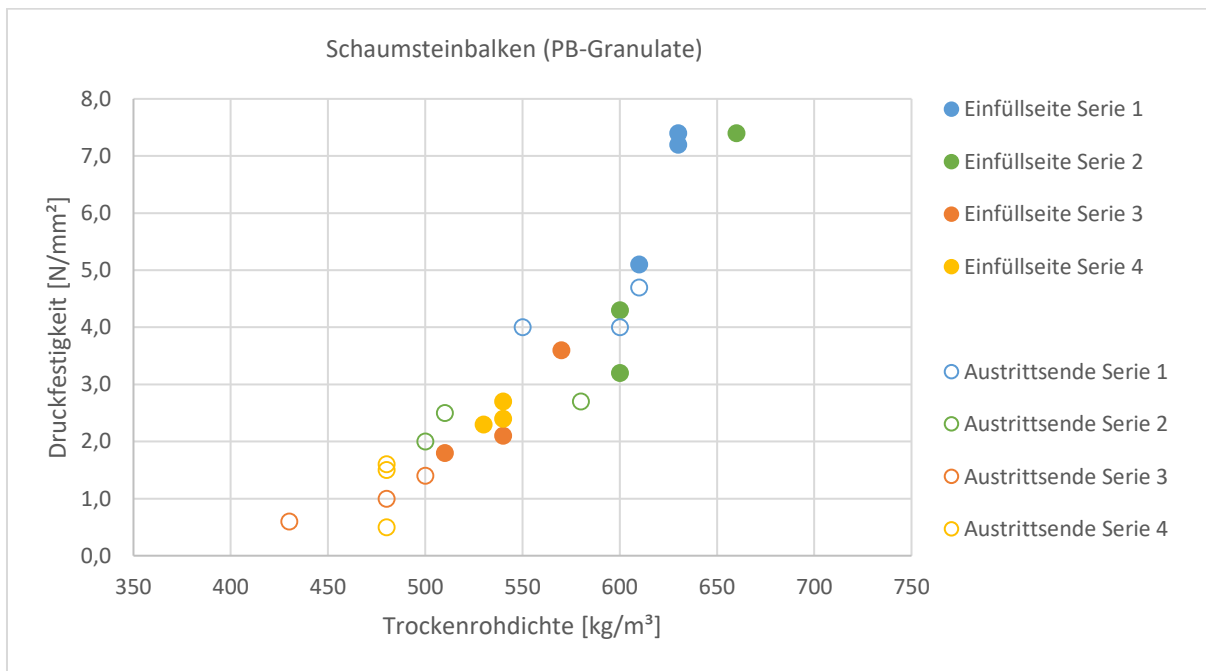


Abbildung 41: Rohdichte- und Festigkeitsgefälle der Schaumsteinbalken (PB-Granulate) in Richtung Austrittsende des Injektionsschaummörtels

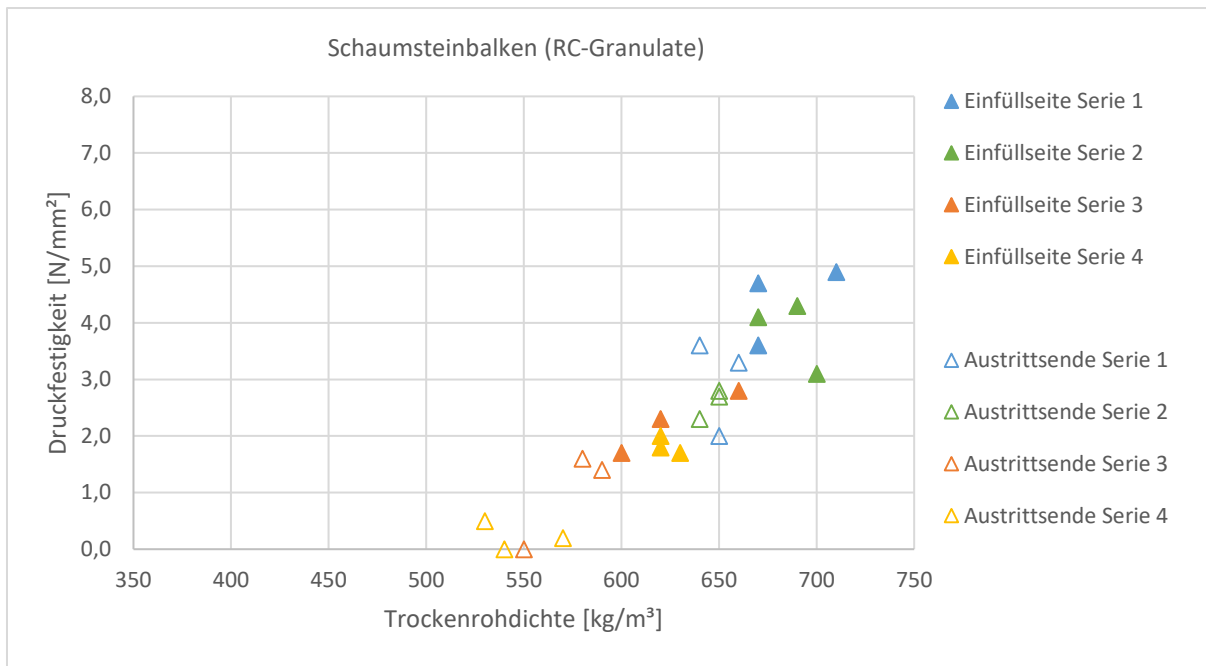


Abbildung 42: Rohdichte- und Festigkeitsgefälle der Schaumsteinbalken (RC-Granulate) in Richtung Austrittsseite des Injektionsschaummörtels

Für die Erforschung der Ursache des Dichtegefälles wurden druckgeprüfte Prismen und Würfel von drei Balken aus einer Probenserie (*I:1_PB_A+*) untersucht. Bei diesen war die Zuordnung von Einfüllseite und Austrittsseite eindeutig und die Würfel und Prismen wurden außerdem so zusammengesetzt, wie sie im Balken ursprünglich angeordnet waren. Jeder Balken wurde daraufhin in einer beim Würfel und Prisma gleichen Ebene einmal längs durchgeschnitten, um die innere Struktur sichtbar zu machen. In Abbildung 43 bis Abbildung 45 sind die drei Balkenschnitte dargestellt, wobei sich die Einfüllseite jeweils unten und das Austrittsseite oben befindet. Der Würfel des ersten Balkens stammt also im Gegensatz zu den anderen beiden Balken von der Einfüllseite ab. Des Weiteren besitzen die Prismen Abgleichschichten für die Elastizitätsmodul-messung.

In den geschnittenen Balken wird sichtbar, dass im oberen Bereich manche Granulate nicht vollständig mit der Matrix umschlossen sind. Vor allem in Abbildung 43 sind größere Luftporen erkennbar. An diesen Stellen sind die Granulate nicht optimal in den Schaummörtel eingebettet. Erkennbare Risse dürften auf die Belastung während der Druckprüfung zurückzuführen sein. Durch die augenscheinlich fehlerfreien unteren Bereiche lässt sich nun ein herstellungsbedingter Einfluss auf das Dichtegefälle ableiten. Der von unten injizierte Schaummörtel füllt den Haufwerksporenraum auf der Einfüllseite besser als nahe der Austrittsöffnung. Daraus wird gefolgert, dass der Füllstand in der Schalung während der Injektion nicht gleichmäßig über die Querschnittsfläche ansteigt. Der Schaummörtel tritt demnach am oberen Ende aus, bevor er über verschiedene Wege alle Granulate im oberen Bereich erreichen und umhüllen konnte. Durch das Beenden der Injektion kurz nach Mörtelaustritt verbleiben nicht oder nicht vollständig gefüllte Haufwerksporen nahe der Austrittsöffnung im Schaumstein.

Tabelle 10: Rohdichten und Festigkeiten der Balken aus folgenden Abbildungen

Balken Nr. 1	Balken Nr. 2	Balken Nr. 3
<u>Prisma:</u> $\rho_{Rd} = 580 \text{ kg/m}^3$; $f_c = 2,7 \text{ N/mm}^2$	<u>Würfel:</u> $\rho_{Rd} = 500 \text{ kg/m}^3$; $f_c = 2,0 \text{ N/mm}^2$	<u>Würfel:</u> $\rho_{Rd} = 510 \text{ kg/m}^3$; $f_c = 2,5 \text{ N/mm}^2$
<u>Würfel:</u> $\rho_{Rd} = 660 \text{ kg/m}^3$; $f_c = 7,4 \text{ N/mm}^2$	<u>Prisma:</u> $\rho_{Rd} = 600 \text{ kg/m}^3$; $f_c = 4,3 \text{ N/mm}^2$	<u>Prisma:</u> $\rho_{Rd} = 600 \text{ kg/m}^3$; $f_c = 3,2 \text{ N/mm}^2$



Abbildung 43: Schnitt des Balkens Nr. 1 (1:1_PB_A+)



Abbildung 44: Schnitt des Balkens Nr. 2 (1:1_PB_A+)



Abbildung 45: Schnitt des Balkens Nr. 3 (1:1_PB_A+)

Mit Blick auf die Rohdichten und Festigkeiten der drei Balken (s. Tabelle 10) wird außerdem festgestellt, dass der Einfluss der nicht verfüllten Haufwerksporen über das obere Drittel des Balkens hinaus merkbar ist. So besitzt der untenliegende Würfel aus dem ersten Balken eine höhere Rohdichte und eine deutlich höhere Festigkeit als die Prismen der anderen beiden Balken. Die Schwachstelle der beiden Prismen liegt demnach im oberen Bereich. Diese

Aussage lässt sich dadurch stützen, dass die Rissbildung infolge der Druckprüfung im oberen, äußerlich sichtbaren Bereich der Prismen deutlich ausgeprägter zu sein schien.

Das gewonnene Ergebnis steht im Widerspruch mit der ursprünglich aufgestellten Hypothese eines Rohdichteanstiegs innerhalb der Balken. Zum einen könnten die nicht verfüllten Haufwerksporen einen stärkeren Einfluss als die Zunahme der Frischmörtelrohdsichte während der Injektion ausüben und dadurch dieses Resultat begründen. Zum anderen könnte auch die Annahme fehlerhaft gewesen sein, dass sich die Differenz der Schaummörtelrohdsichte gleichmäßig auf die Länge des Balkens abbilden lässt. Im letzteren Fall könnte zum Beispiel auch der überwiegende Teil der Luftporen bereits direkt nach Eintritt des Injektionsschaummörtels bei ersten Windungen um scharfkantige Granulate zerstört worden sein. Dadurch würde der größte Anstieg der Rohdsichte bereits nahe der Einfüllöffnung stattfinden und sich die Dichte in Richtung Austrittsöffnung nicht mehr nennenswert erhöhen.

6.3.3 Einfluss der Granulate

Anhand der Trockenrohdsichten und Druckfestigkeiten aus Tabelle 9 werden in diesem Abschnitt die Schaumsteine beider Granulatvarianten und die reinen Schaummörtelproben gegenübergestellt, um den Einfluss der Granulate zu untersuchen. Wegen der Schwankung der Rohdsichte innerhalb einer Probenserie, die neben dem im vorherigen Abschnitt beschriebenen Einfluss der Schaummörtelinjektion auch andere herstellungsbedingte Ursachen hat, werden die ermittelten Festigkeits- und Rohdichtewerte grundsätzlich gemeinsam betrachtet. Dadurch können die Festigkeiten besser interpretiert werden. Zum Schluss wird außerdem ein kurzer Vergleich zu primärem Porenbeton gezogen, um die Werte einzuordnen.

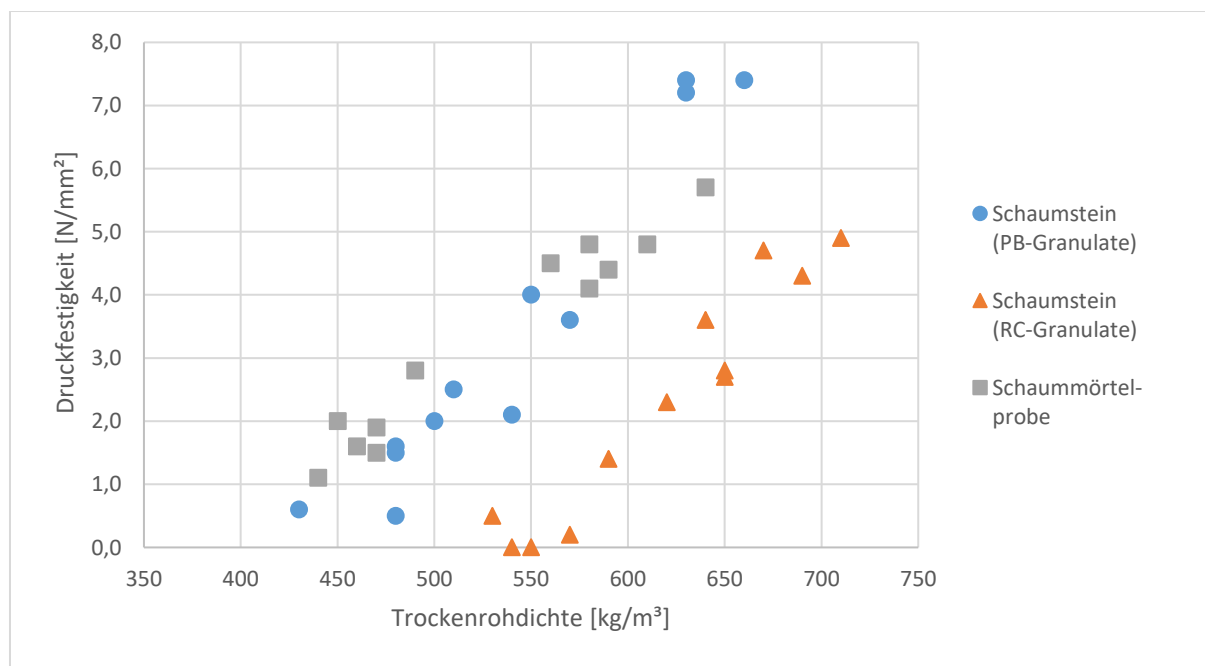


Abbildung 46: Vergleich der Rohdsichte und Festigkeit zwischen Schaumsteinen aus PB- und RC-Granulaten und Schaummörtelproben

Die in Abbildung 46 aufgetragenen Trockenrohddichten und Druckfestigkeiten lassen die Abhängigkeit zwischen diesen beiden Eigenschaften deutlich erkennen. Sowohl die Proben der beiden Schaumsteinvarianten als auch die Mörtelproben folgen dabei grob dem Prinzip aller Baustoffe, dass bei höherer Festigkeit auch die Rohdichte ansteigt.

In einem Vergleich der beiden Schaumsteinvarianten wird festgestellt, dass die Schaumsteine mit RC-Granulaten schlechtere Eigenschaften erzielen, da sie bei gleicher Festigkeit eine höhere Rohdichte besitzen. Dies lässt sich durch die höhere Rohdichte der RC-Granulate begründen, die wegen der Matrix als Schwachstelle keine gleichzeitig gesteigerte Festigkeit bewirken. Die teilweise schweren Fremdbestandteile als Teil des RC-Materials lassen die Rohdichte des Schaumsteins ebenfalls ansteigen. Diese Fremdstoffe sind darüber hinaus auch für geringere Festigkeiten verantwortlich, da sie zum Beispiel als glatte Kunststoffteile ohne Verbund zur Matrix Schwachstellen im Gefüge darstellen und den Bruch beschleunigen. So erreicht der Schaumstein mit RC-Granulaten ein Festigkeitsmaximum von lediglich $4,9 \text{ N/mm}^2$ anstelle einer maximalen Druckfestigkeit des Schaumsteins mit PB-Granulaten von $7,4 \text{ N/mm}^2$.

Die Schaummörtelproben erreichen des Weiteren ähnliche Eigenschaften wie die Schaumsteine mit PB-Granulaten. Wie in Abbildung 46 ersichtlich, liegen die Festigkeiten von leichteren Proben zwar tendenziell etwas höher, aber den Durchschnitt betrachtend haben die Ergebnisse eine hohe Übereinstimmung. So besitzen die Schaumsteine in der PB-Variante bei einer Rohdichte von 540 kg/m^3 eine Druckfestigkeit von $3,4 \text{ N/mm}^2$, während die Schaummörtelproben bei einer Dichte von 530 kg/m^3 eine Festigkeit von $3,3 \text{ N/mm}^2$ erreichen. Hieraus lässt sich schließen, dass der eingesetzte Schaummörtel eine porenbetonähnliche Matrix ausbildet und darüber hinaus einen guten Verbund zu den Granulaten herstellt. Somit wird durch den Schaumstein mit PB-Granulaten ein sehr homogener Verbundbaustoff erzielt.

Um den aus PB-Granulaten bestehenden Schaumstein hinsichtlich seiner Eigenschaften mit primärem Porenbeton zu vergleichen, werden die Porenbetondaten zur Rohdichte und Druckfestigkeit aus Abschnitt 2.4 herangezogen. Zu beachten ist, dass es sich bei den Steinfestigkeitsklassen um zu erreichende Mindestwerte handelt. Porenbeton erreicht hierbei bis zu einer Rohdichte von 500 kg/m^3 bessere Eigenschaften als der Schaumstein. Zum einen liegen die Schaumsteinproben bei etwa 500 kg/m^3 unterhalb der Steinfestigkeitsklasse 4 und zum anderen erreicht Porenbeton in der Steinfestigkeitsklasse 2 niedrigere Rohdichten. Bei den höheren Rohdichteklassen 600 kg/m^3 und 650 kg/m^3 liegen die Festigkeiten vom Schaumstein mit PB-Granulaten und Porenbeton dagegen auf einem etwa gleichen Niveau.

6.3.4 Einfluss des Schaumgehalts

In diesem Abschnitt werden die Trockenrohddichte und die Druckfestigkeit der beiden unterschiedlichen Schaumgehalte gegenübergestellt. In Abbildung 47 sind die Proben der Standardrezeptur ($1:1$) und die mit höherem Schaumgehalt ($1:1,5$) aufgeführt. Die Ausprägung der unterschiedlichen Schaumgehalte ist dabei deutlich zu erkennen. Die erwartungsgemäß niedrigeren Rohdichten der schaumreichen Proben gehen mit ebenfalls geringeren Festigkeiten einher. Im Durchschnitt sind die Proben mit höherem Schaumgehalt etwa 100 kg/m^3 leichter und besitzen eine um 3 N/mm^2 niedrigere Druckfestigkeit.

Drei Schaumsteinproben mit PB-Granulaten aus der 1:1-Rezeptur bilden hierbei eine Ausnahme, da die Rohdichten dieser Proben (500 kg/m^3 , 510 kg/m^3 und 550 kg/m^3) im Bereich der schaumreichen Proben liegen. Der Einfluss der Schaummörtelinjektion aus Abschnitt 6.3.2 relativiert dieses Ergebnis jedoch, da alle drei Proben vom Austrittsende eines Balkens abstammen und dadurch bedingt eine geringe Rohdichte und Festigkeit aufweisen. Hieraus wird weiterhin gefolgert, dass der höhere Schaumgehalt sich in ähnlicher Weise auf die Rohdichte und Festigkeit auswirkt wie die unzureichend verfüllten Haufwerksporen nahe der Austrittsöffnung durch den Einfluss der Injektion.

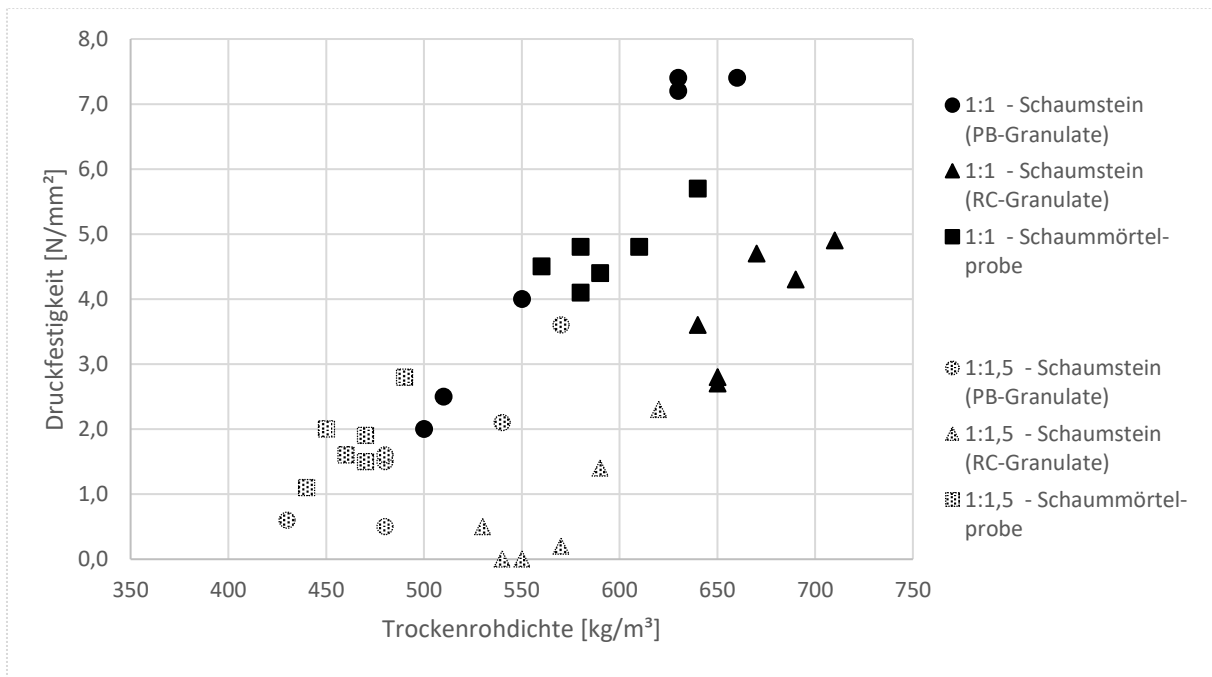


Abbildung 47: Vergleich der Rohdichte und Festigkeit zwischen den beiden Schaumgehalten (1:1 und 1:1,5)

6.3.5 Einfluss der Härtungsdauer

Abschließend wird der Einfluss der Härtungsdauer auf die Festigkeitseigenschaften der Schaumsteine als Hauptmotiv der vorliegenden Arbeit untersucht. Die beiden untersuchten Härtungskurven A (Standardhärtung) und A+ (verlängerte Aufdampfphase und Druckhaltezeit) sind in Abbildung 48 entsprechend den Proben zugeordnet. Die Festigkeiten werden auch in diesem Fall im Kontext der Rohdichte betrachtet, um die Einflüsse der Schaummörtelinjektion und des Schaumgehalts herauszufiltern.

Insgesamt ist kein Einfluss der Härtungsdauer feststellbar. Wie in Abbildung 48 ersichtlich, fügen sich die länger autoklavierten Proben nahtlos in die Werte der Standardhärtung ein. Leichte Unterschiede liegen dabei innerhalb normaler Streuungen. Auch rechnerisch ist kein bedeutsamer Unterschied zwischen den beiden Härtungsdauern nachweisbar: Eine Differenz zwischen den durchschnittlichen Festigkeiten von normal- und länger gehärteten Proben geht bei allen drei untersuchten Probenarten einher mit einer entsprechenden Differenz der Rohdichte und gibt somit keinen Ausschlag.

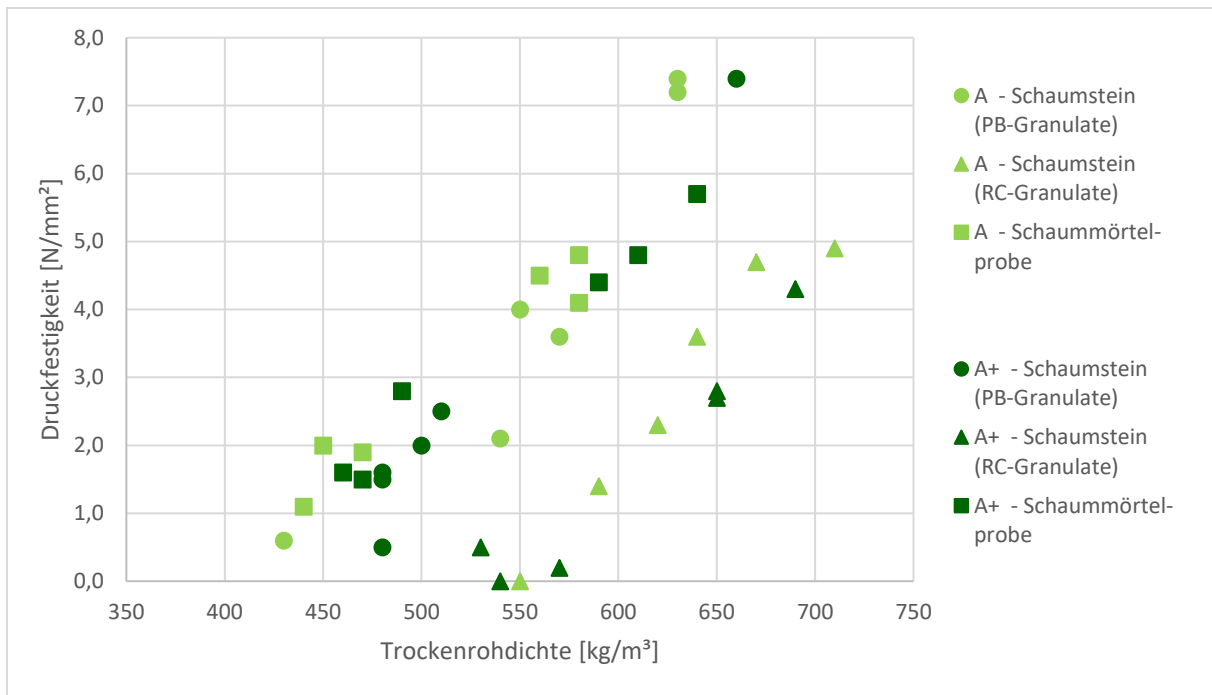


Abbildung 48: Vergleich der Rohdichte und Festigkeit zwischen den beiden Härtungsdauern (A und A+)

6.4 Elastizitätsmodul

Die ermittelten Elastizitätsmoduln der Proben sind in Tabelle 11 aufgelistet. Dabei werden Werte zwischen 500 N/mm² und 1300 N/mm² erreicht. Der E-Modul des Schaumsteins bzw. der Schaummörtelprobe liegt somit generell niedriger als der von Porenbeton (1200 N/mm² bis 2500 N/mm²) [vgl. Röpfer Baustoffe (2018), o. S.].

Tabelle 11: Elastizitätsmoduln bei unterschiedlichen Härtungsdauern und Schaumgehalten

		Elastizitätsmodul ¹ [N/mm ²]			
		1:1_A	1:1_A+	1:1,5_A	1:1,5_A+
Schaumstein (PB-Granulate)	1	1300	1000	600	800
	2	1200	1100	600	900
	3	1200	1100	800	800
	Ø	1200	1100	700	800
Schaumstein (RC-Granulate)	1	1000	900	900 ²	700
	2	1100	800	700	700
	3	900 ²	1100 ²	700	700
	Ø	1000	900	800	700
Schaummörtel- probe	1	1000 ²	1100	600	700
	2	800	1100	500	600
	3	800	900 ²	500	700
	Ø	900	1000	500	700

¹ in Anlehnung an DIN 1048-5

² nachträglich hergestellte Probe

Die Werte des Elastizitätsmoduls zeigen eine Abhängigkeit zur Rohdichte. Die leichteren Proben aus der 1:1,5-Rezeptur weisen dabei einen niedrigeren E-Modul auf als die Proben mit normalem Schaumgehalt. Eine Ausnahme hiervon bildet lediglich die nachträglich hergestellte Probe aus der Serie 1:1,5_A. Generell erzielen die fünf Prismen aus der nachträglichen Herstellung höhere Abweichungen zu den jeweils anderen beiden Proben einer Serie. Hieraus könnte auf eine eingeschränkte Reproduzierbarkeit der elastischen Eigenschaften oder auf herstellungsbedingte Schwankungen geschlossen werden.

Des Weiteren sind bedeutsame Unterschiede zwischen den Probenarten nicht zu erkennen. Der Elastizitätsmodul schwankt hierbei zwischen 800 N/mm² und 1300 N/mm² beim normalen Schaumgehalt und zwischen 500 N/mm² und 900 N/mm² bei der 1:1,5-Rezeptur. Dabei fallen die Schaumsteine mit PB-Granulaten der Prüfserie 1:1_A und die Schaummörtelproben der Serie 1:1,5_A nur geringfügig aus der Reihe. Darüber hinaus bleibt auch die Härtungsdauer ohne Einfluss auf den Elastizitätsmodul.

6.5 Wärmeleitfähigkeit

Die Ergebnisse aus der Wärmeleitfähigkeitsprüfung sind in Tabelle 12 aufgeführt. Hierbei sind neben den $\lambda_{10 \text{ °C, trocken}}$ -Werten auch die mittleren Trockenrohdsichten der geprüften Proben ersichtlich. Zunächst wird festgestellt, dass sich die Werte der Wärmeleitfähigkeit in einer anderen Größenordnung als frühere Messwerte der MPA (vgl. Abschnitt 3.2.3) befinden. Mit im Mittel 0,120 W/(m·K) sind die Werte dabei deutlich realistischer als das damalige Messergebnis von etwa 0,05 W/(m·K). Durch die Anpassung des Prüfaufbaus (vgl. Abschnitt 5.2) könnte demnach der Fehler im Prüfverfahren der MPA behoben worden sein.

Ob dies tatsächlich der Fall ist, wurde mithilfe einer externen, unabhängigen Prüfstelle untersucht. Hierbei wurde die Wärmeleitfähigkeitsprüfung einer Schaumsteinprobe mit RC-Granulaten und normalem Schaumgehalt aus dem Schaumsteinprojekt der MPA in Auftrag gegeben. Die Probe umfasste dabei zwei 20er-Scheiben mit einer mittleren Rohdichte von 650 kg/m³, die in einem Zweiplattengerät mit passender Heizeinrichtung (200 mm · 200 mm) geprüft wurden. Der extern ermittelte Wert von 0,162 W/(m·K) liegt bedeutend höher als die entsprechende, im Rahmen dieser Arbeit ermittelte Wärmeleitfähigkeit von 0,142 W/(m·K) bzw. 0,136 W/(m·K).

Diese Differenz von etwa 0,02 W/(m·K) ist entweder auf einen weiterhin bestehenden Fehler des MPA-eigenen Prüfverfahrens oder auf starke Prüfeinflüsse wegen des unterschiedlichen Prüfaufbaus zurückzuführen. Letztere gehen auf das Zusammensetzen einzelner Scheiben zu einer großflächigen Probe zurück. Dabei werden Luftspalte zwischen den aneinandergelegten Scheiben sowie zwischen diesen und den Porenbetonrandsteinen eingeschlossen, die das Prüfergebnis beeinflussen. Ein starker Einfluss wird auch in der Unebenheit der zusammgelegten Probe vermutet. Während der Prüfungen entstanden häufig leichte Stufen an den Probenübergängen, da beispielsweise für jede Probenserie dieselben Randsteine einer bestimmten Höhe verwendet wurden, die Dicke der Scheiben jedoch schwankte. Diese Unebenheiten konnten durch die verwendete Matte nur bedingt ausgeglichen werden, sodass

auch hierbei Luft eingeschlossen wurde. Darüber hinaus kamen auch beschädigte Scheiben zum Einsatz, bei denen zum Beispiel Ecken abgebrochen waren.

Tabelle 12: Wärmeleitfähigkeiten bei unterschiedlichen Härtungsdauern und Schaumgehalten

<i>I:I_A</i>	Trockenrohddichte ¹ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit ² [W/(m·K)]	<i>I:I_A+</i>	Trockenrohddichte ¹ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit ² [W/(m·K)]
Schaumstein (PB-Granulate) $\frac{1}{2}$	610	0,134	Schaumstein (PB-Granulate) $\frac{1}{2}$	550	0,123
Schaumstein (RC-Granulate) $\frac{1}{2^3}$	680	0,142	Schaumstein (RC-Granulate) $\frac{1}{2}$	640	0,136
Schaummörtelprobe $\frac{1}{2}$	530	0,118	Schaummörtelprobe $\frac{1}{2}$	590	0,115

<i>I:I,5_A</i>	Trockenrohddichte ¹ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit ² [W/(m·K)]	<i>I:I,5_A+</i>	Trockenrohddichte ¹ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit ² [W/(m·K)]
Schaumstein (PB-Granulate) $\frac{1}{2}$	550	0,118	Schaumstein (PB-Granulate) $\frac{1}{2}$	510	0,118
Schaumstein (RC-Granulate) $\frac{1}{2}$	610	0,126	Schaumstein (RC-Granulate) $\frac{1}{2}$	600	0,118
Schaummörtelprobe $\frac{1^3}{2^3}$	400	0,098	Schaummörtelprobe $\frac{1^3}{2^3}$	420	0,097

¹ mittlerer Wert der beiden Proben

² mit einem Zweiplattengerät in Anlehnung an DIN EN 12667

³ nachträglich hergestellte Probe

Trotz der nicht unbedeutenden Prüfeinflüsse wird ein weiterhin vorhandener Fehler in der Prüfeinrichtung vermutet, da alle ermittelten Werte im Vergleich zur Kontrollmessung zu niedrig erscheinen. Aus diesem Grund lassen sich die gewonnenen Werte nicht in einen übergeordneten Kontext einordnen, sondern nur untereinander vergleichen.

In einer graphischen Darstellung der Ergebnisse (s. Abbildung 49) wird ersichtlich, dass sich die Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit von der Trockenrohddichte, ähnlich wie bei primärem Porenbeton nach Künzel [vgl. Künzel (2003), S. 3], in etwa auf einer Geraden bewegen. Innerhalb jeder Probenart stellen dabei die beiden niedrigeren Rohdichten die Proben mit höherem Schaumgehalt dar. Signifikante Unterschiede zwischen den Probenarten, die über den Einfluss der Rohdichte hinausgehen, sind nicht erkennbar. Mögliche Abweichungen können jedoch generell schwächer ausgeprägt werden wegen weiterer Prüfeinflüsse. Sowohl der kontinuierlich eingesetzte Porenbetonrahmen als auch das gegenseitige Ersetzen fehlender Proben, wenn keine acht Scheiben zur Verfügung standen, lassen die Ergebnisse etwas vereinheitlichen. Darüber hinaus wird die Interpretation der Ergebnisse erschwert, weil nur ein Wert für jede der zwölf Probenserien ermittelt wurde.

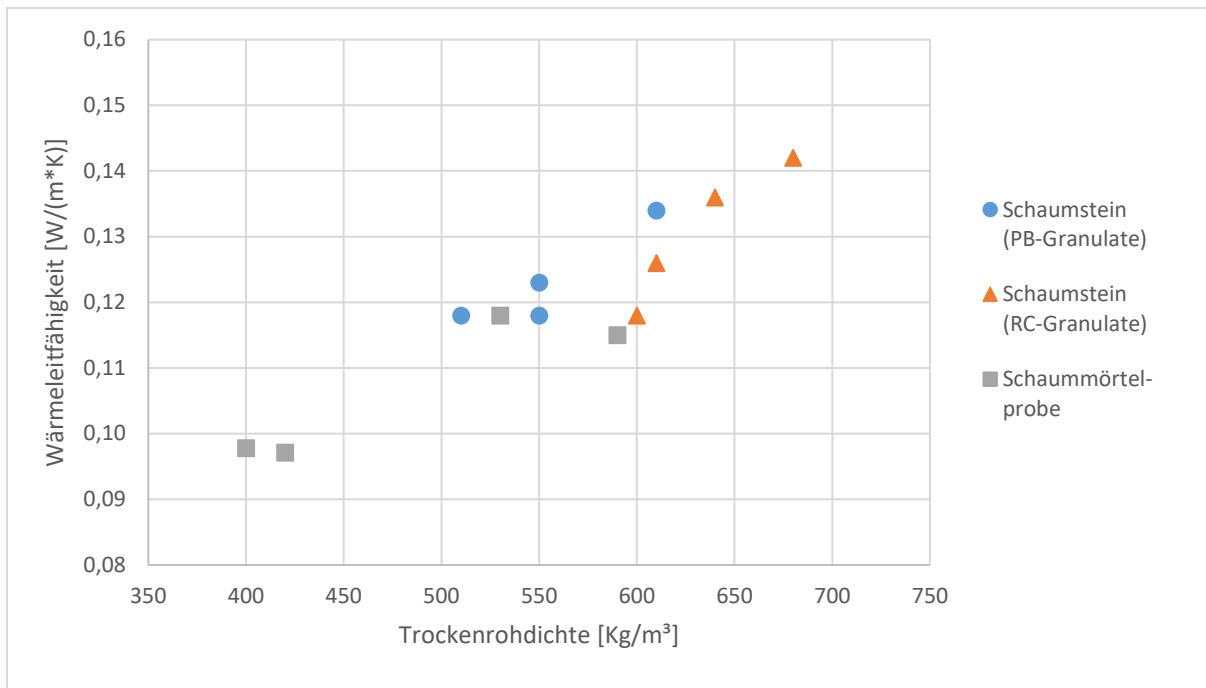


Abbildung 49: Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit der Rohdichte von Schaumsteinen aus PB- und RC-Granulaten und Schaummörtelproben

Wie in Abbildung 49 zu sehen, fallen zwei Werte (bei einer Rohdichte von 590 kg/m³ bzw. 600 kg/m³) nach unten hin etwas aus der Geraden heraus. Diese beiden Proben weisen außerdem eine besonders hohe Scheibendicke auf. Daher wird vermutet, dass Lufteinschlüsse bei diesen Prüfungen einen hohen Einfluss ausüben und dadurch ein höherer Wärmedurchlasswiderstand erreicht wird als bei den übrigen Proben. Des Weiteren wird festgestellt, dass die Schaumsteine mit RC-Granulaten nicht wie erwartbar negativ abfallen. Trotz zahlreicher Fremdmaterialien, welche teilweise höhere Wärmeleitfähigkeiten als Porenbeton besitzen, werden hingegen ähnliche Werte (auf die Rohdichte bezogen) erreicht wie bei den anderen Probenarten.

Um den Einfluss der Härtungsdauer zu verdeutlichen, sind die unterschiedlich gehärteten Proben in Abbildung 50 gekennzeichnet. Hieraus lässt sich keine klare Auswirkung der verlängerten Härtung auf die Wärmeleitfähigkeit ableiten, da leichte Abweichungen in beiden Richtungen auftreten. Die länger autoklavierten Schaummörtelproben und ein Schaumstein mit RC-Körnung zeigen dabei eine positive Tendenz, jedoch ist dies bei den Schaumsteinen mit PB-Granulaten andersherum der Fall. Des Weiteren sind die Ergebnisse auch hier aufgrund der Prüfeinflüsse und der geringen Probenzahl begrenzt interpretierbar.

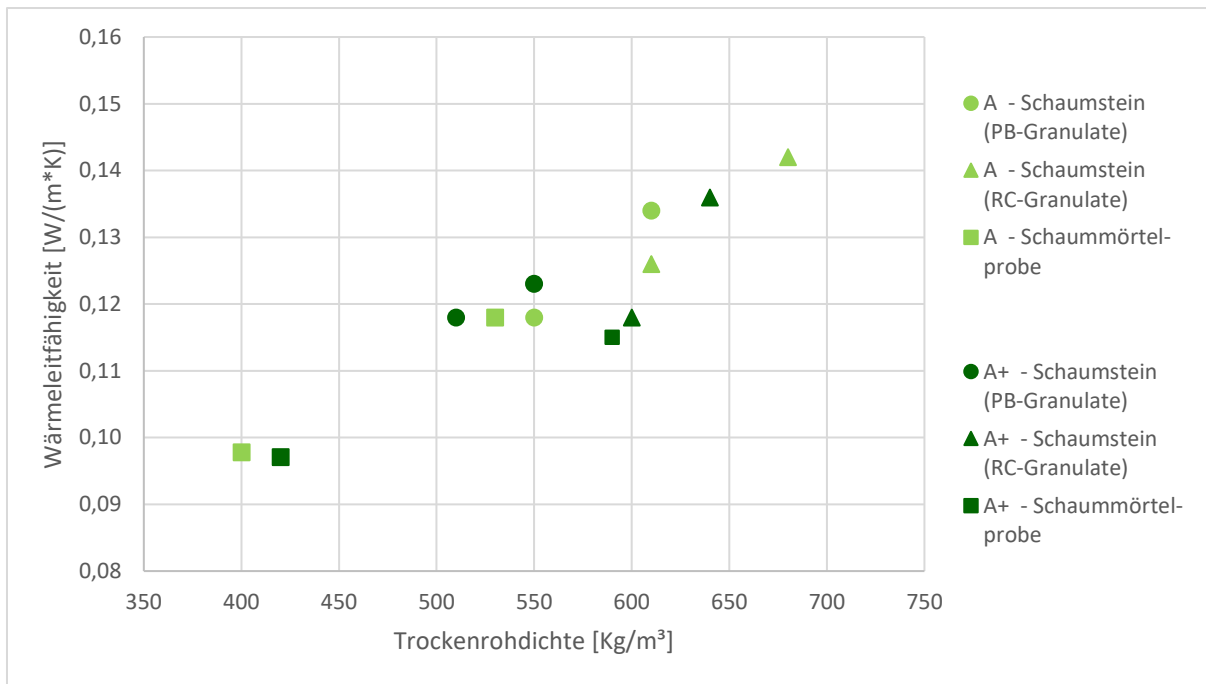


Abbildung 50: Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit der Rohdichte und bei unterschiedlichen Härtungsdauern der Proben

6.6 Ergebnisse aus der Lichtmikroskopie

Lichtmikroskopische Untersuchungen wurden an vier Dünnschliffpräparaten aus unterschiedlichen Schaumsteinproben mit RC-Körnung durchgeführt. Zunächst werden nun generelle Erkenntnisse zum Gefüge der Schaumsteinmatrix und der Granulate sowie zur Verbundzone aufgeführt. Aus einem Vergleich der vier Dünnschliffe wird außerdem auf einen Einfluss der beiden Schaumgehalte und Härtungsdauern eingegangen. Darüber hinaus werden für diese Arbeit Mikroskopieaufnahmen einer laborautoklavierten Schaumsteinprobe der MPA hinzugezogen, um Unterschiede in der Gefügeausbildung der Matrix bei Veränderung der Autoklavtechnik aufzeigen zu können.

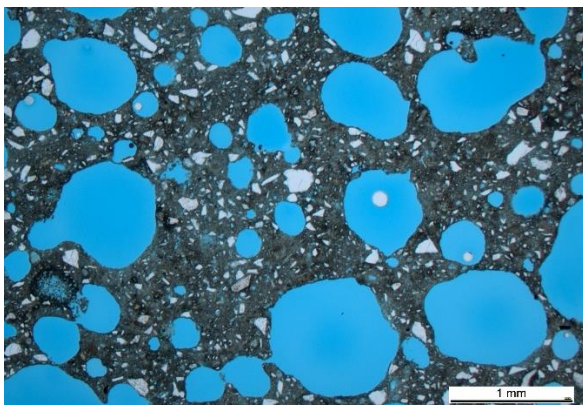


Abbildung 51: Lichtmikroskopie eines Granulats im Schaumstein

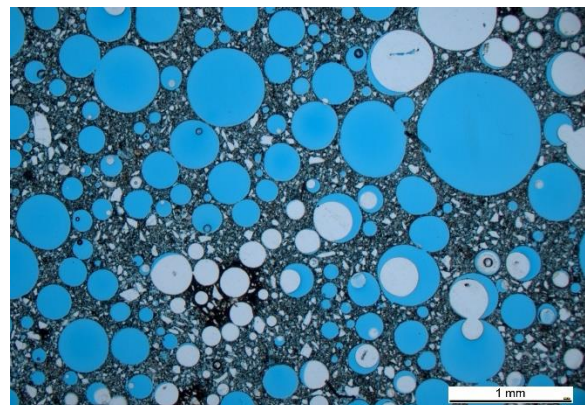


Abbildung 52: Lichtmikroskopie der Schaumsteinmatrix

Als Erstes werden Gefügeaufnahmen eines Granulats (s. Abbildung 51) und einer typischen Schaumsteinmatrix (s. Abbildung 52) gegenübergestellt. Blau abgebildet ist hierbei Harz, in das die Proben bei der Herstellung der Dünnschliffe getränkt wurden. Die originalen Proben weisen an diesen Stellen Luftporen auf. Teilweise fehlt die blaue Färbung, wenn das Harz die entsprechenden Poren bei der Tränkung nicht erreicht hat.

Beim Vergleich der beiden Bilder ist die unterschiedliche Porenstruktur auffällig, welche auf die Art der Porenerzeugung während der Herstellung zurückzuführen ist. Die kantigeren Poren im linken Bild werden durch den Blähprozess des Aluminiumpulvers im Zuge der Porenbetonherstellung gebildet, während die runden Poren des Schaummörtels durch Tenside entstehen. Neben der Form unterscheiden sich die Poren darüber hinaus in ihrer Größe; die Schaumsteinmatrix weist dabei einen höheren Anteil kleinerer Poren auf. Außerdem wird festgestellt, dass die Stege zwischen den Poren der Granulate und der Matrix ein ähnliches Bild erzeugen. Dementsprechend scheint die Schaumsteinmatrix ein porenbetonähnliches Gefüge auszubilden.

Die hohe Anzahl kleiner Poren in der Schaumsteinmatrix ist u. a. durch den Einfluss der Pumpe während der Schaummörtelinjektion bedingt. Stürmer machte hierzu bereits Erfahrungen, als sie einen gepumpten Schaummörtel auf Zementbasis untersuchte, der ebenfalls durch das Unterheben eines Tensidschaums und unter Einsatz eines Cellulose-Stabilisierers hergestellt wurde. Dabei stellte sie fest, dass Poren mit größerem Durchmesser durch den Pumpvorgang stärker zerstört werden als kleinere Poren. [Vgl. Stürmer (1997), S. 94 ff.]

Bei einer Betrachtung der Verbundzonen zwischen Granulaten und Matrix wurden lokale Schwankungen auch innerhalb eines Dünnschliffs festgestellt. Beispielfhaft sind in Abbildung 53 und Abbildung 54 ein gut und ein schlecht ausgebildeter Verbund dargestellt. Im positiven Fall scheint die Matrix in manchen Bereichen in das angrenzende Granulat hineinzuwachsen, sodass die Grenze zwischen den Stoffen beinahe verschwindet und somit an diesen Stellen ein sehr inniger und fester Verbund geschaffen wird.

Im Fall eines schlechteren Verbunds aus Abbildung 54 ist ein Einfluss des Verbundbereichs auf die Ausbildung der Matrix zu erkennen. Die dunkleren Stege ferner der Verbundzone stellen dabei ein besser ausgebildetes Gefüge dar, da sie dichter sind und weniger Licht der Mikroskopie durchstrahlen lassen. Es wird vermutet, dass die für die Festigkeitsentwicklung entscheidende Bildung von CSH-Phasen in dunkleren Bereichen verstärkt stattgefunden hat. Nahe der Grenze zum Granulat hingegen ist die Matrix aufgehellert. Der höhere Anteil an Blaufärbung in diesem Bereich spricht für eine höhere Porosität der Stege in der Verbundzone. Die Ursache für diesen Effekt kann durch das Mittel der Lichtmikroskopie jedoch nicht analysiert werden.

Durch die lokal schwankend ausgeprägte Verbundzone wurde die Vergleichbarkeit zwischen den Proben unterschiedlicher Härtung und verschiedener Schaumgehalte erschwert. Daher wurden keine signifikanten Unterschiede in den Verbundbereichen zwischen den vier Proben festgestellt. In Bezug auf die Matrix werden im Folgenden hingegen Einflüsse aus den unterschiedlichen Schaumgehalten und veränderten Autoklavbedingungen erläutert.

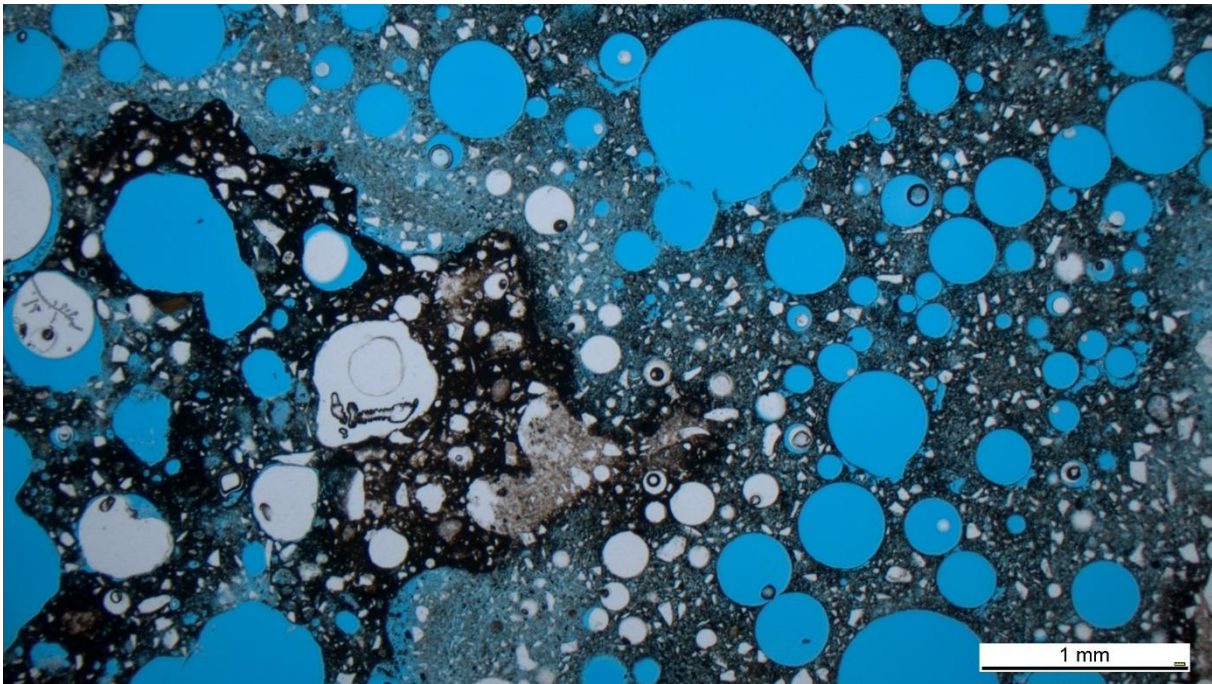


Abbildung 53: Gut ausgebildete Verbundzone zwischen Granulat (links) und Matrix (rechts)

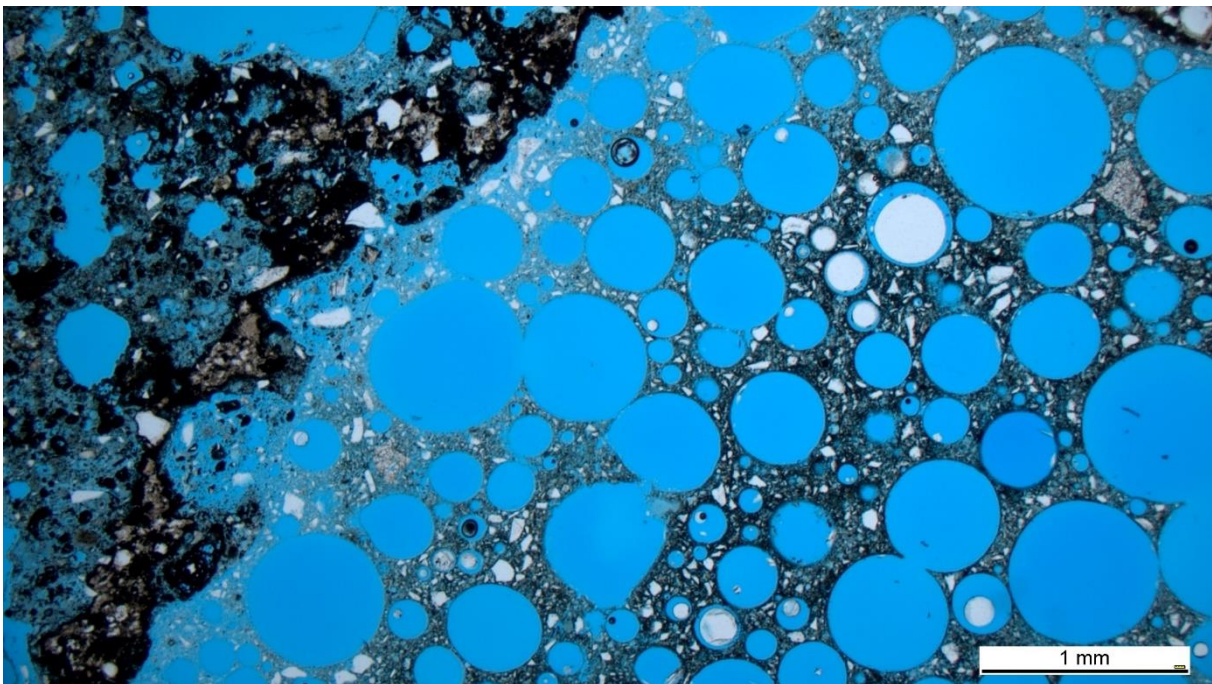


Abbildung 54: Schlecht ausgebildete Verbundzone zwischen Granulat (links) und Matrix (rechts)

Die Auswirkungen des höheren Schaumanteils auf die Ausbildung des Matrixgefüges sind in einer Gegenüberstellung der beiden Schaumgehalte $1:1$ und $1:1,5$ in Abbildung 55 und Abbildung 56 ersichtlich. Die Schaumsteinmatrix mit dem erhöhten Schaumgehalt weist dabei erwartungsgemäß mehr Poren auf. Demzufolge werden dünnere und eine größere Anzahl an Stegen ausgebildet.

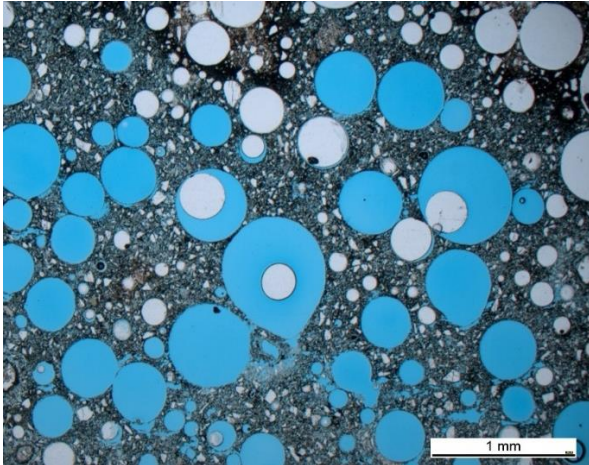


Abbildung 55: Schaumsteinmatrix mit normalem Schaumgehalt (1:1)

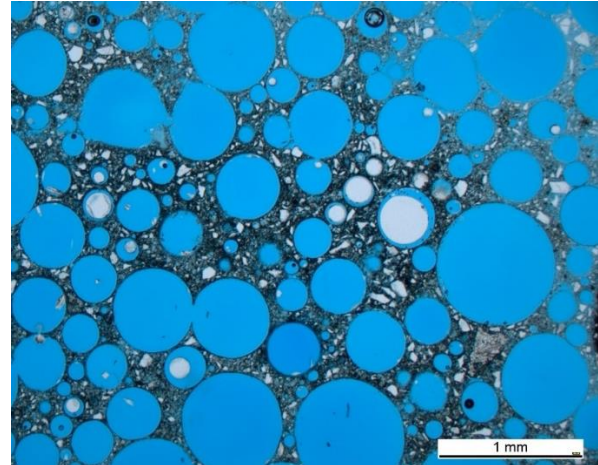


Abbildung 56: Schaumsteinmatrix mit erhöhtem Schaumgehalt (1:1,5)

Des Weiteren ist in Abbildung 57 eine Aufnahme eines in der MPA laborautoklavierten Schaumsteins und in Abbildung 58 und Abbildung 59 im Rahmen dieser Arbeit aufgenommene Bilder von industriell gehärteten Proben mit jeweils einer der beiden Härtungsdauern dargestellt. Anhand dieser Aufnahmen wird sowohl der Einfluss der Autoklavtechnik als auch die Auswirkung einer verlängerten Härtedauer auf die Ausbildung des Gefüges beurteilt. Kurzerhand lässt sich hierbei feststellen, dass alle drei Aufnahmen des Matrixgefüges sehr ähnlich sind. Mit dem Mittel der Lichtmikroskopie ist demnach kein Einfluss der Härtung auf die Ausbildung des Gefüges feststellbar.

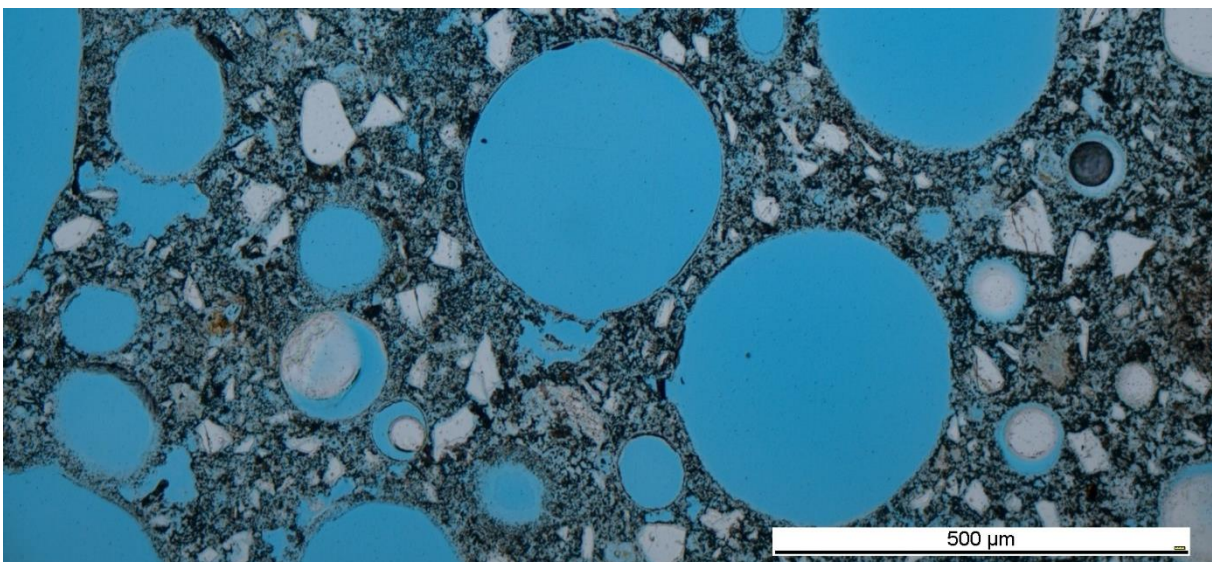


Abbildung 57: Matrixgefüge eines laborautoklavierten Schaumsteins [MPA Bremen (2019)]

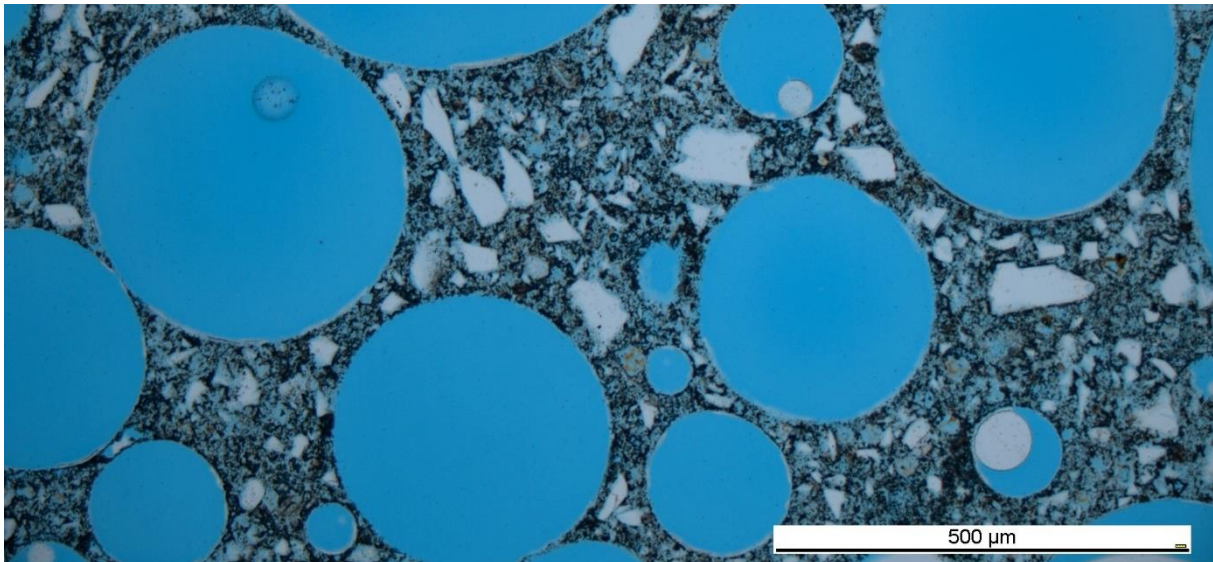


Abbildung 58: Matrixgefüge eines industriell autoklavierten Schaumsteins (A)

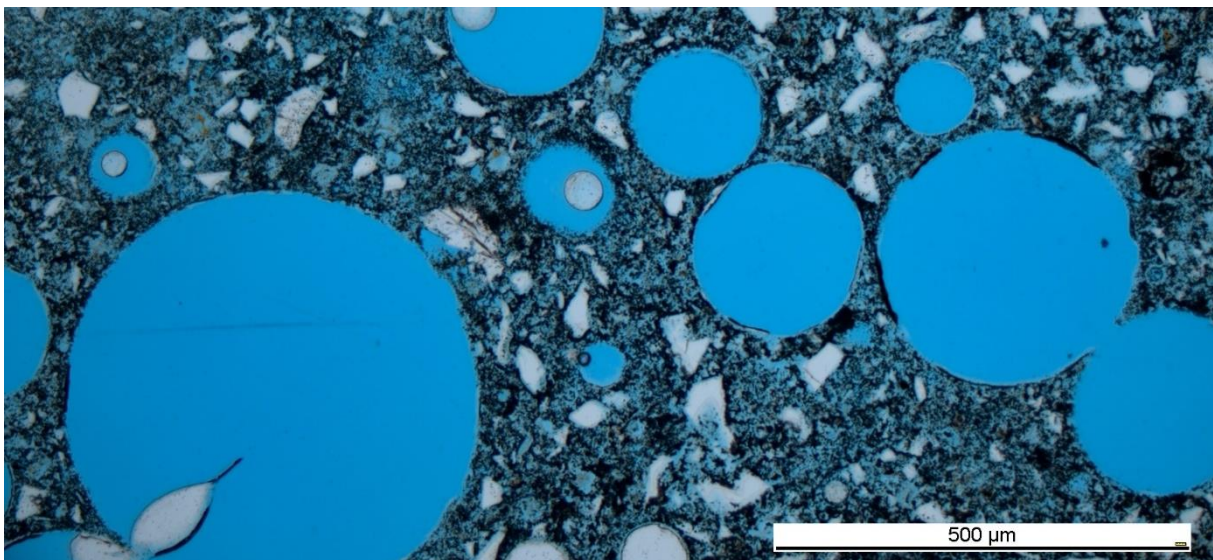


Abbildung 59: Matrixgefüge eines industriell autoklavierten Schaumsteins mit verlängerter Härtungsdauer (A+)

6.7 Schlussfolgerungen

In den Schlussfolgerungen werden nun die gesammelten Ergebnisse zusammenfassend dargestellt. Gemäß dem Ziel dieser Arbeit werden diese dabei nach den untersuchten Einflussfaktoren Autoklavtechnik und Härtungsdauer, Schaumgehalt des Frischmörtels sowie Grad der Aufbereitung der Granulate strukturiert. Darüber hinaus werden Optimierungs- bzw. Forschungspotentiale des leichten Schaumsteins entwickelt.

6.7.1 Autoklavtechnik und Härtungsdauer

Die Autoklavtechnik stellt sich als großer Einflussfaktor heraus. In einem industrieähnlichen Autoklav gehärtete Proben erreichen eine um den Faktor zwei bis drei deutlich höhere Druckfestigkeit als laborautoklavierte Proben. Dieser Einfluss ist des Weiteren jedoch nicht im Gefüge der Schaumsteinmatrix erkennbar; auf jeden Fall sind mittels Lichtmikroskopie keine Veränderungen sichtbar.

Ein darüberhinausgehende Festigkeitssteigerung durch eine Verlängerung der Härtedauer inkl. Streckung der Aufdampfphase wird dagegen nicht erzielt. Die längere Härtungsdauer bleibt bei allen untersuchten Eigenschaften des Schaumsteins ohne Einfluss. Insgesamt ist die Autoklavhärtung, wie sie in der Porenbetonproduktion typischerweise eingesetzt wird, also eine gut geeignete Härtungsmethode für den leichten Schaumstein.

6.7.2 Schaumgehalt des Frischmörtels

Über den Schaumgehalt des Frischmörtels sind die Feststoffeigenschaften Rohdichte, Festigkeit, Elastizitätsmodul und Wärmeleitfähigkeit gemeinsam steuerbar. Ein höherer Schaumanteil, der sich in lichtmikroskopischen Aufnahmen der Schaumsteinmatrix in sichtbar mehr Poren widerspiegelt, führt dabei erwartungsgemäß zu leichteren Schaumsteinen mit geringerer Festigkeit, Steifigkeit und Wärmeleitfähigkeit.

Die Frischmörteleigenschaften sind grundsätzlich stark schwankend, da u. a. das händische Unterheben des Schaums unter den Bindemittelleim sowie das Pumpen und die Injektion des Schaummörtels einen nicht konstanten Einfluss auf die Zerstörung von Schaumporen ausübt. Durch jede Verarbeitung des Mörtels werden generell zahlreiche Poren ausgetrieben und somit die Rohdichte des Schaummörtels erhöht. Die Rohdichte und Konsistenz des Mörtels nach der Injektion stellen die interessantesten Eigenschaften während der Herstellung dar, konnten aber verfahrensbedingt nur bei zwei Herstellungen gemessen werden. Um den austretenden Schaummörtel hierbei ohne Verstopfung der Austrittsöffnung mit höherer Sicherheit aufzufangen, könnte eine bessere Methode entwickelt werden.

Durch Schwankungen in den Ergebnissen der Trockenrohichte und Druckfestigkeit, die über den Einfluss des unterschiedlichen Schaumgehalts hinausgehen, wird die Erkenntnis eines Dichte- und Festigkeitsgefälles innerhalb eines Schaumsteins erlangt. Nahe der Injektionsöffnung sind die Schaumsteine dabei dichter und fester als am anderen Ende bei der Austrittsöffnung. Dies lässt auf einen Einfluss der Schaummörtelinjektion schließen. Es wird gezeigt, dass der Haufwerksporenraum nahe der Auslaufseite durch den Schaummörtel unvollständig verfüllt ist und dadurch die Veränderungen der Eigenschaften über die Höhe des Schaumsteins erklärbar sind.

Hieraus wird ein Verbesserungspotential abgeleitet. Um herstellungsbedingte Schwankungen der Eigenschaften des Schaumsteins deutlich zu reduzieren und dadurch die Reproduzierbarkeit des Schaumsteins zu erhöhen, sollte eine gleichmäßigere Verfüllung der Haufwerksporen angestrebt werden. Dies könnte zum Beispiel durch ein späteres Abschalten der Pumpe während der Injektion erreicht werden. Der Schaummörtel würde dabei länger aus der

Austrittsöffnung herausquellen, während Haufwerksporen nahe der Austrittsstelle zunehmend verfüllt würden. Sobald dann sichtbar keine Luftbläschen durch die Austrittsöffnung mehr entweichen, würde die Injektion durch das Abschalten der Pumpe beendet werden. Ob diese Methode tatsächlich eine bessere Einbindung der Schaummörtelmatrix in das Haufwerk aus Granulaten bewirkt, müsste im Zuge weiterer Forschung erprobt werden. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass der ausgetretene Schaummörtel wegen der veränderten Eigenschaften nicht ohne Weiteres in die Herstellung des folgenden Schaumsteins zurückgeführt werden kann und daher höhere Mörtelmengen verschwendet würden.

Durch die Erhöhung des Schaumgehalts erreichen die Schaumsteine teilweise nicht mehr ausreichende Festigkeiten. Aus einem Vergleich von Proben von der Einfüllseite und der Auslaufseite eines Schaumsteins wird darüber hinaus deutlich, dass diese schwächeren Proben ausnahmslos von der Mörtelaustrittsseite stammen. Würde nun das oben beschriebene Potential einer besseren Verfüllung der Haufwerksporen nahe der Austrittsöffnung umgesetzt werden, wären die Eigenschaften von der Einfüllseite der Schaumsteine maßgebend. Bei alleiniger Betrachtung der Rohdichte- und Festigkeitswerte von Proben, die von der Einfüllseite eines Schaumsteinbalkens entnommen sind, werden durch den höheren Schaumgehalt dagegen gute Ergebnisse erzielt. Diese Proben besitzen bei noch akzeptabler Festigkeit eine niedrigere Rohdichte, die wiederum eine geringe Wärmeleitfähigkeit nach sich zieht. In diesem Fall wäre also ein Volumenverhältnis von Bindemittelleim zu Schaum von 1 : 1,5 sinnvoll anzuwenden. Im jetzigen konkreten Fall jedoch erzeugt der Schaummörtel in der 1:1-Variante bessere Ergebnisse, da alle Proben eine ausreichend hohe Festigkeit von mind. 2,0 N/mm² aufweisen.

Als ein weiteres Forschungspotential des Schaumsteins könnte der Einfluss der Matrix auf die Wärmeleitfähigkeit als eine der wichtigsten Eigenschaften des Schaumsteins erforscht werden. Die in der Lichtmikroskopie ermittelte andere Porenstruktur der Matrix könnte dabei den Wärmedurchgang durch dünnere und vermehrt vorhandene Stege anders gestalten als bei Porenbeton. Hierzu müsste zunächst ein zuverlässiges Prüfverfahren für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit geschaffen werden.

6.7.3 Grad der Aufbereitung der Granulate

Ein Einsatz von RC-Granulaten im Schaumstein vermeidet eine aufwändige intensive Aufbereitung des abgebrochenen Porenbetons, bringt aber entscheidende Probleme mit sich. Während der Autoklavhärtung schmelzen Fremdbestandteile des RC-Materials und tropfen auf die Innenwandung des Autoklavs ab. Diese Verschmutzung des Dampfdruckkessels eignet sich nicht für eine industrielle Produktion des leichten Schaumsteins durch einen Porenbetonhersteller. Dies konnte durch einen Mitarbeiter der Firma *Wehrhahn GmbH* aus Praxisnähe bestätigt werden. [Gespräch mit Herrn Schulte vom 03.12.2018] Darüber hinaus kommt es durch das Heraustreten der Fremdstoffe aus dem Schaumstein während der Dampfdruckhärtung zu einer optischen Beeinträchtigung des Produkts. Durch diese Verschmutzungen lässt sich der Schaumstein mit RC-Granulaten schwieriger vermarkten. Diese Probleme der RC-Granulate sprechen für einen hohen notwendigen Grad der Aufbereitung von abgebrochenem Porenbeton, damit mindestens alle bei Autoklavbedingungen schmelzenden Stoffe aussortiert werden.

Des Weiteren erreicht der Schaumstein in der RC-Variante bei gleicher Trockenrohddichte niedrigere Druckfestigkeiten als der Schaumstein mit PB-Granulaten. Bei den anderen Eigenschaften ist dagegen kein Unterschied zwischen den beiden Granulatvarianten feststellbar. Gerade bei der Wärmeleitfähigkeit wären schlechtere Eigenschaften wegen gut wärmeleitender Fremdstoffe hingegen zu erwarten gewesen.

Im Gegensatz zur Verwendung der RC-Körnung eignet sich der Schaumstein mit sortenreinen Granulaten prinzipiell für einen Einsatz auf industrieller Ebene, jedoch mit der folgenden Einschränkung unabhängig vom Grad der Aufbereitung. Eine bei der Porenbetonproduktion übliche Bearbeitung des ausgeschalteten Grünlings ist beim Schaumstein generell nicht möglich, da die Granulate mit den leichten Schneidedrähten nicht durchgeschnitten werden können. Es kann dementsprechend nur ein Bauteil pro Schalung, welches außerdem in der Geometrie durch die Schalung festgelegt ist, hergestellt werden. Durch diese Einschränkung im Vergleich zur Porenbetonherstellung eignet sich der Schaumstein besonders für Sonderbauteile komplizierter Geometrien, z. B. U-Schalen.

Der Schaumstein mit PB-Granulaten bildet einen sehr homogenen Verbundbaustoff. Für eine porenbetonähnliche Matrix und einen guten Verbund zwischen Matrix und Körnung sprechen die vergleichbaren Feststoffeigenschaften vom Schaumstein aus sortenreinen Porenbetongranulaten und den Schaummörtelproben. An geschnittenen Proben ist außerdem eine augenscheinlich gute Einbindung der Matrix in das Haufwerk sichtbar. In einer genaueren Betrachtung des Verbunds zwischen Granulaten und Schaummörtel mittels Lichtmikroskopie werden des Weiteren sowohl gut als auch schlecht ausgebildete Verbundzonen mit lokalen Schwankungen beobachtet.

Im Vergleich zu primärem Porenbeton erreicht der leichte Schaumstein mit sortenreinen Porenbetongranulaten im Bereich höherer Rohdichten ähnliche Druckfestigkeiten, bei leichteren Steinen bis 500 kg/m^3 jedoch geringere Festigkeiten. Außerdem werden bei Porenbeton niedrigere Rohdichten realisiert. Da des Weiteren der Fehler im Prüfverfahren der Wärmeleitfähigkeit nicht vollständig behoben scheint, ist kein sicherer Vergleich zwischen den Wärmedämmeigenschaften der Baustoffe möglich. Der Elastizitätsmodul des Schaumsteins ist darüber hinaus niedriger als bei Porenbeton.

7 Zusammenfassung

Porenbeton wird als wärmedämmender Baustoff mit ausreichend hoher Druckfestigkeit primär im Mauerwerksbau eingesetzt. Für seine werksseitige Herstellung wird ein Frischmörtel bestehend aus Quarzmehl, Branntkalk, Portlandzement und Gips sowie einer geringen Menge Aluminiumpulver oder -paste als Porosierungsmittel angemacht und in eine Schalung gegossen. Neben einem Aufblähen des Mörtels durch eine Aluminiumreaktion finden in der Folge intensive Zementklinkerreaktionen statt. Hohe Temperaturen infolge des Ablöschens des Branntkalks sorgen dabei für eine hohe Frühfestigkeit, sodass der weiche und raumbeständige Porenbetongrünling ausgeschalt und verarbeitet werden kann. Während der Autoklavhärtung des Porenbetons löst sich Kieselsäure aus dem Quarz und verbindet sich mit Kalkhydrat zu

Tobermorit oder anderen CSH-Phasen. Für gute Festigkeits- und Schwindeigenschaften des Porenbetons ist der Gips mitverantwortlich, da er die Gefügeentwicklung über die zwischenzeitliche Bildung verschiedener Sulfatphasen positiv beeinflusst.

Nach seiner primären Nutzung wird Porenbeton zumeist aus dem Bauschutt aussortiert und im Zuge einer Deponierung entsorgt, da u. a. durch eine Auslaugbarkeit von im Porenbeton enthaltenen, umweltschädigenden Sulfaten etablierte Verwertungsstrategien des mineralischen Bauschutts nur in geringem Maße anwendbar sind. Die teilweise praktizierte Rücknahme von Porenbeton durch die Hersteller beschränkt sich bisher auf Baustellenabfälle, da diese nach Angaben in der Literatur zusammen mit dem Produktionsausschuss bereits die verwertbaren Kapazitäten erreicht.

Eine Menge von schätzungsweise 2,9 m³ jährlichem Porenbetonabfall begründet die dringliche Entwicklung von Verwertungsstrategien für Porenbeton. Neben verschiedenen anderen Verwertungsansätzen aus der Literatur betätigt sich die MPA Bremen seit vielen Jahren auf diesem Gebiet. Nachdem zwei Recyclingprodukte aus Porenbetonbrechsanden bereits erfolgreich entwickelt und in einem Bauvorhaben in die industrielle Praxis eingeführt wurden, zeigt das aktuell laufende Forschungsvorhaben zur Entwicklung eines „leichten Schaumsteins aus groben Porenbetongranulaten“ noch Optimierungspotentiale.

Der leichte Schaumstein besteht aus einem Haufwerk aus Porenbetonrezyklaten der Korngruppe 8/16 mm und einer porenbetonähnlichen Matrix. Die Einbindung dieser Matrix erfolgt über ein Injektionsverfahren, bei dem ein poriger Mörtel in den Haufwerksporenraum der eingeschalteten Granulate gepumpt wird. Die Porosität des Mörtels wird dabei nicht wie bei der Porenbetonherstellung mithilfe eines Porosierungsmittels, sondern durch das Untermischen eines separat hergestellten Tensidschaums erreicht. Die Aushärtung des Schaumsteins erfolgt wie beim primären Porenbeton in einem Autoklav. Der entwickelte Schaumstein zeigt bereits ordentliche Eigenschaften (mittl. Rohdichte von 570 kg/m³, mittl. Druckfestigkeit von 2,7 N/mm², leichtes Quellen als hygri-sche Verformung), wobei die Matrix noch auf ein Festigkeitspotential hinweist.

Als ein wichtiges Erkenntnis der vorliegenden Arbeit wird diese Festigkeitssteigerung durch eine Verbesserung der Autoklavbedingungen realisiert. Während Schaumsteine aus dem Forschungsprojekt der MPA in einem laboreigenen, autoklavähnlichen Dampfdruckkessel gehärtet wurden, wurden für diese Arbeit eigens hergestellte Proben hingegen in einem „echten“ Autoklav gehärtet, der von seiner Funktionsweise her einem in der Porenbetonindustrie verwendeten Autoklav entspricht. Die Funktionsweise des Dampfdruckkessels der MPA beinhaltet im Gegensatz zum Industrieautoklav keine Zuführung von externem Wasserdampf in den Heizkessel während der anfänglichen Aufheizphase; eine wasserdampfhaltige Atmosphäre entsteht stattdessen erst allmählich durch das Aufheizen von flüssigem Wasser. Die durch diese Härtung erreichten, deutlich geringeren Festigkeiten sind in Tabelle 13 ersichtlich und könnten auf eine mögliche Austrocknung der Proben während des Aufheizens zurückgeführt werden. Durch das in diesem Fall verringerte Wasserangebot wäre die Bildung von festigkeitsbildenden CSH-Phasen nur eingeschränkt möglich.

Tabelle 13: Festigkeitssteigerung durch die industrielle Autoklavierung

	Mittlere Druckfestigkeit der <u>labor</u> autoklavierten Proben [N/mm ²]	Mittlere Druckfestigkeit der <u>industri</u> autoklavierten Proben [N/mm ²]
Schaumstein (Variante 1)	2,2	6,2
Schaumstein (Variante 2)	2,2	4,4

Des Weiteren wurde der Einfluss der hydrothermalen Härtungsdauer als Hauptmotiv der vorliegenden Arbeit untersucht, indem eine weitere Probenserie bei einer um 100 Minuten verlängerten Spitzenhärtezeit sowie einer um den Faktor 1,5 verlangsamten Aufdampfphase im Autoklav gehärtet wurde. Die andere Härtungsdauer übt jedoch keinen Einfluss auf die untersuchten Feststoffeigenschaften der Schaumsteine aus.

Während der Herstellung der Proben nach dem oben beschriebenen Verfahren der Schaummörtelinjektion wurde außerdem im Rahmen dieser Arbeit der Schaumgehalt des Mörtels variiert. Die Porosität des Schaummörtels ist jedoch generell nur eingeschränkt kontrollierbar, da Schaumporen in schwankendem Maß durch das händische Untermischen des Schaums sowie bei der Weiterverarbeitung des Schaummörtels durch den Pumpvorgang und die Injektion zerstört werden. Dies äußert sich in einer ansteigenden Rohdichte und einer weicher werdenden Konsistenz des Schaummörtels im Laufe der Herstellung. Neben dem standardmäßigen Volumenverhältnis zwischen Bindemittelleim und Tensidschaum von 1 : 1 wurden also zusätzliche Proben mit höherem Schaumanteil hergestellt (1 : 1,5). Diese Proben sollten bei hinnehmbar verringerter Festigkeit eine niedrigere Rohdichte und dadurch verbesserte Wärmedämmeigenschaften erzielen. Im Ergebnis sind Dichte- und Festigkeitsunterschiede der geprüften Schaumsteine wie erwartet vorhanden, jedoch streuen diese Eigenschaften nicht nur zwischen den Proben unterschiedlicher Schaumgehalte.

Auf Grundlage dieser Feststellung wird in der vorliegenden Arbeit die Erkenntnis erlangt, dass die Dichte sowie die Festigkeit bereits innerhalb einer hergestellten Probe deutlich schwanken. Dies wird an Prismen und Würfeln festgestellt, die jeweils aus demselben hergestellten Schaumsteinbalken stammen und für die in beiden Fällen Trockenrohdsichten und Festigkeitswerte im Zuge der Elastizitätsmodul- bzw. Druckfestigkeitsprüfung vorliegen. Außerdem wird anhand einer Zuordnung der Prismen und Würfel zu den ursprünglichen Positionen im Balken festgestellt, dass die Dichte und Festigkeit bei nahezu allen Balken ein Gefälle von der Einfüllseite des Schaummörtels zum Austrittsende ausbilden. Als Ursache hierfür wird mittels weiterer Untersuchungen festgestellt, dass im Zuge der Schaummörtelinjektion der Haufwerksporenraum nahe der Einfüllöffnung des Mörtels besser verfüllt wird als nahe der Austrittsöffnung. Hierbei wird vermutet, dass der Schaummörtel in der Schalung nicht gleichmäßig von unten nach oben ansteigt, sodass er aus der oberliegenden Austrittsöffnung herausquillt, bevor alle Haufwerksporen im oberen Bereich mit Mörtel verfüllt sind.

Der in dieser Arbeit behandelte porenbetonähnliche Schaummörtel bildet im Gegensatz zu zwei anderen entwickelten Bindemittelvarianten aus dem Schaumsteinprojekt der MPA Bremen zusammen mit den eingebetteten Granulaten einen sehr homogenen Verbundbaustoff. Dieser Eindruck geht über eine augenscheinlich gute Einbindung der Granulate in die Matrix hinaus,

indem gesondert hergestellte und geprüfte, reine Schaummörtelproben ähnliche Eigenschaften wie die Schaumsteine erzielen. Dieses Ergebnis bezieht sich dabei auf Schaumsteine, die mit sortenreinen Porenbetongranulaten hergestellt wurden.

Eine weitere Probenserie von Schaumsteinen, bei denen durch diverse Fremdstoffe verunreinigte Porenbetonrezyklate aus dem Abbruch verwendet wurden, ist des Weiteren nicht tauglich für einen möglichen industriellen Einsatz. Ein Teil der Fremdbestandteile schmelzen während der hydrothermalen Härtung, treten dabei aus der Probe aus und tropfen auf die Innenwandung des Autoklavs ab oder verschmutzen den Schaumstein äußerlich. Sowohl die optische Beeinträchtigung als auch die Verschmutzung des Autoklavs würden dabei eine industrielle Produktion und Vermarktung des Schaumstein immens erschweren.

Des Weiteren sind die Schaumsteine mit rezyklierten Granulaten aus dem Abbruch etwas schwerer wegen einer höheren Dichte der RC-Granulate und besitzen gleichzeitig eine geringere Druckfestigkeit, da Fremdstoffe Schwachstellen im Gefüge bilden. Unabhängig vom Aufbereitungsgrad der Rezyklate und im Gegensatz zur Porenbetonherstellung kann der Schaumstein nach dem Ausschalen wegen der Einbettung der festen Granulate nicht verarbeitet werden, sodass die Geometrie des Schaumsteinprodukts durch die gewählte Schalung bereits festgelegt ist.

Alle ermittelten Feststoffeigenschaften des Schaumsteins zeigen eine Abhängigkeit zur Rohdichte. Leichtere Steine besitzen dabei erwartungsgemäß eine geringere Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit und einen niedrigeren Elastizitätsmodul. Bei den Wärmeleitfähigkeitsprüfungen ergaben sich während der Versuchsplanung Probleme, als ein Fehler in früheren Prüfungen von Schaumsteinen innerhalb des Forschungsprojekts der MPA nachträglich festgestellt wurde. Da mit vorhandenen Schalungen der MPA hergestellte Proben nicht die geforderte Probengröße nach DIN EN 12667 erreichen, wurde der Fehler in einer zu kleinen Probe vermutet.

Um nun ein korrektes Wärmeleitfähigkeitsergebnis im Rahmen dieser Arbeit zu erzielen, wurde der geplante Versuchsaufbau geändert. Die zu prüfende Probe im Zweiplattengerät wurde dabei vergrößert, indem mehrere Schaumsteinproben zu einer großflächigeren Probe aneinandergelegt wurden. Die bereits hergestellten Proben reichten im Zuge des veränderten Prüfaufbaus jedoch nur noch für eine statt drei ursprünglich vorgesehene Wärmeleitfähigkeitsmessungen je Probenserie aus. Neben dieser verringerten Aussagekraft der Ergebnisse gab es durch das Zusammensetzen der Proben Luft einschüsse, die sich als Prüfeinflüsse auf die Messergebnisse auswirkten. Ob der Fehler bei der Wärmeleitfähigkeitsprüfung tatsächlich durch die geänderte Probengröße behoben wurde, konnte nicht verifiziert werden. Durch den neuen Prüfaufbau werden zwar deutlich realistischere Werte erzielt, jedoch wird durch eine unabhängige Kontrollmessung einer externen Prüfstelle eine Wärmeleitfähigkeit ermittelt, die mit $0,162 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ um etwa $0,02 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ höher liegt.

Die wichtigsten Schlussfolgerungen dieser Arbeit beinhalten, dass der Schaumstein mit dem Standardschaumgehalt (1:1) wegen des Erreichens einer Mindestfestigkeit ($2,0 \text{ N}/\text{mm}^2$) bessere Ergebnisse erzielt, dass ein hoher Aufbereitungsgrad der Rezyklate für einen möglichen industriellen Einsatz notwendig ist und dass die Härtung der Schaumsteine in einem

Industrieautoklav deutlich höhere Festigkeiten erzielt als in einem Laborautoklav, während die Härtungsdauer jedoch keinen Einfluss ausübt.

8 Ausblick

Optimierungspotentiale des leichten Schaumsteins liegen zunächst in einer besseren Verfüllung der Haufwerksporen nahe der Austrittsöffnung des injizierten Schaummörtels. Diese könnte realisiert werden, indem der Schaummörtel während der Injektion länger in die Schalung gepumpt wird, sodass die Haufwerksporen nahe der Austrittsstelle weiter verfüllt werden, während der Mörtel bereits aus der Schalung austritt. Eine gleichmäßigere und bessere Einbindung der Granulate würde eine höhere Reproduzierbarkeit des Schaumsteins durch geringere Schwankungen der Eigenschaften bewirken. Wenn die bessere Verfüllung der Haufwerksporen realisiert würde, könnte darüber hinaus auch der Schaumstein mit höherem Schaumgehalt (1:1,5) wegen der in diesem Fall höheren Dichte und Festigkeit sinnvoll angewendet werden.

Um des Weiteren die Veränderung der Frischmörteleigenschaften während der Schaummörtelinjektion besser beobachten zu können, könnte ein zuverlässigeres Verfahren zum Auffangen des aus der Schalung austretenden Mörtels für die Bestimmung der Rohdichte und Konsistenz entwickelt werden. Darüber hinaus könnte auch das Prüfverfahren der Wärmeleitfähigkeit verbessert werden. Hierbei müsste ein vorhandener Fehler endgültig behoben werden, damit zuverlässige Werte für die Wärmeleitfähigkeit des leichten Schaumsteins ermittelt werden können. Hierdurch könnten die Wärmedämmeigenschaften außerdem in einem Vergleich zu anderen Baustoffen wie z. B. Porenbeton eingeordnet werden.

Weitere Forschungspotentiale zum Schaumstein beinhalten zum einen, welchen Einfluss die in der Lichtmikroskopie ermittelte andere Porenstruktur auf die Wärmeleitfähigkeit des Schaumsteins ausübt. Zum anderen könnten durch weitergehende mikroskopische Untersuchungen (z. B. einer Rasterelektronenmikroskopie), welche im Rahmen dieser Arbeit aus zeitlichen Gründen nicht durchgeführt wurden, Einflussgrößen auf den Verbund zwischen Granulaten und Schaumsteinmatrix ermittelt werden.

Literaturverzeichnis

Bahn-Walkowiak/Steger (2013)

Bahn-Walkowiak, Bettina ; Steger, Sören: Politische und rechtliche Ansätze für inputorientierte Ressourcenziele in Europa und weltweit : Arbeitspapier AS 1.1 im Projekt Ressourcenpolitik (PolRess). o. O., 2013

Bergmans/Nielsen/Snellings/Broos (2016)

Bergmans, Jef ; Nielsen, Peter ; Snellings, Ruben ; Broos, Kris: Recycling of autoclaved aerated concrete in floor screeds: Sulfate leaching reduction by ettringite formation. In: Construction and Building Materials (2016), S. 9 - 14

Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. (2018a)

Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.: Herstellung.
https://www.kalksandstein.de/bv_ksi/herstellung?page_id=13115 Tag des Abrufes: 05.11.18

Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. (2018b)

Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.: Geschichte der Kalksandsteinindustrie.
https://www.kalksandstein.de/geschichte-der-kalksandsteinindustrie.php?page_id=13276 Tag des Abrufes: 05.11.18

Bundesverband Porenbetonindustrie e.V. (2018a)

Bundesverband Porenbetonindustrie e.V.: Wandbauprodukte aus Porenbeton.
<https://www.bv-porenbeton.de/index.php/porenbeton/produkte> Tag des Abrufes: 21.11.18

Bundesverband Porenbetonindustrie e.V. (2018b)

Bundesverband Porenbetonindustrie e.V.: Eigenschaften des Baustoffs Porenbeton.
<https://www.bv-porenbeton.de/index.php/porenbeton/eigenschaften> Tag des Abrufes: 21.11.18

Fenyvesi/Jankus (2015)

Fenyvesi, Oliver ; Jankus, Bence: Opportunities in recycling AAC waste as aggregate for lightweight concrete. In: építôanyag : Journal of Silicate Based and Composite Materials (2015) Heft 2, S. 66 - 70

Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV (2006)

Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV: Entwicklung eines Recycling-Mauersteins unter Anwendung der Kalksandstein-Technologie.
<http://www.irbnet.de/daten/baufo/20088034166/Projektbeschreibung.pdf> Tag des Abrufes: 03.12.18

Gundlach (1973)

Gundlach, Horst: Dampfgehärtete Baustoffe. Wiesbaden ; Berlin : Bauverlag, 1973

Hlawatsch/Aycil/Kropp (2016)

Hlawatsch, Frank ; Aycil, Hakan ; Kropp, Jörg: Hochwertige Verwertungswege für Porenbetonbruch in Mörteln und Leichtsteinen für Mauerwerk. In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, Band 3. Neuruppin : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (2016), S. 433 - 454

Hlawatsch/Küstermann/Kropp (2018a)

Hlawatsch, Frank ; Küstermann, Ricarda ; Kropp, Jörg: Leichter Schaumstein aus groben Porenbetongranulaten. In: 20. Internationalen Baustofftagung ibausil in Weimar vom 12. bis 14. September 2018, Band 2, S. 355 - 342

Hlawatsch/Küstermann/Kropp (2018b)

Hlawatsch, Frank ; Küstermann, Ricarda ; Kropp, Jörg: Autoclaved aerated concrete (AAC) rubble for new recycling building products: In dry premixed mortars for masonry, in masonry blocks and in lightweight blocks. In: ce papers. Berlin : Ernst & Sohn (2018) Heft 2, S. 457 - 464

Homann (2008)

Homann, Martin: Porenbeton Handbuch : Planen und bauen mit System. 6. Aufl. Gütersloh : Bauverlag, 2008

Karlstetter (2014)

Karlstetter, Christof: Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Porenbeton durch den Einsatz von Fasern. München, Universität der Bundeswehr, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Heft 5, Diss., 2014

Kreft (2016)

Kreft, Oliver: Geschlossener Recyclingkreislauf für Porenbeton. In: Mauerwerk. Berlin : Ernst & Sohn (2016) Heft 3, S. 183 - 190

Kristen/Meyer (1953)

Kristen, Theodor ; Meyer, Adolf: Dampfgehärteter Porenbeton im Wohnungsbau. In: Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft : Band 5. Braunschweig : Friedr. Vieweg & Sohn, 1953, S. 132 - 140

Künzel (2003)

Künzel, Helmut: Wärme- und Feuchteschutz : Porenbeton Bericht 11. Wiesbaden : Bundesverband Porenbeton, 2003

Mörtel (1980)

Mörtel, Heinrich: Mineralbestand, Gefüge und physikalische Eigenschaften von Kalksandsteinen. In: Fortschritte der Mineralogie. Stuttgart : Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (1980) Heft 1, S. 37 - 67

MPA Bremen (2014)

Amtliche Materialprüfungsanstalt der Freien Hansestadt Bremen (MPA Bremen): Leichter Schaumstein aus groben PB-Granulaten : Beschreibung zum Forschungsantrag vom 30. Mai 2014

MPA Bremen (2019)

Amtliche Materialprüfungsanstalt der Freien Hansestadt Bremen (MPA Bremen): Laufendes Forschungsvorhaben : Entwicklung eines Werksteines aus groben Porenbetongranulaten mit geschäumter und injizierter Matrix : Leichter Schaumstein aus groben Porenbetongranulaten. IGF 18745 N

Müller (2018)

Müller, Anette: Baustoffrecycling : Entstehung - Aufbereitung - Verwertung. Wiesbaden : Springer, 2018

Müller/Chucholowski/Thienel (2016)

Müller, Holger ; Chucholowski, Carola ; Thienel, Karl-Christian: „Sulfatarmer Porenbeton“ : Möglichkeiten einer sulfatträger- und zementfreien Rezeptur zur Verbesserung der Recyclingfähigkeit, Umweltverträglichkeit und CO₂-Bilanz von Porenbeton. Osnabrück, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Abschlussbericht, 2016

Nielsen/Vrijders/Broos/Quaghebeur (2012)

Nielsen, Peter ; Vrijders, Jeroen ; Broos, Kris ; Quaghebeur, Mieke: Recycling of autoclaved aerated concrete (AAC).

<http://www.swedgeo.se/contentassets/dee718012f7e41869d7e5f783db22be0/k7.-peter-nielsen-rev.pdf> Tag des Abrufes: 29.11.18

Porenbetonwerk Laussnitz (2018)

Porenbetonwerk Laussnitz: PORIT-Plansteine.

<https://www.porit-laussnitz.de/produkte/plansteine/> Tag des Abrufes: 22.11.18

Reinhold/Müller (2000)

Reinhold, Matthias ; Müller, Anette: Leichtzuschläge aus Feinstoffen des Mauerwerksabbruchs. Weimar, Bauhaus-Universität, 2000

Renman/Renman (2012)

Renman, Gunno ; Renman, Agnieszka: Sustainable use of crushed autoclaved aerated concrete (CAAC) as a filter medium in wastewater purification. In: 8th International conference on sustainable management of waste and recycled materials in construction, Gothenburg, Sweden, 30 May - 1 June 2012.

Römpfer Baustoffe (2018)

Römpfer Baustoffe GmbH: Porenbeton.

<http://www.porenbeton-uschalen.de/porenbeton/> Tag des Abrufes: 07.02.18

Schlegel/Hums (2002)

Schlegel, Ernst ; Hums, Dieter: Porenbeton – die Entwicklung von Gefüge und Eigenschaften eines Werkstoffes. In: Mauerwerk. Berlin : Ernst & Sohn (2002) Heft 3, S. 82 - 88

Schober (2005)

Schober, Georg: Die chemischen Umsetzungen bei der Herstellung von Porenbeton : Aus Zement, Kalk, Gips und Quarzsand wird Porenbeton. In: ZKG International (2005) Heft 7, S. 63 - 70

Schober (2012)

Schober, Georg: Produktion von Porenbeton mit stehenden Blöcken im Autoklaven.

<http://www.pb-aac.de/atechnik.html> Tag des Abrufes: 14.11.18

Schramm (2008)

Schramm, Reinhard: Porenbeton – Chronik einer Entwicklung. In: Mauerwerk. Berlin : Ernst & Sohn (2008) Heft 6, S. 346 - 350

Schröter (2014)

Schröter, Frank: Nachhaltigkeit in Verkehrs- und Stadtplanung. Braunschweig : bookboon, 2014

Stark/Seyfarth/Mielke (2003)

Stark, Jochen ; Seyfarth, Katrin ; Mielke, Ian: Dauerhaftigkeit haufwerksporiger Leichtbetone mit Schaummörtelbindung. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2003

Stark/Wicht (2000)

Stark, Jochen ; Wicht, Bernd: Zement und Kalk : Der Baustoff als Werkstoff. Basel : Springer, 2000

Stier/Forberger (2016)

Stier, Christian ; Forberger, Jens: Ergebnisse einer Befragung zum Umgang mit Porenbetonabfällen aus dem Abbruch von Gebäuden. In: Chemie Ingenieur Technik. Weinheim : WILEY-VCH Verlag (2016) Heft 4, S. 506 - 513

Stürmer (1997)

Stürmer, Silvia: Injektionsschaummörtel für die Sanierung historischen Mauerwerkes unter besonderer Berücksichtigung bauschädlicher Salze. Weimar, Bauhaus-Universität, Fakultät Bauingenieurwesen, Diss., 1997

Volk/Schirmer (2010)

Volk, Jürgen ; Schirmer, Peter: Bewertung der Verwendung von Porenbetonrecyklaten für die Herstellung von Bodenwerkstoffen und Düngemitteln. In: Tagungsband zur Fachtagung Recycling R'10 am 22. und 23. September 2010, S. 52 f.

Zeidler (2017)

Zeidler, Undine: Das Warten hat ein Ende : Recycling-Station Borgfeld eröffnet. In: Weser Kurier : Wümme-Zeitung.

https://www.weser-kurier.de/region/wuemme-zeitung_artikel,-das-warten-hat-ein-ende-_arid,1651376.html Tag des Abrufes: 04.12.18

Verzeichnis befragter Personen

Dipl.-Ing. Frank Hlawatsch	Amtliche Materialprüfungsanstalt der Freien Hansestadt Bremen (MPA Bremen)
Dipl.-Ing. Ricarda Küstermann	Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien IWT Bremen
Dr. Bernd Schulte	Wehrhahn GmbH Delmenhorst

Verzeichnis verwendeter Gesetzestexte

Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) in der Fassung vom 24. Februar 2012, zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 9 des Gesetzes vom 20. Juli 2017

Europäische Bauproduktenverordnung (BauPVO) EU 305/2011

Verzeichnis verwendeter Normen

Norm DIN 1048-5:1991-06. Prüfverfahren für Beton; Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper

Norm DIN EN 1015-6:2007-05. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 6 : Bestimmung der Rohdichte von Frischmörtel : Deutsche Fassung

Norm DIN EN 12350-9:2010-12. Prüfung von Frischbeton - Teil 9 : Selbstverdichtender Beton – Auslauftrichterversuch : Deutsche Fassung

Norm DIN EN 12390-3:2009-07. Prüfung von Festbeton - Teil 3 : Druckfestigkeit von Probekörpern : Deutsche Fassung

Norm DIN EN 12667:2001-05. Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand : Deutsche Fassung

Norm DIN EN ISO 12572:2017-05. Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Verfahren mit einem Prüfgefäß (ISO 12572:2016) : Deutsche Fassung

Norm DIN V 18580:2007-03. Mauermörtel mit besonderen Eigenschaften

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine als die in der Arbeit angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Wurde sinngemäßes oder wortwörtliches Gedankengut anderen Werken entnommen, habe ich dies unter Angabe der entsprechenden Quelle kenntlich gemacht.

Braunschweig, Februar 2019
