

**Experimentelle Untersuchungen zum
Stauchverhalten von stark porosiertem Beton
und dessen Einzelkomponenten**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS
(Dr.-Ing.)

der Fakultät für
Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Ruhr-Universität Bochum
genehmigte

DISSERTATION

von

Sven Plückelmann, M.Sc.
aus Witten



Sonderforschungsbereich 837
**Interaktionsmodelle für den
maschinellen Tunnelbau**

Bochum, im April 2024

Tag der Einreichung: 6. Dezember 2023

Tag der mündlichen Prüfung: 25. März 2024

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher
Lehrstuhl für Baustofftechnik
Ruhr-Universität Bochum

2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark
Lehrstuhl für Massivbau
Ruhr-Universität Bochum

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum.

Die Arbeit basiert auf dem Teilprojekt B1 „Multimaterielle modulare Tübbingsysteme für einen adaptiven, robusten Tunnelausbau“ des durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereichs 837 „Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau“. Für die finanzielle Förderung dieses Forschungsprojektes und meiner Arbeit möchte ich mich bei der DFG herzlich bedanken. Den am Teilprojekt beteiligten Kollegen des Lehrstuhls für Massivbau der Ruhr-Universität Bochum danke ich für die stets freundliche und konstruktive Zusammenarbeit.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher, der mir diese Arbeit ermöglicht hat. Vielen herzlichen Dank für die wissenschaftliche Betreuung, das entgegengebrachte Vertrauen und die exzellente baustofftechnologische Ausbildung, die ich die letzten Jahre bei Ihnen genossen habe.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark für das wissenschaftliche Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Koreferats herzlich bedanken. Vielen Dank auch an Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes für die kurzfristige Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Bei allen aktuellen sowie ehemaligen wissenschaftlichen und nicht-wissenschaftlichen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Baustofftechnik möchte ich mich für die kollegiale Zusammenarbeit und Unterstützung bedanken. Ganz besonders danke ich Frau Dr.-Ing. Bou-Young Youn-Câle für die Durchsicht meiner Arbeit und die großartige wissenschaftliche sowie menschliche Unterstützung. Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Dr.-Ing. Robin Przondziono, Herrn Dr.-Ing. Christoph Schulte-Schrepping und Herrn M. Sc. Niklas Schäfer für die zahlreichen Diskussionen und Anregungen. Des Weiteren danke ich Herrn Dr.-Ing. Hussein Alawieh und Herrn Dr.-Ing. Karsten Winkler für die organisatorische und technische Unterstützung bei den zahlreichen experimentellen Untersuchungen, die ich in den Versuchshallen des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr-Universität Bochum durchführen konnte.

Vielen Dank auch für die freundschaftliche Unterstützung, die ich von den Kolleginnen und Kollegen vom benachbarten Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb erfahren habe. Insbesondere danke ich Frau Dr.-Ing. Annika Jodehl, Frau Dr.-Ing. Anna-Lena Hammer, Herrn Dr.-Ing. Sascha Freimann und Herrn Dr.-Ing. Marius Schröer.

Bedanken möchte ich mich auch bei all meinen Freundinnen und Freunden, die immer hinter mir standen. Mit eurer bedingungslosen Unterstützung habt ihr einen nicht unerheblichen Teil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Ferner danke ich Dipl.-Ing. Martin Keßler für die kurzfristige Durchsicht meiner Arbeit und die wertvollen Anregungen.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, meinen Eltern Beate und Gerd Plückelmann sowie meinem Bruder Jan Plückelmann und seiner Freundin Larissa Möller für die jahrelange liebevolle Unterstützung, den vorbehaltlosen Rückhalt sowie die verständnisvolle Geduld während der Entstehung dieser Arbeit. Ohne euch wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Ich liebe euch über alles! Vielen Dank auch an meinen Cousin, Herrn Dr. Andreas Kessenbrock, und seine Verlobte, Frau Dr. Fabienne Ruoss. Ich danke euch für eure liebevolle Unterstützung und die nötige Ablenkung.

Witten, im April 2024

Sven Plückelmann

Kurzfassung

Für besondere Anwendungsfälle, wie beispielsweise Stauchschichten im Tunnelbau, liegen bereits erste Ansätze für Betone vor, die durch ein hohes plastisches Stauchvermögen charakterisiert sind. Dieses für Beton untypische Verformungsverhalten wird über eine hohe Porosität und die damit verbundene Volumenkompressibilität erzielt. Gesicherte Kenntnisse zum Stauchverhalten stark porosierter Betone sind jedoch bislang äußerst begrenzt.

Das globale Ziel dieser Arbeit, die im Rahmen des DFG-Sonderforschungsbereichs 837 entstand, war, das Stauchverhalten stark porosierter Betone grundlegend zu charakterisieren sowie maßgeblich relevante Einflussparameter zu identifizieren und quantifizieren. Der Fokus der experimentellen Untersuchungen lag auf Betonen mit einem matrix- und kornporigen Gefüge, die sich aus einer aufgeschäumten Zementsteinmatrix und porösen Zuschlagstoffen (leichte Gesteinskörnungen, Schaumstoffzusätze) zusammensetzen. Um das Stauchverhalten des Gesamtsystems „Beton“ differenziert analysieren zu können, wurden auch die Staucheigenschaften der Einzelkomponenten untersucht.

In Stauchversuchen an Schüttungen von verschiedenen porösen Zuschlagstoffen wurden die Kornstruktur und die Porosität als maßgebende Einflussgrößen auf das Stauchverhalten der Zuschlagstoffe identifiziert. Mit zunehmender Porosität bzw. abnehmender Kornrohddichte konnte eine Abnahme des aus der Stauchung resultierenden Spannungszuwachses festgestellt und quantifiziert werden. Das Stauchverhalten von porosiertem Zementstein mit Luftporen bzw. Schaumstoffperlen (EPS-Perlen) wurde in vollflächigen Stauchversuchen mit Querdehnungsbehinderung erfasst. Nach Überschreiten des elastischen Bereichs stellte sich ein plastisches Stauchverhalten ein, das maßgeblich durch den Luft- bzw. EPS-Gehalt beeinflusst wurde. Mit zunehmendem Luft- bzw. EPS-Gehalt nahmen sowohl das Spannungsniveau als auch der Spannungszuwachs ab. Des Weiteren konnte ein Einfluss der Porengröße auf das Stauchverhalten des porosierten Zementsteins nachgewiesen werden. Bei den Untersuchungen am porosierten Beton wurden Variationen der Art und Korngröße der porösen Zuschlagstoffe sowie des Wasserzementwertes einbezogen. Der Einfluss der Materialvariationen wurde in teilflächigen Stauchversuchen mit Querdehnungsbehinderung untersucht. Ähnlich wie beim porosierten Zementstein waren die Betone durch ein ausgeprägtes plastisches Stauchverhalten charakterisiert. Dabei konnten eindeutige Korrelationen abgeleitet werden, mit denen der Einfluss der materialtechnischen Parameter auf die charakteristischen Merkmale des Stauchverhaltens (initiale Steifigkeit, Grenzspannung, Spannungszuwachs im plastischen Bereich und Verfestigungsbereich etc.) quantitativ abgebildet werden konnte. Um anwendungsbezogene Randbedingungen hinsichtlich voll- bzw. teilflächigen Stauchungen abzudecken, wurde das Stauchverhalten auch unter Variation des Lastflächenverhältnisses untersucht. Dabei konnte unter anderem eine Zunahme des Stauchvermögens mit zunehmendem Lastflächenverhältnis festgestellt werden. Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse können als Grundlage für die Konzeptionierung, Optimierung und Anwendung von Betonen mit einem ausgeprägten plastischen Stauchvermögen genutzt werden.

Abstract

For special applications, for example compressible layers in tunnel constructions, there are already initial approaches for concretes, which are characterized by a high plastic compressibility. This deformation behaviour, which is atypical for concrete, is achieved through the high porosity and the accompanying volume compressibility. However, reliable knowledge of the compression behaviour of highly porous concretes is still very limited.

The global objective of the present work, which was carried out within the framework of the DFG Collaborative Research Centre 837, was to fundamentally characterize the compression behaviour of highly porous concretes and to identify and quantify relevant influencing parameters. The focus of the experimental investigations was on concretes with a matrix- and grain-porous structure, which are composed of a foamed cement paste matrix and porous additives (lightweight aggregates, foam beads). In order to analyze the compression behaviour of the overall system "concrete" in a differentiated manner, the compression properties of the individual components were also investigated.

In compression tests on piles of various porous additives, the particle structure and porosity were identified as decisive influencing variables on the compression behaviour of the additives. With increasing porosity and decreasing particle density, a reduction in the stress increase resulting from the compression could be determined and quantified. The compression behaviour of porous cement paste with air voids or foam beads (EPS-beads), respectively, was investigated in compression tests under full-area loading with transverse strain constraint. After exceeding the elastic stage, the porous cement paste was characterized by a plastic compression behaviour, which was predominantly influenced by the air/EPS content. As the air/EPS content increased, both the stress level and the stress increase diminished. Furthermore, an influence of the pore size on the compression behaviour of the porous cement paste could be demonstrated. Within the investigations on porous concrete, the type and particle size of the porous additives as well as the water-cement ratio were varied. The influence of the material-related parameters was studied in compression tests under partial-area loading with transverse strain constraint. Similar to the porous cement paste, the concretes were characterized by a pronounced plastic compression behaviour. Clear correlations could be derived, with which the influence of the material-related parameters on the characteristic features of the compression behaviour (initial stiffness, critical stress, stress increase in the plastic stage and densification stage, etc.) could be qualitatively evaluated. To consider the influence of application-related boundary conditions with regard to full- and partial-area loadings, the compression behaviour was also investigated under variation of the loading area ratio. Among other things, an increase in the compressibility was observed as the area ratio rose. The findings obtained in the present work can be used as a basis for the design, optimization and application of concretes with a high plastic compressibility.

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	I
KURZFASSUNG	III
ABSTRACT	IV
INHALTSVERZEICHNIS	V
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VIII
TABELLENVERZEICHNIS	XVII
1 EINLEITUNG	1
1.1 Hintergrund und Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Anwendung der Arbeit	2
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	3
2 GRUNDLAGEN	5
2.1 Porosierung von Beton	5
2.1.1 Allgemeine Ansätze	5
2.1.2 Einführung von Luftporen während des Mischvorgangs	6
2.1.3 Leichte Gesteinskörnung	8
2.1.3.1 Allgemeines	8
2.1.3.2 Struktureigenschaften	9
2.1.3.3 Mechanische Eigenschaften	11
2.1.3.4 Hygrische Eigenschaften	15
2.2 Trag-, Bruch- und Verformungsverhalten von porosiertem Beton im Vergleich zu Normalbeton	16
2.2.1 Trag- und Bruchverhalten unter einachsiger Druckbeanspruchung	16
2.2.2 Spannungs-Stauchungsverhalten unter einachsiger Druckbeanspruchung	19
2.2.3 Querdehnung unter einachsiger Druckbeanspruchung	23
2.2.4 Einachsige Druckfestigkeit	25
2.2.5 Mehrachsige Druckbeanspruchung	27
2.2.6 Einachsige Druckbeanspruchung mit Umschnürung	28
2.2.7 Teilflächenbeanspruchung	29
2.3 Zellulare Werkstoffe	31
2.3.1 Allgemeines und Begriffe	31
2.3.2 Spannungs-Stauchungsverhalten unter Druckbeanspruchung	32
3 ZEMENTGEBUNDENE MATERIALSYSTEME MIT HOHEM PLASTISCHEN STAUCHVERMÖGEN	35
3.1 Bisherige Untersuchungen	35

3.1.1	Vorbemerkungen	35
3.1.2	Stauchverhalten von Schaumbetonen	35
3.1.3	Stauchverhalten von faserverstärkten Schaumbetonen	39
3.1.4	Stauchverhalten von Leichtbetonen mit EPS	45
3.2	Anwendungsgebiete	48
4	ÜBERSICHT DER EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNGEN ZUM STAUCHVERHALTEN	53
5	UNTERSUCHUNGEN AN PORÖSEN ZUSCHLAGSTOFFEN	55
5.1	Poröse Zuschlagstoffe.....	55
5.2	Charakterisierung der Zuschlagstoffe.....	55
5.2.1	Allgemeine Eigenschaften	55
5.2.2	Reindichte, Kornrohichte und Schüttdichte.....	56
5.2.3	Hohlraumgehalt des Haufwerks	57
5.2.4	Porosität.....	58
5.2.5	Wasseraufnahme.....	59
5.2.6	Korndruckfestigkeit.....	59
5.3	Stauchversuche	61
5.4	Stauchverhalten	61
5.4.1	Verdichtungseffekte während der Stauchversuche.....	61
5.4.2	Spannungs-Stauchungsverhalten	62
5.4.3	Korrelation zwischen Spannung und Porosität bzw. Kornrohichte.....	67
6	UNTERSUCHUNGEN AN POROSIERTEM ZEMENTSTEIN	69
6.1	Variationen.....	69
6.2	Zusammensetzung, Herstellung und Probekörper.....	69
6.3	Charakterisierung der Zementleime.....	72
6.3.1	Fließvermögen.....	72
6.3.2	Frischrohichte	72
6.3.3	Luft-/EPS-Gehalt.....	73
6.4	Charakterisierung der Zementsteine.....	75
6.4.1	Festrohichte und relative Porosität	75
6.4.2	Gefüge- und Porenstruktur	76
6.4.3	Druckfestigkeit	81
6.5	Stauchversuche	82
6.6	Stauchverhalten	84
6.6.1	Charakteristisches Spannungs-Stauchungsverhalten.....	84
6.6.2	Einfluss des Luft-/EPS-Gehaltes	87
6.6.3	Einfluss der Porengröße.....	94
6.6.4	Reproduzierbarkeit der Stauchversuche	97

7	UNTERSUCHUNGEN AN POROSIERTEM BETON.....	99
7.1	Variationen	99
7.2	Zusammensetzung.....	99
7.2.1	Basiszusammensetzung.....	99
7.2.2	Variation der Zuschlagstoffe.....	100
7.2.3	Variation des Wasserzementwertes.....	101
7.3	Herstellung und Probekörper	102
7.4	Frischbetoneigenschaften	103
7.5	Festbetoneigenschaften	104
7.6	Stauchversuche.....	107
7.7	Stauchverhalten.....	109
7.7.1	Charakteristisches Spannungs-Stauchungsverhalten unter Teilflächenbelastung.....	109
7.7.2	Materialeinflüsse.....	113
7.7.2.1	Art der Zuschlagstoffe	113
7.7.2.2	Korngröße der Zuschlagstoffe	119
7.7.2.3	Wasserzementwert	122
7.7.3	Einfluss des Lastflächenverhältnisses (Voll-/Teilflächenbelastung)	125
7.7.4	Reproduzierbarkeit der Stauchversuche.....	130
8	ZUSAMMENFASSUNG UND ERKENNTNISSE.....	132
8.1	Stauchverhalten der porösen Zuschlagstoffe.....	132
8.2	Stauchverhalten des porosierten Zementsteins	133
8.3	Stauchverhalten des porosierten Betons	135
9	AUSBLICK.....	139
10	LITERATURANGABEN	141
	ANHANG.....	149
	LEBENS LAUF	177

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematischer Aufbau und inhaltliche Schwerpunkte der Arbeit.....	3
Abbildung 2:	Von Leichtbeton bekannte Ansätze zur Porosierung von Beton.....	5
Abbildung 3:	Gliederung der verfügbaren leichten Gesteinskörnungen nach [2].....	8
Abbildung 4:	Kornrohdichten typischer leichter Gesteinskörnungen, Abb. modifiziert nach [2].....	9
Abbildung 5:	Porosität verschiedener leichter Gesteinskörnungen in Abhängigkeit der Kornrohdichte, Abb. modifiziert nach [2].....	10
Abbildung 6:	Blähtonkorn von außen und im Querschnitt [2] (links), ausgeprägte Sinterhaut eines Blähtonkorns, Abb. modifiziert nach [2] (rechts).....	11
Abbildung 7:	Prüfung der Korndruckfestigkeit am Haufwerk leichter Gesteinskörnungen mit dem Druckzylinderverfahren, Abb. modifiziert nach DIN 4226-3 [17].	12
Abbildung 8:	Kraft-Wegbeziehung verschiedener leichter Gesteinskörnungen im Druckzylinderversuch, Abb. modifiziert nach [2].....	13
Abbildung 9:	Korndruckfestigkeit (links) und Festigkeitspotenzial (rechts) verschiedener leichter Gesteinskörnungen in Abhängigkeit der Kornrohdichte, Abb. modifiziert nach [2].....	13
Abbildung 10:	Zugfestigkeit leichter Gesteinskörnungen in Abhängigkeit der Kornrohdichte, Abb. modifiziert nach [2].....	14
Abbildung 11:	Dynamischer E-Modul leichter Gesteinskörnungen in Abhängigkeit der Kornrohdichte, Abb. modifiziert nach [2].....	15
Abbildung 12:	Schematische Darstellung unterschiedlicher Feuchteverteilungen in leichten Gesteinskörnungen mit Sinterhaut, Abbildung modifiziert nach [2].....	16
Abbildung 13:	Verläufe der Druckspannungstrajektorien [26, 27]. Links: Fall A (charakteristisch für Normalbeton), rechts: Fall B (charakteristisch für gefügedichten Leichtbeton).....	17
Abbildung 14:	Spannungsverteilung und Bildung von Mikrorissen im Bereich eines Gesteinskorns [26]. Links: Fall A (charakteristisch für Normalbeton), rechts: Fall B (charakteristisch für gefügedichten Leichtbeton).	18
Abbildung 15:	Rissentwicklung und Bruchvorgang [26, 27]. Links: Fall A (charakteristisch für Normalbeton), rechts: Fall B (charakteristisch für gefügedichten Leichtbeton).....	19
Abbildung 16:	Qualitative Spannungs-Stauchungskurve von Normalbeton unter einachsiger Druckbelastung im verformungsgesteuerten Kurzzeitversuch, Kurvenverlauf nach [32] (links), Vergleich zur Spannungs- Stauchungskurve von gefügedichtem Leichtbeton, Kurvenverläufe nach [6] (rechts).....	20

Abbildung 17:	Spannungs-Stauchungskurven von Betonen mit matrix- und kornporigem Gefüge („Leichtzuschlag-Schaumbetone“ mit Blähton, variierende Luftporengehalte) unter einachsiger Druckbelastung [4].	22
Abbildung 18:	Spannungs-Stauchungskurven von Porenbeton unter einachsiger Druckbelastung mit variierenden Festbetonrohddichten [31].....	22
Abbildung 19:	Querdehnungsverläufe von Normalbeton, gefügedichtem Leichtbeton (Kurvenverläufe nach [29]) und Porenbeton (Kurvenverlauf nach [34]).	24
Abbildung 20:	Einfluss des Wasserzementwertes und der Zementfestigkeitsklasse auf die Druckfestigkeit von Normalbeton, Abb. modifiziert nach [6] (links), halbqualitativer Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Trockenrohddichte, Abb. modifiziert nach [4] (rechts).	25
Abbildung 21:	Zusammenhang zwischen Betonrohddichte und Druckfestigkeit von Schaumbeton (und Porenbeton), Abb. modifiziert nach [3].	27
Abbildung 22:	Betondruckfestigkeit unter mehrachsiger Beanspruchung: Grenzlinie bei zweiachsiger Beanspruchung [3], Abb. basierend auf [34, 39, 45] (links), Grenzfläche bei dreiachsiger Beanspruchung [3], Originalabb. aus [46] (rechts).	28
Abbildung 23:	Teilflächenbelastung von Beton: Schematische Darstellung der Umschnürungswirkung nach [46] (links), charakteristischer Verlauf der Hauptspannungstrajektorien [48] (Mitte), qualitative Darstellung des resultierenden Spannungszustands [48] (rechts).	29
Abbildung 24:	Steigerung der maximal aufnehmbaren Teilflächenspannung nach dem Quadrat- bzw. Kubikwurzel-Ansatz (links) und Einfluss der Trockenbeton-Rohddichte nach DIN EN 1992-1-1 [36] (rechts).	30
Abbildung 25:	Idealisiertes Spannungs-Stauchungsverhalten zellulärer Werkstoffe unter Druckbeanspruchung nach [56].	32
Abbildung 26:	Schematische Darstellung der verschiedenen Verformungsmechanismen zellulärer Werkstoffe [60]: Linear-elastisches Durchbiegen (oben links), nichtlinear-elastisches Knicken bzw. Beulen (oben rechts), Ausbildung von Fließgelenken (unten links), Brechen bzw. Biegeversagen (unten rechts).	33
Abbildung 27:	Kraft vs. Eindringtiefe des Druckstempels bei teilflächigen Stauchversuchen an Schaumbetonen mit variierendem Lastflächendurchmesser (links) und Zusammenhang zwischen Rohddichte und Grenzspannung bzw. Energieabsorption (rechts) [61].....	36
Abbildung 28:	Versuchsaufbau für teilflächige Stauchversuche mit Querdehnungsbehinderung aus [62].	36
Abbildung 29:	Spannung vs. Eindringtiefe des Druckstempels bei teilflächigen Stauchversuchen mit Querdehnungsbehinderung an Schaumbetonen (Betonalter: 7 Tage, Variation der Rohddichte zwischen rd. 400, 600 und 800 kg/m ³) [62].	37

Abbildung 30:	Schnittbilder von Proben nach verschiedenen Eindringtiefen des Druckstempels (links): Eindringtiefen (v.l.n.r.): 1, 30, 120 und 180 mm; Detailaufnahme des komprimierten Teilbereichs unterhalb der eingedrückten Lastfläche (rechts) [62].....	38
Abbildung 31:	Spannung vs. Eindringtiefe des Druckstempels bei teilflächigen Stauchversuchen mit Querdehnungsbehinderung an Schaumbetonen: Einfluss des Betonalters (links), Einfluss des Sandgehaltes und der Sandpartikelgröße (rechts) [63].....	38
Abbildung 32:	Spannungs-Stauchungskurven aus vollflächigen Stauchversuchen an faserverstärkten Schaumbetonen [64]: Einfluss der Stauchrate (links), Einfluss der Rohdichte und Stauchrate (rechts).	40
Abbildung 33:	Spannungs-Stauchungskurven aus vollflächigen Stauchversuchen an faserverstärkten Schaumbetonen: Einfluss der Betonrohddichte (v.l.n.r.: $\rho = 600, 800, 1.000 \text{ kg/m}^3$) [65].	41
Abbildung 34:	Fotos von vollflächig belasteten Proben nach verschiedenen Stauchungsstufen [65].....	42
Abbildung 35:	Probekörper mit variierender Schlankheit (links) und Spannungs-Stauchungskurven aus vollflächigen Stauchversuchen unter Variation der Probenschlankheit (rechts) [65].	42
Abbildung 36:	Versuchsaufbau für teilflächige Stauchversuche mit Querdehnungsbehinderung (links) und untersuchte Laststempelkonfigurationen (rechts) [65].	43
Abbildung 37:	Kraft vs. Eindringtiefe des Druckstempels bei teilflächigen Stauchversuchen an faserverstärktem Schaumbeton: Einfluss der Lastflächengröße (links) und Einfluss der Mantelreibung (rechts) [65].	43
Abbildung 38:	Röntgentomografische Aufnahmen von teilflächig gestauchten Proben nach verschiedenen Eindringtiefen des Druckstempels [65].	44
Abbildung 39:	Zusammenhang zwischen der Eindringtiefe des Laststempels („Indentation (h)“) und Höhe des komprimierten Teilbereichs unterhalb der eingedrückten Lastfläche („Length of crushed zone (l)“) [65].	44
Abbildung 40:	Gefüge von „Dämpferbeton“ mit einem hohen Gehalt an EPS-Perlen ($\text{Ø} \approx 1,5 \text{ mm}$) [68-71].....	45
Abbildung 41:	Schematische Darstellung der Stauchversuche mit bzw. ohne vollständige Querdehnungsbehinderung [70, 72] (links), Einfluss der Querdehnungsbehinderung und der Belastungsgeschwindigkeit auf das Spannungs-Stauchungsverhalten [72] (rechts).	45
Abbildung 42:	Foto des Versuchsaufbaus für teilflächige Stauchversuche mit Querdehnungsbehinderung (links) und untersuchte Laststempelkonfigurationen (rechts) [68].	46
Abbildung 43:	Einfluss der Laststempelgeometrie (links) und der Mantelreibung (rechts) auf das Kraft-Eindringverhalten bei teilflächigen Stauchversuchen mit Querdehnungsbehinderung [68].....	47

Abbildung 44:	Funktionsprinzip eines verformungsfähigen Ausbaus (qualitative Verläufe der Ausbaukennlinien) nach [76, 84].....	48
Abbildung 45:	Stauchfähige Betonelemente (hiDCon) in einer Spritzbetonschale (links) und Spannungs-Stauchungsverhalten von hiDCon-Elementen mit verschiedenen Material- und Bewehrungskonfigurationen (rechts) [75].	49
Abbildung 46:	Anwendung von hiDCon als Fundations- bzw. Anker Elemente im Bereich einer Tunnelsohle (links) und Kraft-Stauchungskurve eines Anker Elements aus hiDCon (rechts) [75, 77].	49
Abbildung 47:	Schematische Darstellung eines verformungsfähigen Tunnelausbaus in Tübbingbauweise mit stauchfähigem Ringspaltmörtel und zusätzlicher Stauchsicht, Abb. modifiziert nach [85, 86].	50
Abbildung 48:	Spannungs-Stauchungskurven von stauchfähigen Ringspaltmörteln: Compex-Support-System [82] (links), DeCo-Grout [76] (rechts).....	50
Abbildung 49:	Gefahrstoffbehälter mit Stoßdämpferelementen [91] (links) und Stoßdämpferfundament [72] (rechts).....	51
Abbildung 50:	Fotos eines Notfall-Stoppsystems (Engineered Material Arresting System) für Flugzeuge auf Start- und Landebahnen aus zementgebundenen Materialien mit hohem plastischen Stauchvermögen (links: [96], rechts: [97]).....	52
Abbildung 51:	Übersicht der experimentellen Untersuchungen zum Stauchverhalten von stark porosiertem Beton und dessen Einzelkomponenten.	54
Abbildung 52:	Poröse Zuschlagstoffe (v.o.l.n.u.r.): Blähton-Leichtsand 0/2 mm, Blähton 2/8 mm, Blähglas 2/4 mm, Vermiculite 2/8 mm, EPS-Perlen 2/5 mm.....	55
Abbildung 53:	Zusammenhang zwischen der Porosität und der Kornrohichte der porösen Zuschlagstoffe.....	58
Abbildung 54:	Zusammenhang zwischen der Korndruckfestigkeit und der Kornrohichte bzw. Porosität der porösen Zuschlagstoffe.	60
Abbildung 55:	Schematische Darstellung (links) und Foto (rechts) des Versuchsaufbaus für Stauchversuche am Haufwerk der porösen Zuschlagstoffe.	61
Abbildung 56:	Am Haufwerk ermittelte Spannungs-Stauchungskurven der porösen Zuschlagstoffe im Spannungsbereich von 0 bis 14 N/mm ² (oben) bzw. 0 bis 2,5 N/mm ² (unten).....	63
Abbildung 57:	Charakteristische Kornstruktur von Vermiculiten: Mikroskopische Aufnahmen eines Vermiculitkorns von außen.....	64
Abbildung 58:	Charakteristische Kornstruktur von Blähglas: Mikroskopische Aufnahmen eines Blähglaskorns von außen (links) und im Querschnitt (Mitte und rechts).	65
Abbildung 59:	Charakteristische Kornstruktur von Blähton: Mikroskopische Aufnahmen eines Blähtonkorns von außen (links) und im Querschnitt (Mitte und rechts).	66
Abbildung 60:	Spannungen bei einer Stauchung von 15 bzw. 50 % in Abhängigkeit der Porosität bzw. Kornrohichte.	67

Abbildung 61:	Spezifischer Spannungszuwachs in Abhängigkeit der Porosität bzw. Kornrohddichte.	67
Abbildung 62:	Mischregime für die Herstellung des Basis-Zementsteins (ZS-0) und der porosierten Zementsteinvarianten mit Luftporen (ZS-L) bzw. EPS-Perlen (ZS-EPS).	70
Abbildung 63:	Luftgehalt in Abhängigkeit der Schaumbildner-Dosierung und der Mischzeit.	71
Abbildung 64:	Trichterauslaufzeiten (TAZ) der Zementleime unmittelbar nach der Herstellung.	72
Abbildung 65:	Schnittbilder von Würfelproben (oben) und mikroskopische Aufnahmen (20-fache Vergrößerung, Maßstab: 1 mm) von Teilbereichen der Schnittflächen (unten): ZS-L40 (links), ZS-L50 (Mitte) und ZS-L60 (rechts) [105].	76
Abbildung 66:	Luftporengrößenverteilung der Zementsteine ZS-L40, ZS-L50 und ZS-L60.	77
Abbildung 67:	Schnittbilder von Würfelproben der Zementsteine ZS-EPS50_0,5/1 (links) und ZS-EPS50_1/2 (rechts).	78
Abbildung 68:	Mikroskopische Aufnahmen (10-fache Vergrößerung, Maßstab: 2 mm) von Teilbereichen der Schnittflächen der Zementsteine ZL-EPS40_0,5/1 (links), ZL-EPS50_0,5/1 (Mitte) und ZL-EPS60_0,5/1 (rechts).	78
Abbildung 69:	Mikroskopische Aufnahmen (20-fache Vergrößerung, Maßstab: 1 mm) von Teilbereichen der Schnittflächen der Zementleime ZL-L50 (links), ZL-EPS50_0,5/1 (Mitte) und ZL-EPS50_1/2 (rechts).	79
Abbildung 70:	Zweidimensionales Modell zur Ermittlung der mittleren Stegdicke in Abhängigkeit des Porengehaltes (Luft-/EPS-Gehaltes) bzw. der Porengröße.	79
Abbildung 71:	Mittlere Stegdicke in Abhängigkeit des mittleren Porendurchmessers und des Luft-/EPS-Gehaltes.	80
Abbildung 72:	Druckfestigkeit der Zementsteine in Abhängigkeit der relativen Porosität bzw. Festrohddichte.	81
Abbildung 73:	3D-Darstellung des Versuchsstands für einachsige Druckversuche an Würfelproben mit Querdehnungsbehinderung, entwickelt in Anlehnung an [66, 68, 68-73, 91].	83
Abbildung 74:	Fotos des Versuchsstands für einachsige Druckversuche an Würfelproben mit Querdehnungsbehinderung: Draufsicht ohne Deckel (links), Ansicht während eines Stauchversuchs [105] (rechts).	83
Abbildung 75:	Spannungs-Stauchungskurven des Basis-Zementsteins (ZS-0) und des Zementsteins mit rd. 50 Vol.-% Luftporen (ZS-L50) im Stauchungsbereich von 0 bis 50 % (links) und 0 bis 5 % Stauchung (rechts).	84

Abbildung 76:	Schnittbilder und lichtmikroskopische Gefügeaufnahmen (20-fache Vergrößerung, Maßstab 1 mm) von Würfelproben des Zementsteins ZS-L50 bei einer Stauchung von 0 % (links) einer Stauchung von rd. 44 % (rechts) [105].	86
Abbildung 77:	Spannungs-Stauchungskurven der Zementsteine mit Luftporen im Stauchungsbereich von 0 bis 65 % (links) bzw. 0 bis 2 % Stauchung (rechts).	87
Abbildung 78:	Spannungs-Stauchungskurven der Zementsteine mit EPS-Perlen 0,5/1 mm im Stauchungsbereich von 0 bis 65 % (links) bzw. 0 bis 2 % Stauchung (rechts).	88
Abbildung 79:	Spannungs-Stauchungskurven der Zementsteine mit EPS-Perlen 1/2 mm im Stauchungsbereich von 0 bis 65 % (links) bzw. bis 2 % Stauchung (rechts).	88
Abbildung 80:	Initiale Steifigkeit in Abhängigkeit der relativen Porosität bzw. Festrohdichte.	88
Abbildung 81:	Bezogene (links) und absolute Grenzspannungen (rechts) in Abhängigkeit der relativen Porosität bzw. Festrohdichte.	89
Abbildung 82:	Spannungsniveau bei $\varepsilon_z = 10\%$ (links) und absoluter Spannungszuwachs im Stauchungsintervall $I_\varepsilon[5\%;10\%]$ (rechts) in Abhängigkeit der relativen Porosität bzw. Festrohdichte.	90
Abbildung 83:	Absolute Spannungszuwächse der Zementsteine mit Luftporen in den Stauchungsintervallen $I_\varepsilon[\varepsilon_{z,I-II};5\%]$ bis $I_\varepsilon[50\%;55\%]$	91
Abbildung 84:	Absolute Spannungszuwächse der Zementsteine mit EPS-Perlen 0,5/1 mm in den Stauchungsintervallen $I_\varepsilon[\varepsilon_{z,I-II};5\%]$ bis $I_\varepsilon[50\%;55\%]$	91
Abbildung 85:	Absolute Spannungszuwächse der Zementsteine mit EPS-Perlen 1/2 mm in den Stauchungsintervallen $I_\varepsilon[\varepsilon_{z,I-II};5\%]$ bis $I_\varepsilon[50\%;55\%]$	91
Abbildung 86:	Absoluter Spannungszuwachs in Abhängigkeit der residualen relativen Porosität: Vergleich zwischen Zementsteinen mit Luftporen (links), EPS-Perlen 0,5/1 mm (Mitte) und EPS-Perlen 1/2 mm (rechts).	93
Abbildung 87:	Maximale Stauchung bei Versuchsende in Abhängigkeit der relativen Porosität.	93
Abbildung 88:	Spannungs-Stauchungskurven der Zementsteine mit einem Luft-/EPS-Gehalt von rd. 40 Vol.-% im Stauchungsbereich von 0 bis 65 % (links) bzw. 0 bis 2 % Stauchung (rechts).	94
Abbildung 89:	Spannungs-Stauchungskurven der Zementsteine mit einem Luft-/EPS-Gehalt von rd. 50 Vol.-% im Stauchungsbereich von 0 bis 65 % (links) bzw. 0 bis 2 % Stauchung (rechts).	94
Abbildung 90:	Spannungs-Stauchungskurven der Zementsteine mit einem Luft-/EPS-Gehalt von rd. 60 Vol.-% im Stauchungsbereich von 0 bis 65 % (links) bzw. 0 bis 2 % Stauchung (rechts).	95
Abbildung 91:	Initiale Steifigkeit (links) und Grenzspannung (rechts) der porosierten Zementsteine in Abhängigkeit des mittleren Porendurchmessers.	95

Abbildung 92:	Spannungsniveau der porosierten Zementsteine bei $\varepsilon_z = 10\%$ in Abhängigkeit des mittleren Porendurchmessers.	96
Abbildung 93:	Absoluter Spannungszuwachs in Abhängigkeit der residualen relativen Porosität: Vergleich zwischen Zementsteinen mit einem Luft-/EPS-Gehalt von rd. 40 Vol.-% (links), 50 Vol.-% (Mitte) und 60 Vol.-% (rechts).	96
Abbildung 94:	Spannungs-Stauchungskurven von sechs Proben des Zementsteins ZS-L50 im Stauchungsbereich von 0 bis 50 % (links) und 0 bis 2 % Stauchung (rechts).	97
Abbildung 95:	Volumenanteile der Basiszusammensetzung der porosierten Betone.	99
Abbildung 96:	Mischregime zur Herstellung der porosierten Betone.	102
Abbildung 97:	Druckfestigkeit der Betone mit $w/z = 0,70$ in Abhängigkeit der Festbetonrohddichte, Variation der porösen Zuschlagstoffe (links), Einfluss des Wassorzementwertes auf die Druckfestigkeit der Betone mit Blähglas 0,5/8 mm bzw. EPS-Perlen 0,5/5mm (rechts).	105
Abbildung 98:	Schnittbilder von Zylinderproben ($h_0/D = 300\text{ mm}/150\text{ mm}$) des Betons mit Blähglas 0,5/8 mm (links) bzw. EPS-Perlen 0,5/5 mm (rechts).	106
Abbildung 99:	Einachsige Druckversuche an Zylinderproben: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (links), Foto des Versuchsaufbaus bei teilflächiger Druckbelastung [88, 109] (rechts).	107
Abbildung 100:	Spannungs-Stauchungskurve des Betons mit Blähglas 0,5/8 mm (B-Bg) im Stauchungsbereich 0 bis 75 % (links) und 0 bis 2 % Stauchung (rechts).	109
Abbildung 101:	Oben: Schnittbilder von Zylinderproben des Betons mit Blähglas 0,5/8 mm (B-Bg) bei Stauchungen von $\varepsilon_z = 0\%$ (links), $\varepsilon_z = 50\%$ (Mitte) und $\varepsilon_z = 75\%$ (rechts), unten: Detailaufnahme des gestauchten Bereichs unterhalb der eingedrückten Lastfläche bei $\varepsilon_z = 75\%$ [109].	111
Abbildung 102:	Lichtmikroskopische Gefügebildaufnahme (12-fache Vergrößerung, Maßstab 2 mm) der in Abbildung 101 markierten Teilbereiche A (links) und B (rechts) innerhalb der Schnittflächen [85, 88, 109].	112
Abbildung 103:	Spannungs-Stauchungskurven der Betone mit Blähton 0/8 mm, Blähglas 0,5/8 mm, Vermiculiten 0,5/8 mm und EPS-Perlen 0,5/5 mm im Stauchungsbereich von 0 bis 75 % (links) bzw. 0 bis 2 % Stauchung (rechts).	113
Abbildung 104:	Initiale Steifigkeit (links) und Grenzspannung (rechts) in Abhängigkeit der Festbetonrohddichte (Variation der Zuschlagstoffe).	114
Abbildung 105:	Bezogene Grenzspannung in Abhängigkeit der Festbetonrohddichte (Variation der Zuschlagstoffe).	115
Abbildung 106:	Spezifischer Spannungszuwachs der Betone im plastischen Bereich (links) und im Verfestigungsbereich (rechts) in Abhängigkeit des spezifischen Spannungszuwachses der Zuschlagstoffe (abweichende Skalierung der y-Achsen).	116

Abbildung 107:	Prozentuale Anteile der Zuschlagstoffe bzw. Zementsteinmatrix am spezifischen Spannungszuwachs der Betone im plastischen Bereich (links) und im Verfestigungsbereich (rechts).	117
Abbildung 108:	Spezifischer Spannungszuwachs im plastischen Bereich und im Verfestigungsbereich in Abhängigkeit der Festbetonrohddichte (Variation der Zuschlagstoffe).	117
Abbildung 109:	Vergleich zwischen den experimentell und rechnerisch ermittelten Spannungen der Betone mit Blähton, Blähglas und EPS-Perlen.	118
Abbildung 110:	Spannungs-Stauchungskurven der Betone mit EPS-Perlen 0,5/5 mm bzw. 0,5/1 mm im Stauchungsbereich von 0 bis 75 % (links) und 0 bis 2 % Stauchung (rechts).	119
Abbildung 111:	Spannungs-Stauchungskurven der Betone mit Blähglas 0,5/8 mm bzw. 0,5/2 mm im Stauchungsbereich von 0 bis 75 % (links) und 0 bis 2 % Stauchung (rechts).	119
Abbildung 112:	Initiale Steifigkeit (links) und Grenzspannung (rechts) in Abhängigkeit der Festbetonrohddichte (Variation der Korngröße).	120
Abbildung 113:	Spezifischer Spannungszuwachs im plastischen Bereich bzw. Verfestigungsbereich in Abhängigkeit der Festbetonrohddichte (Variation der Korngröße).....	121
Abbildung 114:	Spannungs-Stauchungskurven der Betone mit EPS-Perlen 0,5/5 mm unter Variation des Wasserzementwertes im Stauchungsbereich von 0 bis 75 % (links) bzw. 0 bis 2 % Stauchung (rechts).	122
Abbildung 115:	Spannungs-Stauchungskurven der Betone mit Blähglas 0,5/8 mm unter Variation des Wasserzementwertes im Stauchungsbereich von 0 bis 75 % (links) bzw. 0 bis 2 % Stauchung (rechts).	122
Abbildung 116:	Initiale Steifigkeit (links) und Grenzspannungen (rechts) der Betone mit Blähglas bzw. EPS-Perlen in Abhängigkeit des Wasserzementwertes.....	123
Abbildung 117:	Bezogene Grenzspannungen der Betone mit Blähglas bzw. EPS-Perlen in Abhängigkeit des Wasserzementwertes.....	123
Abbildung 118:	Spezifischer Spannungszuwachs der Betone mit EPS-Perlen (links) bzw. Blähglas (rechts) im plastischen Bereich und im Verfestigungsbereich in Abhängigkeit des Wasserzementwertes (abweichende Skalierung der y-Achsen).	124
Abbildung 119:	Spannungs-Stauchungskurven des Betons mit Blähglas 0,5/8 mm (B-Bg) unter Variation des Lastflächenverhältnisses im Stauchungsbereich von 0 bis 75 % (links) bzw. 0 bis 2 % Stauchung (rechts).	125
Abbildung 120:	Bezogene Grenzspannung in Abhängigkeit des Lastflächenverhältnisses.	125
Abbildung 121:	Spannungszuwächse in den Stauchungsintervallen $I_{\epsilon}[\epsilon_{z,I-II};10\%]$ bis $I_{\epsilon}[60\%;70\%]$ unter Variation des Lastflächenverhältnisses.....	126
Abbildung 122:	Zusammenhang zwischen der Scherkraft bzw. Scherspannung und dem Lastflächendurchmesser.	128

Abbildung 123:	Schnittbilder von gestauchten Proben des Betons mit Blähglas 0,5/8 mm (B-Bg): $A/A_s = 9,0$ (links), 2,25 (Mitte) und $\approx 1,0$ (rechts) [109].....	129
Abbildung 124:	Spannungs-Stauchungskurven von sechs Proben des Betons mit Blähglas 0,5/8 mm (B-Bg) im Stauchungsbereich von 0 bis 80% (links) und 0 bis 2 % Stauchung (rechts).	130
Abbildung 125:	Spannungs-Stauchungskurven von sechs Proben des Betons mit EPS-Perlen 0,5/5 mm (B-EPS) im Stauchungsbereich von 0 bis 80% (links) und 0 bis 2 % Stauchung (rechts).....	130

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ausgangsmaterial, granulometrische Eigenschaften (Kornform, Kornoberfläche) und (Liefer-)Korngröße der porösen Zuschlagstoffe.....	56
Tabelle 2:	Reindichte, Kornrohndichte und Schüttdichte der porösen Zuschlagstoffe.	56
Tabelle 3:	Hohlraumgehalt des Haufwerks der porösen Zuschlagstoffe.	57
Tabelle 4:	Porosität der porösen Zuschlagstoffe.....	58
Tabelle 5:	Wasseraufnahme der porösen Zuschlagstoffe.	59
Tabelle 6:	Korndruckfestigkeiten der porösen Zuschlagstoffe.	60
Tabelle 7:	Spannung/Stauchung bei Versuchsende und spezifischer Spannungszuwachs der porösen Zuschlagstoffe.....	62
Tabelle 8:	Mischungszusammensetzung des nicht-porosierte Basis-Zementsteins ZS-0.	69
Tabelle 9:	Zementsteinvarianten mit Luftporen und Zugabemengen des Schaumbildners.....	70
Tabelle 10:	Zementsteinvarianten mit EPS-Perlen und Zugabemengen der EPS-Perlen.	70
Tabelle 11:	Frischrohndichten der Zementleime.	73
Tabelle 12:	Rechnerische Luftgehalte des Basis-Zementleims und der Zementleime mit Luftporen.	74
Tabelle 13:	Rechnerische EPS-Gehalte der Zementleime mit EPS-Perlen.	74
Tabelle 14:	Festrohndichten und relative Porositäten der Zementsteine.	75
Tabelle 15:	Luftporendurchmesser der Zementsteine ZS-L40, ZS-L50 und ZS-L60.	77
Tabelle 16:	Stegdichte in Abhängigkeit des Luft-/EPS-Gehaltes (Modellrechnung).	80
Tabelle 17:	Würfeldruckfestigkeiten der Zementsteine.....	81
Tabelle 18:	Auswertung der Spannungs-Stauchungskurven von sechs Proben des Zementsteins ZS-L50.....	98
Tabelle 19:	Basiszusammensetzung der porosierten Betone.	99
Tabelle 20:	Variation der verwendeten Zuschlagstoffe.	101
Tabelle 21:	Variation des Wasserzementwertes.	102
Tabelle 22:	Frischbetonkennwerte (Konsistenz, Frischbetonrohndichte, rechnerischer Luftporengehalt).	103
Tabelle 23:	Festbetonkennwerte (Festbetonrohndichte, Druckfestigkeit).	104
Tabelle 24:	Abmessungen der Lastflächen und resultierende Lastflächenverhältnisse bei teil- bzw. vollflächigen Stauchversuchen.	108
Tabelle 25:	Versuchsmatrix und Anzahl der Stauchversuche.	108
Tabelle 26:	Auswertung der Spannungs-Stauchungskurven von sechs Proben des Betons mit Blähglas 0,5/8 mm (B-Bg).	131
Tabelle 27:	Auswertung der Spannungs-Stauchungskurven von sechs Proben des Betons mit EPS-Perlen 0,5/5 mm (B-EPS).....	131

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Beton ist ein visko-elastischer Baustoff, der sich unter Druckbeanspruchung typischerweise durch eine hohe Tragfähigkeit bei gleichzeitig geringen spannungsabhängigen Verformungen auszeichnet. Er eignet sich daher besonders, um Druckkräfte abzuleiten und wird oft für druckbeanspruchte Bauteile wie z. B. Stützen eingesetzt. Zwar besitzt Beton eine im Vergleich zu seiner Druckfestigkeit wesentlich geringere Zugfestigkeit, in Kombination mit Bewehrung (in der Regel Betonstahlbewehrung) hat er sich jedoch ebenso für den Einsatz bei zug- und biegebeanspruchten Bauteilen bewährt. Aufgrund dieser Materialeigenschaften zählen Bauteile für Tragwerksstrukturen im konstruktiven Ingenieurbau zu den Hauptanwendungsgebieten von Beton.

Bei besonderen Anwendungsfällen von Beton wird ein Materialverhalten angestrebt, das unter Druckbeanspruchung durch ein hohes plastisches Verformungsvermögen bei gleichzeitig relativ geringen Spannungen charakterisiert ist und sich somit deutlich von den für Beton typischen mechanischen Eigenschaften abgrenzt. Erste bekannte Materialkonzepte für Betone mit derartigen Eigenschaften orientieren sich an sogenannten zellularen Werkstoffen, bei denen ein hohes plastisches Stauchvermögen über die zelluläre Struktur bzw. die hohe Porigkeit und die damit verbundene Volumenkompressibilität erzielt wird.

Betone, die aufgrund einer hohen Porigkeit ein ausgeprägtes plastisches Stauchvermögen aufweisen, kommen beispielsweise in speziellen Anwendungsfällen im Bereich des Tunnelbaus zum Einsatz. Zur Realisierung eines verformungsfähigen bzw. nachgiebigen Ausbaus werden die Betone als Stauchsichten oder -elemente in das Ausbausystem integriert. Durch das plastische Stauchvermögen werden Gebirgsverformungen, wie sie bei quellfähigem bzw. druckhaftem Gebirge auftreten können, kontrolliert zugelassen und die auf den tragenden Teil des Ausbaus wirkenden Belastungen reguliert. Weitere Anwendungsgebiete erschließen sich aus dem hohen Energieabsorptionsvermögen, das Betone mit einem ausgeprägten plastischen Stauchvermögen aufweisen. Diese Eigenschaft macht sie insbesondere für Anwendungen zum Schutz gegen dynamische bzw. stoß- oder explosionsartige Beanspruchungen interessant. Beispielsweise werden sie in Form von Stoßdämpferelementen an Transport- und Lagerbehältern von Gefahrstoffen angeordnet oder bei Notfall-Abbremsystemen auf Start- und Landebahnen von Flugzeugen genutzt.

Zwar liegen bereits erste Ansätze für Betone mit einem hohen plastischen Stauchvermögen vor. Dabei handelt es sich jedoch überwiegend um individuelle Einzellösungen, die speziell für die exemplarisch genannten Anwendungsfälle konzipiert wurden. Experimentelle Studien, in denen das Stauchverhalten stark porosierter Betone systematisch untersucht wurde, existieren bis dato nur sehr wenige. In diese Studien wurden fast ausschließlich Schaumbetone bzw. -mörtel einbezogen, die ohne leichte Gesteinskörnungen oder andere poröse Zuschlagstoffe hergestellt wurden. Zudem sind die Ergebnisse der Studien größtenteils nicht direkt miteinander vergleichbar, da die Versuchsrandbedingungen aufgrund fehlender genormter Prüfmethode deutlich voneinander abweichen.

Gesicherte Kenntnisse zum Stauchverhalten stark porosierter Betone sind daher bislang äußerst begrenzt.

Um ein ingenieurtechnisches Verständnis über das Stauchverhalten stark porosierter Betone zu erlangen und einen gezielten Einsatz in verschiedenen Anwendungsbereichen zu ermöglichen, ist es zweckmäßig, reproduzierbare Versuchsergebnisse zum Stauchverhalten zu generieren und maßgebliche Einflussfaktoren zu eruieren.

1.2 Zielsetzung und Anwendung der Arbeit

Das globale Ziel dieser Arbeit ist es, das Stauchverhalten stark porosierter Betone durch umfangreiche experimentelle Untersuchungen grundlegend zu charakterisieren sowie maßgeblich relevante material- und versuchstechnische Einflussparameter zu identifizieren und zu quantifizieren. Der Fokus der experimentellen Untersuchungen liegt auf Betonen mit einem matrix- und kornporigen Gefüge, die sich aus einer aufgeschäumten Zementsteinmatrix und porösen Zuschlagstoffen (leichte Gesteinskörnungen, Schaumstoffzusätze) zusammensetzen. Um das Stauchverhalten des Gesamtsystems „Beton“ differenziert analysieren und verstehen zu können, werden auch die Staucheigenschaften der Einzelkomponenten betrachtet.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse können als Grundlage für die Konzeptionierung, Optimierung und Anwendung von Betonen mit einem ausgeprägten plastischen Stauchvermögen genutzt werden. Durch die Quantifizierung maßgebender Einflussparameter lassen sich Steuergrößen ableiten, mit denen das Stauchverhalten gezielt in Bezug auf anwendungsspezifische Randbedingungen angepasst werden kann. Darüber hinaus können die Versuchsergebnisse als Datengrundlage für die Validierung und Kalibrierung analytischer sowie numerischer Modelle herangezogen werden. Die Ergebnisse zum Stauchverhalten der Einzelkomponenten können auch als Basis für weiterführende Untersuchungen an Betonen genutzt werden, deren Materialkonzepte auf Ansätzen beruhen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht abgedeckt werden. Beispielsweise sind zur Realisierung eines ausgeprägten plastischen Stauchvermögens prinzipiell auch haufwerksporige Gefügestrukturen denkbar. Nicht zuletzt lassen sich die Erkenntnisse der Untersuchungen größtenteils auch auf betonähnliche zementgebundene Materialsysteme übertragen, wie zum Beispiel auf Ringspaltmörtel, die im maschinellen Tunnelbau Anwendung finden.

1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Der grundlegende Aufbau und die inhaltlichen Schwerpunkte dieser Arbeit sind in Abbildung 1 dargestellt.

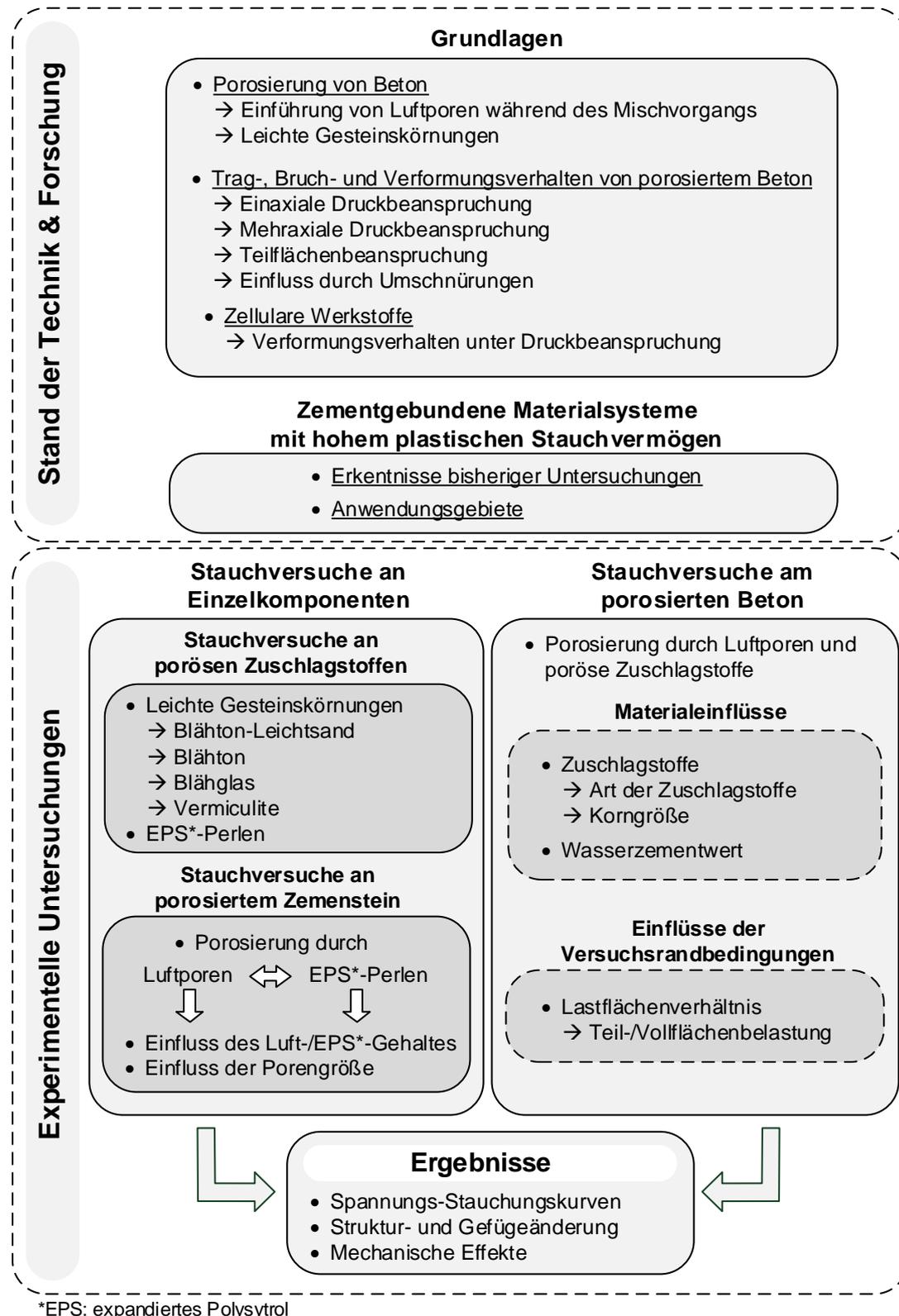


Abbildung 1: Schematischer Aufbau und inhaltliche Schwerpunkte der Arbeit.

Für einen fundierten Einstieg in die Thematik dieser Arbeit werden zunächst die relevanten Grundlagen zu Betonen mit einer porigen Gefügestruktur sowie zu zellularen Werkstoffen dargelegt. Der Fokus liegt dabei auf dem Verformungsverhalten der Materialien unter Druckbeanspruchung. Anschließend werden die wesentlichen Erkenntnisse aus bisherigen Untersuchungen zum Stauchverhalten stark porosierter Betone bzw. betonähnlicher zementgebundener Materialsysteme dokumentiert. Anhand konkreter Beispiele werden zudem bekannte und potenzielle Anwendungsgebiete solcher Materialien erläutert.

Der Hauptteil dieser Arbeit umfasst die Beschreibung und Analyse gezielt konzipierter Untersuchungen zum Stauchverhalten von Betonen mit einem matrix- und kornporigen Gefüge sowie zu deren Einzelkomponenten. In einem ersten Schritt wird das Stauchverhalten der porösen Zuschlagstoffe und des porosierten Zementsteins untersucht. Darauf aufbauend werden die Stauchversuche am porosierten Beton durchgeführt. Neben materialtechnischen Variationen werden auch Variationen der Versuchsrandbedingungen in die Untersuchungen einbezogen.

Das Stauchverhalten sowie die material- und versuchstechnischen Einflussparameter werden anhand der Spannungs-Stauchungskurven analysiert, die in einachsigen Druckversuchen mit Querdehnungsbehinderung ermittelt werden. Durch begleitende Untersuchungen der Struktur- und Gefügeänderungen werden die wesentlichen mechanischen Effekte während der Stauchversuche und deren Auswirkungen auf das Stauchverhalten eruiert.

2 Grundlagen

2.1 Porosierung von Beton

2.1.1 Allgemeine Ansätze

Eine gezielte Erhöhung der Porosität von Beton kann grundsätzlich durch drei verschiedene Ansätze erfolgen (Abbildung 2). Diese sind von Leichtbetonen bekannt. Im Vergleich zu Normalbeton, der eine Trockenbetonrohddichte zwischen 2.000 und 2.600 kg/m^3 aufweist [1] und durch ein vergleichsweise dichtes bzw. geschlossenes Gefüge (dichte Zementstein- bzw. Mörtelmatrix, dichte Gesteinskörnung) charakterisiert ist, führen diese Ansätze zu einer korn-, matrix- oder haufwerksporigen Gefügestruktur [2-6]. Die Erhöhung der Porosität geht dabei mit einer Abminderung der Rohddichte einher.

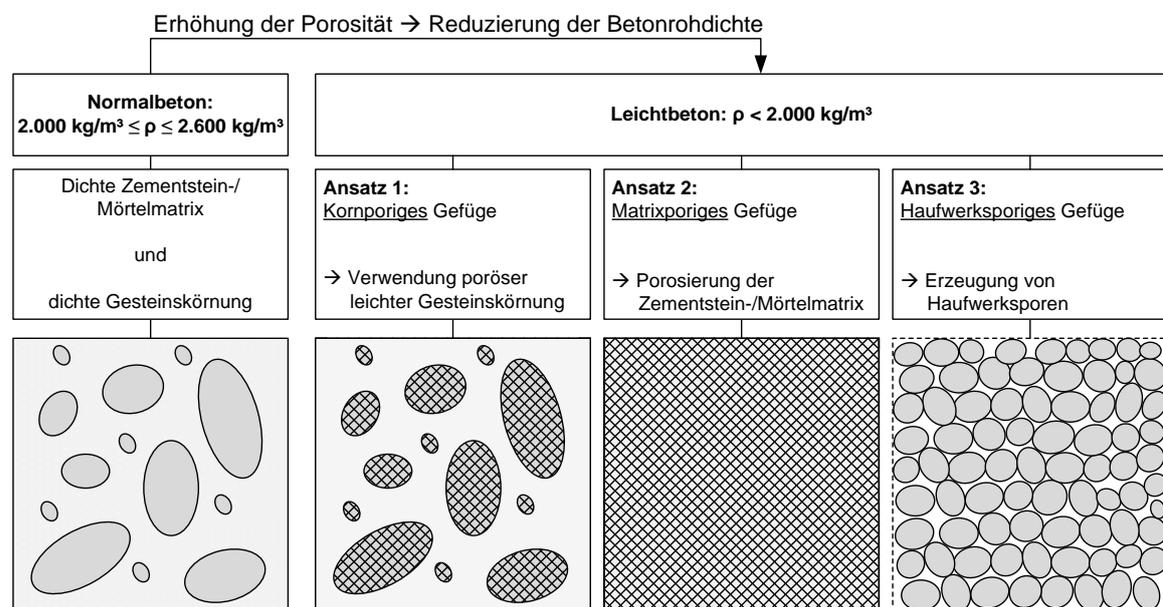


Abbildung 2: Von Leichtbeton bekannte Ansätze zur Porosierung von Beton.

Nach Ansatz 1 wird die „normale“ dichte Gesteinskörnung (in der Regel Kies/Splitt und Natursand) partiell oder gänzlich durch poröse, leichte Gesteinskörnung substituiert, sodass eine kornporige Gefügestruktur entsteht [2-4, 6]. Prinzipiell können anstelle leichter Gesteinskörnungen auch andere poröse Zuschlagstoffe, wie beispielsweise Holzspäne oder Schaumstoffperlen aus expandiertem Polystyrol (EPS-Perlen), verwendet werden [2]. Die Zementstein- bzw. Mörtelmatrix ist wie bei Normalbeton durch ein relativ dichtes Gefüge charakterisiert. Im Allgemeinen werden nach diesem Ansatz konzipierte Leichtbetone daher als gefügedichte Leichtbetone bezeichnet [4, 6]. Auch wenn sich gefügedichte Leichtbetone hinsichtlich ihres Trag- und Bruchverhaltens erheblich von Normalbetonen abgrenzen, lassen sich vergleichbare Druckfestigkeiten bei gleichzeitig deutlich reduzierter Rohddichte erzielen [3, 6]. Aus diesem Grund kommen sie bevorzugt für tragende Bauteile im konstruktiven Ingenieurbau zum Einsatz und werden daher auch als Konstruktionsleichtbetone bezeichnet.

Der Ansatz 2 führt zu einer matrixporigen Gefügestruktur. Die Porosierung der Zementstein- bzw. Mörtelmatrix erfolgt dabei grundsätzlich durch die Einführung künstlicher Luftporen [4, 6, 7]. Die Luftporen können entweder während des Mischvorgangs durch die direkte Zugabe grenzflächenaktiver Zusatzmittel (Luft- bzw. Schaumbildner) oder durch Untermischen eines separat hergestellten wässrigen Luftschaums erzeugt werden [4, 5, 7]. Auf diese Weise hergestellter Leichtbeton wird in der Literatur als Schaumbeton oder Porenleichtbeton bezeichnet (nachfolgend wird die Bezeichnung Schaumbeton verwendet). In der Regel werden Schaumbetone ohne grobe Gesteinskörnung hergestellt [3]. Bei besonders hohen Luftgehalten wird häufig überhaupt keine Gesteinskörnung verwendet [3].

Nach [4, 7] wird ein matrixporiges Gefüge auch durch die Einführung von „Luftporen“ in Form von EPS-Perlen mit vernachlässigbar geringer Festigkeit und Steifigkeit erzielt. Demnach kann die Porosierung durch EPS-Perlen – je nach Betrachtungsweise – sowohl dem Ansatz 1 als auch dem Ansatz 2 zugeordnet werden.

Eine weitere Methode zur Porosierung der Zementstein- bzw. Mörtelmatrix beruht auf chemischen Treibprozessen und ist von sogenanntem Porenbeton bekannt. Hierbei entstehen die Poren erst nachträglich im bereits fertig gemischten Frischbeton durch die Bildung von Wasserstoff infolge der chemischen Reaktion zwischen dem Bindemittel und einem dem Frischbeton vorab beigemischten Treibmittel (in der Regel Aluminiumpulver) [3, 4].

Unter Ansatz 3 werden einzelne (feine) Korngruppen der Gesteinskörnung reduziert oder gänzlich ausgelassen, sodass ein Haufwerk mit Hohlräumen (Haufwerksporen) zwischen den einzelnen Gesteinskörnern entsteht [3, 4, 6]. Zusätzlich wird der Gehalt des Zementleims auf das Minimum reduziert, das nötig ist, um die Oberfläche der Gesteinskörnung vollflächig zu benetzen und diese an ihren Kontaktpunkten miteinander zu verkitten, ohne dass die Haufwerksporen vollständig mit Zementleim gefüllt werden [3, 6].

Möglich sind auch Kombinationen der drei verschiedenen Ansätze [2, 4, 6, 7].

2.1.2 Einführung von Luftporen während des Mischvorgangs

Zur Einführung künstlicher Luftporen während des Mischvorgangs werden Luftporen- oder Schaumbildner als Zusatzmittel eingesetzt [4, 5, 7-9]. Diese basieren auf grenzflächenaktiven Wirkstoffen, die zu einer Reduzierung der Oberflächenspannung des Wassers führen [4, 5]. Dadurch entstehen infolge von Reibungsvorgängen und Turbulenzen während des Mischvorgangs größere Mengen an Luftporen im Zementleim [4]. Gleichzeitig bewirken diese Zusatzmittel eine Stabilisierung der eingetragenen Luftporen im Frischbeton [5]. Auch wenn sich die verfügbaren Zusatzmittel hinsichtlich ihrer stofflichen Zusammensetzung und damit auch in Bezug auf ihre lufteintragende Wirkung erheblich unterscheiden können [4], beruhen sie im Wesentlichen auf den gleichen physikalisch-chemischen Wirkungsmechanismen [5]. Eine detaillierte Beschreibung dieser Wirkungsmechanismen ist beispielsweise in [5] geben.

Luftporenbilder werden meist auf Wurzelharz-Basis (z. B. Vinsol-Resin) hergestellt [4, 5]. Heutzutage kommen jedoch auch vermehrt Luftporenbilder auf Basis von Tensiden zum Einsatz [5]. Luftporenbildner werden hauptsächlich zur Herstellung von Luftporenbeton mit einem hohen Anteil an geschlossenen Mikroluftporen (Durchmesser $< 0,3$ mm) verwendet [4, 5, 7]. Dadurch kann bei bereits moderaten Luftgehalten von deutlich unterhalb 10 Vol.-% ein hoher Frost-Taumittelwiderstand erzielt werden, ohne dass die Festigkeit signifikant beeinträchtigt wird [4, 7]. Der mit Luftporenbildnern erzielbare Luftgehalt ist jedoch beschränkt. Mit typischen Luftporenbildnern lassen sich auch bei einer Überdosierung Luftgehalte von mehr als 20 Vol.-% in der Regel nicht einstellen [4].

Zur Erzielung wesentlich höherer Luftgehalten werden Schaumbildner eingesetzt [3, 4, 7]. Diese basieren in der Regel auf Proteinen oder Tensiden [4]. Durch die direkte Zugabe von Schaumbildnern während des Mischvorgangs lassen sich ohne weiteres Schaumbetone mit Luftgehalten zwischen rd. 30 und 40 Vol.-% herstellen [4, 7]. Für reinen Zementleim konnten in [5] durch den Einsatz von Tensidschaumbildnern sogar Luftgehalte von bis zu rd. 65 Vol.-% erreicht werden. Im Vergleich zu Luftporenbildnern führen Schaumbildner in der Regel zu deutlich größeren Porendurchmessern [3, 4, 7]. Bei Untersuchungen in [4] betrug der mittlere Porendurchmesser unter Verwendung eines Luftporenbildners auf Basis von Vinsol-Resin ca. 0,12 mm, für die dort untersuchten Schaumbildner war der mittlere Porendurchmesser rd. 2- bis 3-mal größer. Für genauere Untersuchungsergebnisse zu den mit verschiedenen Luftporen- bzw. Schaumbildnern erzielbaren Luftgehalten und Porendurchmessern sei auf [4] verwiesen.

Neben der Wirksamkeit der Luftporen- bzw. Schaumbildner spielen hinsichtlich des erzielbaren Luftgehaltes insbesondere die Mischzeit und die dabei eingetragene Mischenergie eine wesentliche Rolle [3-5, 8]. Die Mischenergie wird maßgeblich vom Mischverfahren, Mischwerkzeug und von der Geometrie des Mixers beeinflusst [5]. Für den Lufteintrag während des Mischvorgangs sind zudem auch die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons von besonderer Bedeutung. Darüber hinaus werden in [3-5] die folgenden weiteren Einflussgrößen genannt:

- Mahlfeinheit und chemische Zusammensetzung des Zements
- Wassergehalt
- Volumenanteile und Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung
- Frischbetontemperatur
- Wechselwirkungen mit weiteren Zusatzmitteln
- Reihenfolge bei der Zugabe der verschiedenen Ausgangskomponenten

Bei Betonen mit einem hohen Anteil an Luftporen wird der Luftgehalt in der Regel rechnerisch über die Frischbetonrohddichte ermittelt. Gängige Prüfmethode zur direkten Ermittlung des Luftgehaltes (Druckausgleichsverfahren nach DIN EN 12350-7 [10], Volumetrisches Verfahren nach ASTM C 173 [11]) sind bei sehr hohen Luftgehalten nicht zielsicher anwendbar [3, 12].

2.1.3 Leichte Gesteinskörnung

2.1.3.1 *Allgemeines*

In [2] werden auf dem Markt verfügbare leichte Gesteinskörnungen, die für die Herstellung von Leichtbeton mit einem kornporigen Gefüge eingesetzt werden, nach ihrer Herkunft und ihrem Herstellungsprozess untergliedert (Abbildung 3).

Leichte Gesteinskörnung						
Gruppe	natürlich	industriell			rezykliert	
Ausgangsprodukt	natürliche Materialien	Nebenprodukte aus industrieller Fertigung			Leichtbeton	
Ursprung	vulkanisch	mineralisch, vulkanisch	mineralisch		Abbruchmaterial	
Herstellung	mechanischer Prozess	thermischer Prozess	thermischer Prozess	Verarbeitung ohne Brennen	ohne Weiterverarbeitung	Abbruchprozess
Leichte Gesteinskörnungen	Naturbims, Lavastein, Tuffstein	Blähton, Blähschiefer, Perlite, Vermiculite	gesinterte Flugasche, Blähschlacke, Blähglas	kaltgebundene Flugasche	Kesselsand, Schmelzkammergranulat, Hüttenbims	Rezyklierte leichte Gesteinskörnung

Abbildung 3: Gliederung der verfügbaren leichten Gesteinskörnungen nach [2].

Grundsätzlich werden leichte Gesteinskörnungen industriell hergestellt oder aus natürlichen Vorkommen gewonnen [3]. Ein Sonderfall stellt rezyklierte leichte Gesteinskörnung dar, die durch die Aufbereitung von Abbruchmaterial aus Leichtbeton hergestellt wird [2].

Natürliche leichte Gesteinskörnungen wie beispielsweise Naturbims, Lava- oder Tuffstein sind vulkanischen Ursprungs und besitzen von Natur aus eine gewisse Porosität [2]. Die Herstellung und Aufbereitung erfolgt mechanisch durch Brechen und Sieben. Zur industriellen Herstellung leichter Gesteinskörnungen werden natürliche Materialien (z. B. Ton, Schiefer), Nebenprodukte aus diversen industriellen Fertigungsprozessen (z. B. Flugasche, Hochofenschlacke) sowie Recyclingmaterialien (z. B. Recyclingglas) verwendet [2]. Die Herstellung basiert dabei in der Regel auf thermischen Prozessen, die dazu führen, dass das Ausgangsmaterial auf ein Vielfaches seines ursprünglichen Volumens aufgebläht wird und so eine porige Kornstruktur entsteht [2, 13]. Einige industrielle Nebenprodukte (z. B. Kesselsand, Schmelzkammergranulat) werden – sofern sie bereits eine hinreichende Porosität besitzen – auch ohne weitere Verarbeitungsschritte als leichte Gesteinskörnungen eingesetzt [2]. Eine detaillierte Beschreibung der spezifischen Herstellungsprozesse ist beispielsweise in [2, 13] enthalten.

In der Regel werden leichte Gesteinskörnungen anhand ihrer Kornrohddichte charakterisiert, da ihre mechanischen, hygrischen und thermischen Eigenschaften maßgeblich von ihr abhängig sind [2]. Definitionsgemäß beträgt die Kornrohddichte leichter Gesteinskörnungen $\rho_a \leq 2.000 \text{ kg/m}^3$ [14]. Für typische leichte Gesteinskörnungen ist die Bandbreite der Kornrohddichten im Vergleich zu normalen Gesteinskörnungen (Kies/Splitt) in Abbildung 4 dargestellt.

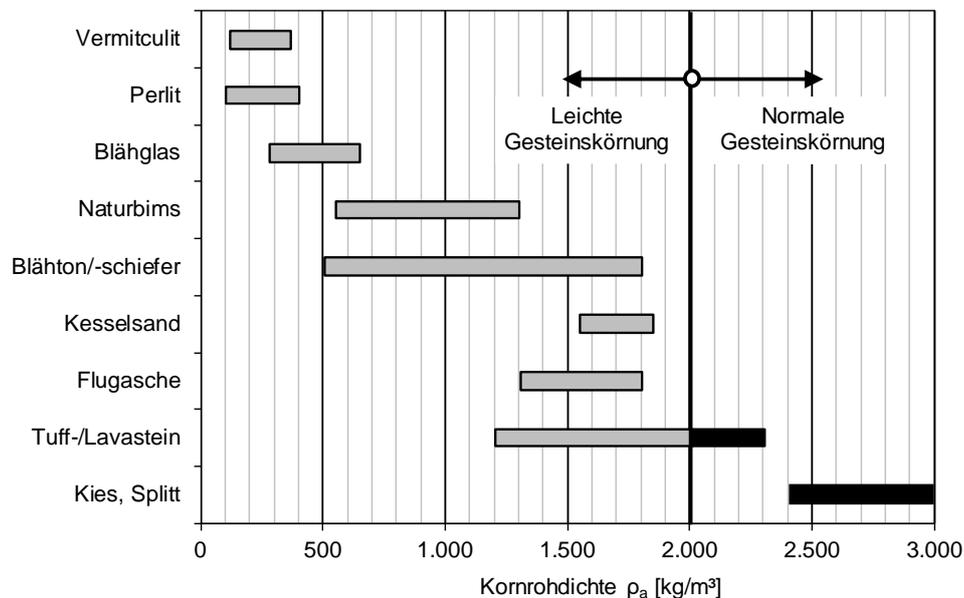


Abbildung 4: Kornrohddichten typischer leichter Gesteinskörnungen, Abb. modifiziert nach [2].

Als weitere wesentliche Kenngröße dient die Schüttdichte, die für leichte Gesteinskörnungen $\rho_b \leq 1.200 \text{ kg/m}^3$ beträgt [14] und in Abhängigkeit der geometrischen Korneigenschaften (Korngröße, Konform) zwischen rd. 40 und 70 % der Kornrohddichte liegt [2].

2.1.3.2 Struktureigenschaften

Die wesentliche Kenngröße zur Charakterisierung der Struktur leichter Gesteinskörnungen ist die Porosität. Da die Reindichten der verschiedenen Ausgangsmaterialien in der Regel in relativ engen Grenzen variieren [2], die Kornrohddichten mit Werten zwischen rd. 100 und 2.000 kg/m^3 hingegen ein vergleichsweise breites Spektrum abdecken (vgl. Abbildung 4), können sich leichte Gesteinskörnungen in Bezug auf ihre Porosität signifikant unterscheiden. Die in [2] ermittelten Werte für die Porosität von verschiedenen leichten Gesteinskörnungen (Bims, Blähton, Blähschiefer und Blähglas) sind in Abhängigkeit der Kornrohddichte ρ_a in Abbildung 5 dargestellt. Aufgrund der nur geringfügig voneinander abweichenden Reindichten ($2,26 \text{ g/cm}^3 \leq \rho_{a,sp} \leq 2,69 \text{ g/cm}^3$) ergibt sich ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der Gesamtporosität und der Kornrohddichte.

Über die Gesamtporosität bzw. Kornrohddichte können allerdings keine genauen Informationen über die Porenstruktur (Porenart, -größe, -größenverteilung etc.) abgeleitet werden, die insbesondere herstellungsbedingt deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Arten leichter Gesteinskörnungen aufweisen kann und maßgeblich die hygrischen, aber auch mechanischen Korneigen-

schaften beeinflusst [3, 6, 15]. Diesbezüglich spielt vor allem der Anteil an offenen und geschlossenen Poren eine bedeutende Rolle. Grundsätzlich wird daher zwischen leichten Gesteinskörnungen mit einem überwiegenden Anteil an offenen Poren (offene Porosität) und solchen mit einem überwiegenden Anteil an geschlossenen Poren (geschlossene Porosität) differenziert [6].

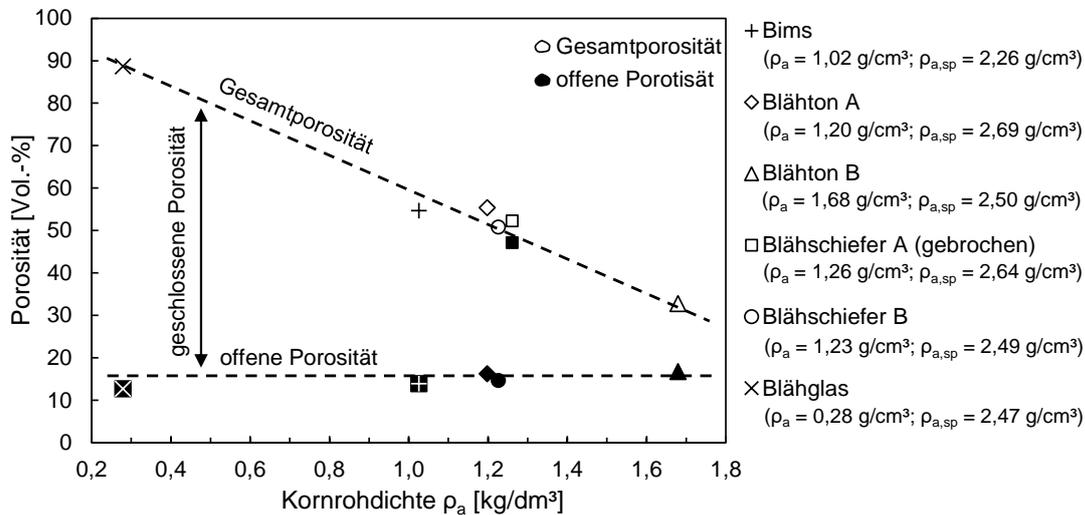


Abbildung 5: Porosität verschiedener leichter Gesteinskörnungen in Abhängigkeit der Kornroh-dichte, Abb. modifiziert nach [2].

Wie in Abbildung 5 zu erkennen ist, ist die offene Porosität für fast alle der in [2] untersuchten leichten Gesteinskörnungen nahezu konstant, während die geschlossene Porosität mit abnehmender Kornroh-dichte zunimmt. Folglich überwiegt der Anteil an geschlossenen Poren mit sinkender Kornroh-dichte zunehmend. Am Beispiel des gebrochenen Blähschiefers („Blähschiefer A“), der durch einen überwiegenden und vergleichsweise hohen Anteil an offenen Poren gekennzeichnet ist, wird jedoch deutlich, dass dieser Zusammenhang keine Allgemeingültigkeit besitzt.

Herstellungsbedingte Unterschiede in der Porenstruktur leichter Gesteinskörnungen spiegeln sich auch in der Beschaffenheit ihrer Randzone wider, der hinsichtlich der mechanischen Korneigenschaften, dem Verbund (Matrix/Kornoberfläche) sowie insbesondere hinsichtlich des Feuchte-transportes im Frisch- und Festbeton eine besondere Bedeutung zukommt [2, 3, 6]. Bei typischen industriell hergestellten leichten Gesteinskörnungen wie beispielsweise Blähton oder Blähglas entsteht infolge der Bläh- und Sinterprozesse eine hohe Porigkeit im Korninneren, während sich in der Randzone eine dünne und vergleichsweise dichte Sinterhaut ausbildet [2, 3, 6]. Abhängig von der Art der leichten Gesteinskörnung liegen die Porendurchmesser im Korninneren zwischen ca. 20 und 800 μm , die Poren der Sinterhaut weisen Durchmesser zwischen 0,02 und 80 μm auf [6]. Exemplarisch sind die Oberfläche und der Querschnitt eines Blähtonkorns mit einer ausgeprägten Sinterhaut in Abbildung 6 dargestellt.

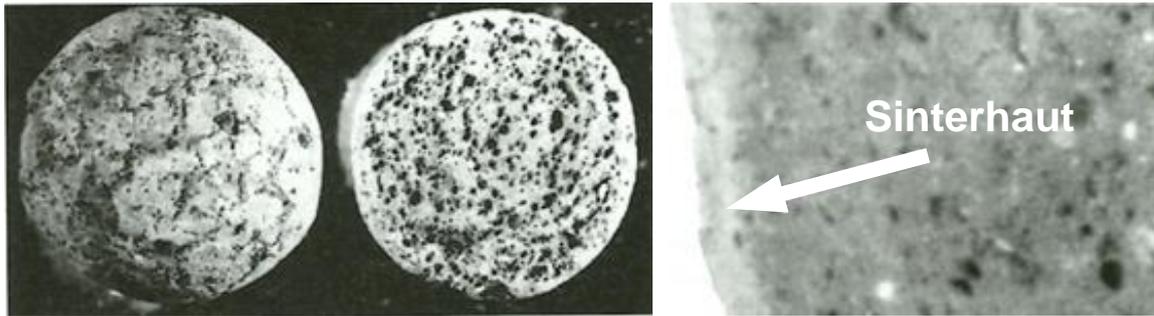


Abbildung 6: Blähtonkorn von außen und im Querschnitt [2] (links), ausgeprägte Sinterhaut eines Blähtonkorns, Abb. modifiziert nach [2] (rechts).

Leichte Gesteinskörnungen mit offenporiger Randzone sind hingegen durch eine mehr oder weniger gleichmäßig verteilte Porosität über den gesamten Kornquerschnitt gekennzeichnet [6]. Typische Vertreter sind natürliche leichte Gesteinskörnungen wie Naturbims und Lavastein [6]. Industriell hergestellte leichte Gesteinskörnungen, die nach dem Blähvorgang auf eine bestimmte Korngröße heruntergebrochen werden, besitzen ebenfalls eine offenporige Randzone, da die Sinterhaut durch den Brechvorgang zerstört wird [2, 13]. Daher sind auch die meisten industriell hergestellten Leichtsande (z. B. Blähton-Leichtsand, Blähschiefer-Leichtsand) durch eine offenporige Randzone gekennzeichnet [2].

2.1.3.3 Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften (Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul etc.) leichter Gesteinskörnungen sind grundsätzlich von einer Vielzahl verschiedener Korncharakteristiken (Kornstruktur, -form, -größe, -ausgangsmaterial etc.) abhängig [2]. In [2] stellt Faust eigene und aus der Literatur bekannte einschlägige Untersuchungen zu den relevanten mechanischen Korneigenschaften vor. Zusammenfassend kann aus den Ergebnissen geschlossen werden, dass die Druck- und Zugfestigkeit sowie der E-Modul leichter Gesteinskörnungen in der Regel hinreichend genau über die Kornrohichte abgeschätzt werden können.

Korndruckfestigkeit

Die Korndruckfestigkeit kann direkt entweder am Einzelkorn oder am Haufwerk bestimmt werden [2]. Die Prüfung am Einzelkorn, beispielsweise zwischen zwei planparallelen Druckplatten, ist jedoch mit relativ großen Streuungen behaftet und liefert in Bezug auf eine gesamte Charge keine repräsentativen Ergebnisse [2]. Wegen der geringen Abmessungen der Körner ist eine solche Prüfung darüber hinaus nur sehr schwer umsetzbar, sodass die Korndruckfestigkeit auf direktem Wege in der Regel am Haufwerk ermittelt wird [2].

Bei der Prüfung am Haufwerk wird ein definiertes Volumen der leichten Gesteinskörnung in einen Stahlzylinder gefüllt und mit einem Druckstempel zusammengestaucht (Abbildung 7). In DIN EN 13055 [16] sind zwei Prüfmethode (Verfahren 1 für $\rho_b > 150 \text{ kg/m}^3$, Verfahren 2 für $\rho_b \leq 150 \text{ kg/m}^3$) zur Bestimmung der Korndruckfestigkeit leichter Gesteinskörnungen nach dem Druckzylinderverfahren beschrieben. Die Kornfestigkeit ergibt sich aus der ermittelten Kraft bei

einem definierten Weg, bezogen auf die Querschnittsfläche des Druckstempels. Die Prüfverfahren unterscheiden sich im Wesentlichen nur in Bezug auf die Abmessungen des Stahlzylinders und den Weg, bei dem die Kraft abgelesen wird.

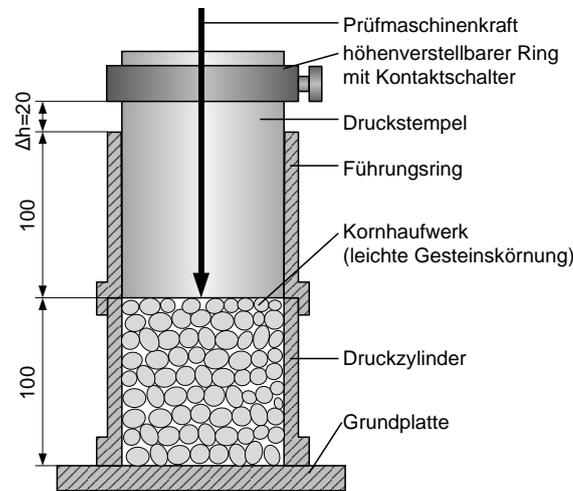


Abbildung 7: Prüfung der Korndruckfestigkeit am Haufwerk leichter Gesteinskörnungen mit dem Druckzylinderverfahren, Abb. modifiziert nach DIN 4226-3 [17].

Die am Haufwerk ermittelten Korndruckfestigkeiten lassen allerdings kaum Rückschlüsse auf die erreichbare Druckfestigkeit eines Leichtbetons zu, da der mehrachsige Spannungszustand, wie er im Beton unter Druckbeanspruchung für die in der Matrix eingebetteten Gesteinskörner vorliegt, mit diesem Prüfverfahren nicht hinreichend abgebildet wird [2]. Ungeachtet dessen, können anhand der Kraft-Wegbeziehung wichtige Rückschlüsse auf das Stauchverhalten der leichten Gesteinskörnung gezogen werden, das eine maßgebliche Rolle im Hinblick auf das Stauchverhalten der in dieser Arbeit untersuchten Betone spielt.

Alternativ zur direkten Prüfung am Haufwerk kann die Korndruckfestigkeit stattdessen indirekt über die Druckfestigkeit eines gefügedichten Leichtbetons bestimmt werden, der sich aus einem definierten Anteil der leichten Gesteinskörnung und einer hochfesten Mörtelmatrix zusammensetzt [2]. In diesem System stellt die leichte Gesteinskörnung die „Schwachstelle“ dar, sodass die Druckfestigkeit des Leichtbetons letztlich durch die Korndruckfestigkeit begrenzt wird [2, 6, 18]. Da sich bei dieser Prüfmethode jedoch dreiaxiale Spannungseffekte sowie Spannungsumlagerungen zwischen der leichten Gesteinskörnung und der hochfesten Mörtelmatrix auswirken, sind die so indirekt bestimmten Korndruckfestigkeiten in der Regel nicht mit den durch direkte Prüfmethode ermittelten Korndruckfestigkeiten vergleichbar [2]. Um Missverständnisse zwischen den Begrifflichkeiten zu vermeiden führt Faust in [2] für die indirekt ermittelten Korndruckfestigkeiten den Begriff des „Festigkeitspotenzials“ ein. Das Festigkeitspotenzial wird in der Regel herangezogen, um die erreichbare Druckfestigkeit von gefügedichtem Leichtbeton im Rahmen eines Betonentwurfs abzuschätzen [2].

Die in [2] mit dem Druckzylinderverfahren ermittelten Kraft-Wegbeziehungen von verschiedenen leichten Gesteinskörnungen sind in Abbildung 8 dargestellt. Tendenziell ist zwar zu erkennen, dass die Kraft bei einer definierten Stauchung von 20 mm mit steigender Kornrohddichte zunimmt. Bei genauerer Betrachtung wird jedoch deutlich, dass dieser Zusammenhang nur eingeschränkt zutrifft. Obwohl die Kornrohddichte des „Blähtons B“ rd. 15 % größer ist als die des „Blähtons C“ ist, liegen die ermittelten Kräfte bei 20 mm auf einem annähernd identischen Niveau. Des Weiteren weichen die Kräfte zwischen dem „Blähton C“ und dem „Blähschiefer D“ an dieser Stelle deutlich voneinander ab, obwohl der Unterschied in deren Kornrohddichte marginal ist. Diese Beobachtungen führt *Faust* auf Unterschiede hinsichtlich der Kornform und -hülle zurück [2].

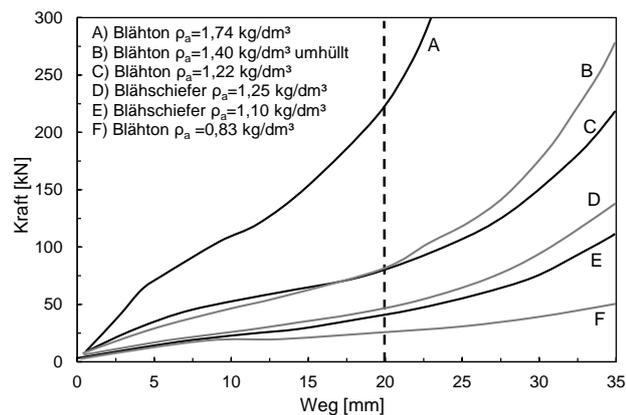


Abbildung 8: Kraft-Wegbeziehung verschiedener leichter Gesteinskörnungen im Druckzylinder-versuch, Abb. modifiziert nach [2].

Die anhand der Kraft-Wegbeziehung ermittelten Korndruckfestigkeiten von verschiedenen leichten Gesteinskörnungen sind in Abhängigkeit ihrer Kornrohddichte in Abbildung 9 (links) dargestellt. Auch darin wird deutlich, dass trotz einer tendenziellen Abhängigkeit (höhere Korndruckfestigkeit mit zunehmender Kornrohddichte) kein präziser Zusammenhang zwischen der mit diesem Prüfverfahren ermittelten Korndruckfestigkeit und der Kornrohddichte besteht. Insbesondere bei höheren Kornrohddichten ($\rho_a > \text{rd. } 1,0 \text{ kg/dm}^3$) ist eine erhebliche Streuung der Korndruckfestigkeiten zu erkennen.

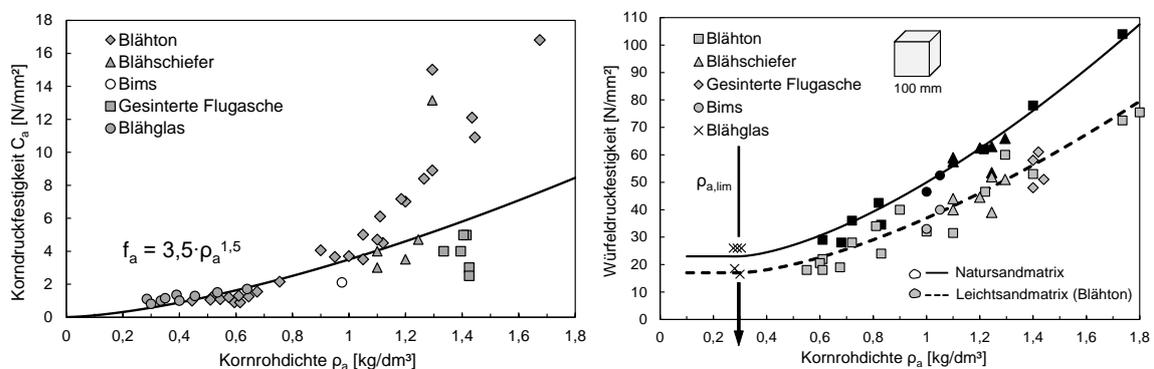


Abbildung 9: Korndruckfestigkeit (links) und Festigkeitspotenzial (rechts) verschiedener leichter Gesteinskörnungen in Abhängigkeit der Kornrohddichte, Abb. modifiziert nach [2].

Die über die Würfeldruckfestigkeiten von gefügedichten Leichtbetonen ermittelten Festigkeitspotenziale von verschiedenen leichten Gesteinskörnungen sind in Abbildung 9 (rechts) dargestellt. Die bei der Prüfung verwendeten Betone wurden mit einer hochfesten Natursand- bzw. Leichtsandmatrix mit Matrixdruckfestigkeiten von 110 bzw. 70 N/mm² hergestellt [2]. Wie Abbildung 9 (rechts) zu entnehmen ist, liegt für Kornrohddichten von $\rho_a > \text{rd. } 0,6 \text{ kg/dm}^3$ eine mehr oder weniger gute Korrelation zwischen der Kornrohddichte und der Würfeldruckfestigkeit vor. Unterhalb einer Kornrohddichte von rd. 0,3 bis 0,6 kg/dm³ nähern sich die Würfeldruckfestigkeiten jedoch einem konstanten Wert an. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Kornfestigkeit im Vergleich zur Matrixfestigkeit unterhalb einer gewissen Kornrohddichte so gering ist, dass sich die leichten Gesteinskörner vollständig der Last entziehen, d. h. die Lasten werden vollständig durch die Matrix abgetragen [2]. Die leichten Gesteinskörner können dabei wie Luftporen gleichen Volumens innerhalb der Matrix aufgefasst werden. Die Würfeldruckfestigkeit spiegelt in diesem Bereich die sogenannte „Lochmatrixfestigkeit“ wider [2]. Für leichte Gesteinskörnungen mit sehr geringer Kornrohddichte liefert diese Prüfung somit keine verwertbaren Aussagen über das Festigkeitspotenzial bzw. die Korndruckfestigkeit.

Kornzugfestigkeit

Zur Ermittlung der Kornzugfestigkeit leichter Gesteinskörnungen wurden ebenfalls verschiedene direkte und indirekte Prüfmethode erprobt (u. a. in [15, 19-21]). Die Ergebnisse von Versuchen, in denen die Kornzugfestigkeit verschiedener leichter Gesteinskörnungen bestimmt wurde, sind in Abbildung 10 zusammengestellt.

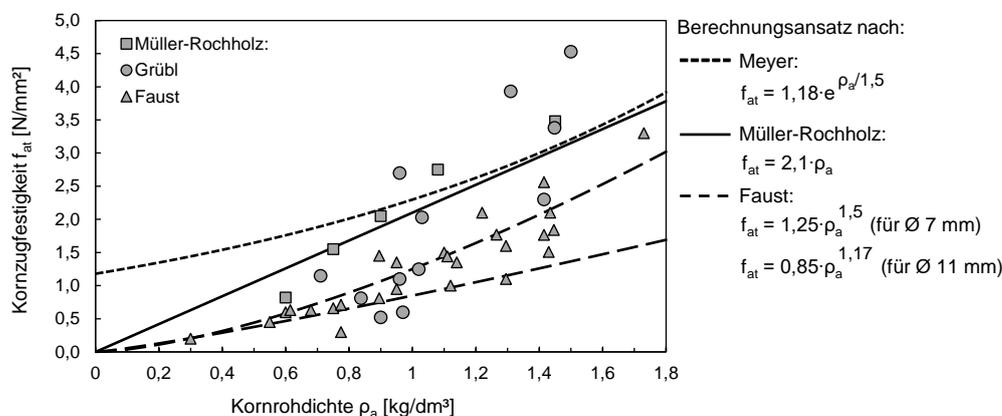


Abbildung 10: Zugfestigkeit leichter Gesteinskörnungen in Abhängigkeit der Kornrohddichte, Abb. modifiziert nach [2].

Neben Unzulänglichkeiten der Prüfmethode führen eine Vielzahl verschiedener Einflussfaktoren der leichten Gesteinskörnungen selber, wie beispielsweise herstellungsbedingte Unregelmäßigkeiten in der Kornstruktur, der Feuchtegehalt, die Korngröße, die Ausbildung der Sinterhaut etc., zu einer eher moderaten Korrelation zwischen Kornrohddichte und Kornzugfestigkeit [2]. Dementsprechend weichen auch die daraus abgeleiteten Berechnungsansätze signifikant voneinander ab (vgl. Abbildung 10). Dennoch ist auch hier eine tendenzielle Steigerung der Kornzugfestigkeit mit zunehmender Kornrohddichte zu erkennen.

Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul (E-Modul) leichter Gesteinskörnung wird aufgrund der geringen Abmessungen der Körner in der Regel dynamisch mit Hilfe von Ultraschallmessungen bestimmt [2]. Laut [22] entspricht der dynamische E-Modul typischer leichter Gesteinskörnungen dabei in etwa dem statischen E-Modul. Der Zusammenhang zwischen dem dynamischen E-Modul und der Kornroh-dichte, der auf Ultraschallmessungen an verschiedenen leichten Gesteinskörnungen in [23] zurückgeht, ist in Abbildung 11 dargestellt. Wie darin zu erkennen ist, steigt der E-Modul mit zunehmender Kornroh-dichte unter Berücksichtigung einer nicht unerheblichen Streubreite quadratisch an.

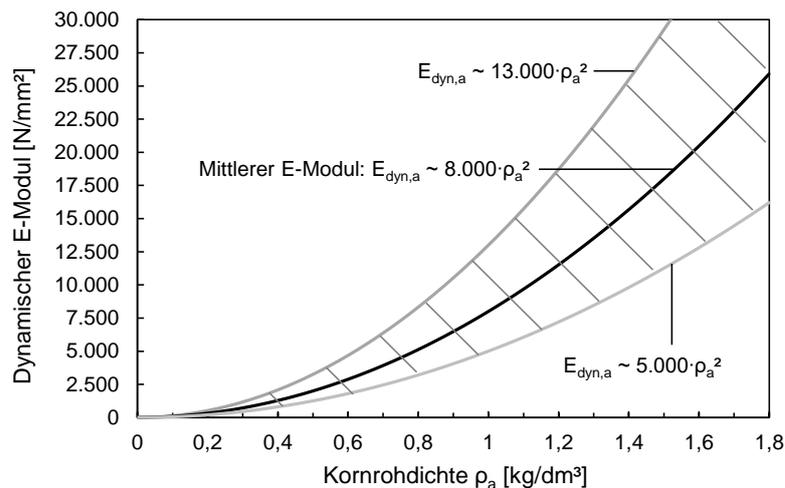


Abbildung 11: Dynamischer E-Modul leichter Gesteinskörnungen in Abhängigkeit der Kornroh-dichte, Abb. modifiziert nach [2].

2.1.3.4 Hygrische Eigenschaften

Aufgrund ihrer porösen Struktur weisen leichte Gesteinskörnungen ein ausgeprägtes Saugverhalten auf. Da das Saugverhalten unter anderem erhebliche Auswirkungen auf den effektiven Wasserzementwert sowie auf die Konsistenz bzw. Verarbeitbarkeit des Frischbetons hat, muss dieses beim Betonentwurf zwingend berücksichtigt werden [2].

Das Saugverhalten wird unter anderem maßgeblich durch die Porenstruktur beeinflusst [2, 3, 6] und variiert dementsprechend stark zwischen den verschiedenen Arten leichter Gesteinskörnungen. Dabei spielt insbesondere die Porenstruktur der Randzone eine wesentliche Rolle (vgl. Abschnitt 2.1.3.2).

Leichte Gesteinskörnungen mit einer ausgeprägten Sinterhaut zeigen ein hohes kapillares Saugvermögen. Dadurch kommt es zunächst zu einer raschen Wasseraufnahme, die über die Zeit abnimmt [6]. Bei offenporigen leichten Gesteinskörnungen ohne Sinterhaut kann das Wasser hingegen mehr oder weniger ungehindert in die Poren eindringen, sodass sich bereits nach kurzer Zeit eine fast vollständige Wassersättigung einstellt [6].

Neben den strukturellen Korneigenschaften wird das Saugverhalten leichter Gesteinskörnungen ebenfalls maßgeblich durch die Ausgangsfeuchte sowie die vorausgegangene Sättigungs- bzw. Trocknungshistorie beeinflusst [2, 24]. Im Vorsättigungszustand können die Poren in der Randzone bereits wassergesättigt sein, während das Korninnere noch trocken ist (Abbildung 12, links). Dadurch wird eine weitere Wasseraufnahme behindert. Umgekehrt können die Poren in der Randzone im Trocknungszustand bereits trocken sein, während das Korninnere noch weitgehend wassergesättigt ist (Abbildung 12, rechts). In diesem Zustand können die Poren der Randzone weiteres Wasser aufsaugen [2, 24].

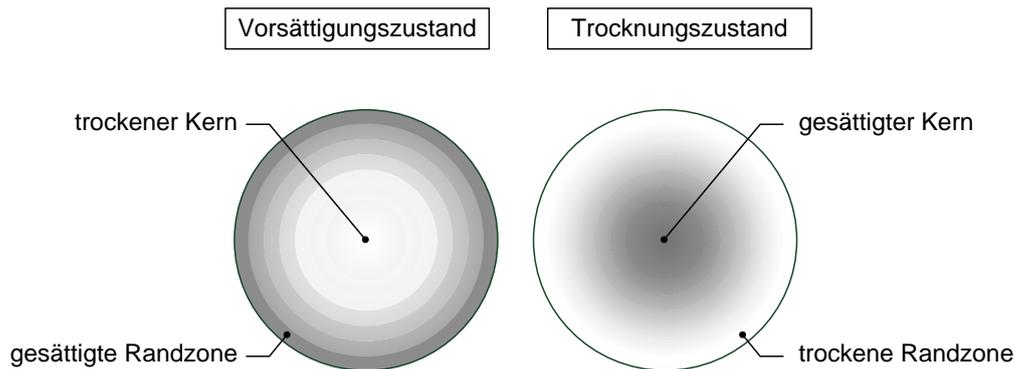


Abbildung 12: Schematische Darstellung unterschiedlicher Feuchteverteilungen in leichten Gesteinskörnungen mit Sinterhaut, Abbildung modifiziert nach [2].

Im Frischbeton wird das Saugverhalten der leichten Gesteinskörnung zusätzlich zu den zuvor genannten Einflussgrößen durch die Temperatur und den Wassergehalt sowie die rheologischen Eigenschaften des Zementleims beeinflusst [2, 3].

2.2 Trag-, Bruch- und Verformungsverhalten von porosiertem Beton im Vergleich zu Normalbeton

2.2.1 Trag- und Bruchverhalten unter einachsiger Druckbeanspruchung

Das Trag- und Bruchverhalten von Beton wird maßgeblich durch seine gefügestrukturelle Zusammensetzung bestimmt [3, 25-28]. Zur Beschreibung des Trag- und Bruchverhaltens von Beton mit einer dichten Zementstein- bzw. Mörtelmatrix (Normalbeton, gefügedichter Leichtbeton) ist es zweckmäßig, diesen als inhomogenes Zweistoff-Verbundsystem zu betrachten, das aus der Matrix und den darin eingebetteten Gesteinskörnern besteht [25-29]. Aufgrund der Inhomogenität sowie den deutlich unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften (Festigkeit/Steifigkeit) der beiden Stoffkomponenten ergeben sich selbst unter gleichmäßiger äußerer Belastung komplexe und lokal stark variierende innere Spannungszustände [26-29]. Eine allgemeingültige Beschreibung des Trag- und Bruchverhaltens von Normal- bzw. Leichtbeton ist daher nicht möglich, sondern muss unter Berücksichtigung der Festigkeits- und Steifigkeitsverhältnisse erfolgen [26-28]. Nachfolgend werden zunächst zwei charakteristische Grenzfälle betrachtet:

- Fall A) Die Festigkeit und die Steifigkeit der Gesteinskörnung betragen ein Vielfaches im Vergleich zur Matrix ($f_{GK} \gg f_{Matrix}$, $E_{GK} \gg E_{Matrix}$)
- Fall B) Die Festigkeit und die Steifigkeit der Gesteinskörnung betragen ein Bruchteil im Vergleich zur Matrix ($f_{GK} \ll f_{Matrix}$, $E_{GK} \ll E_{Matrix}$).

Für den Fall A entsprechen die Festigkeits- und Steifigkeitsverhältnisse denen von Normalbeton. Unter einachsiger Druckbelastung werden die Druckspannungen zu den wesentlich steiferen Gesteinskörnern hin umgelenkt. Die Druckspannungstrajektorien verlaufen somit nicht parallel, sondern wie in Abbildung 13 (links) dargestellt, gekrümmt und konzentriert zwischen den einzelnen Gesteinskörnern. Der Lastabtrag erfolgt somit bevorzugt über die Gesteinskörnung und die dazwischenliegenden Matrixschichten [26, 27].

Die Festigkeits- und Steifigkeitsverhältnisse im Fall B sind charakteristisch für gefügedichten Leichtbeton. In diesem Fall entzieht sich die Gesteinskörnung aufgrund ihrer wesentlich geringeren Steifigkeit den Druckspannungen weitgehend. Die Druckspannungstrajektorien verlaufen hauptsächlich innerhalb der Matrix um die Gesteinskörner herum (Abbildung 13, rechts). Die Last wird dementsprechend bevorzugt über die Matrix abgetragen [26, 27].

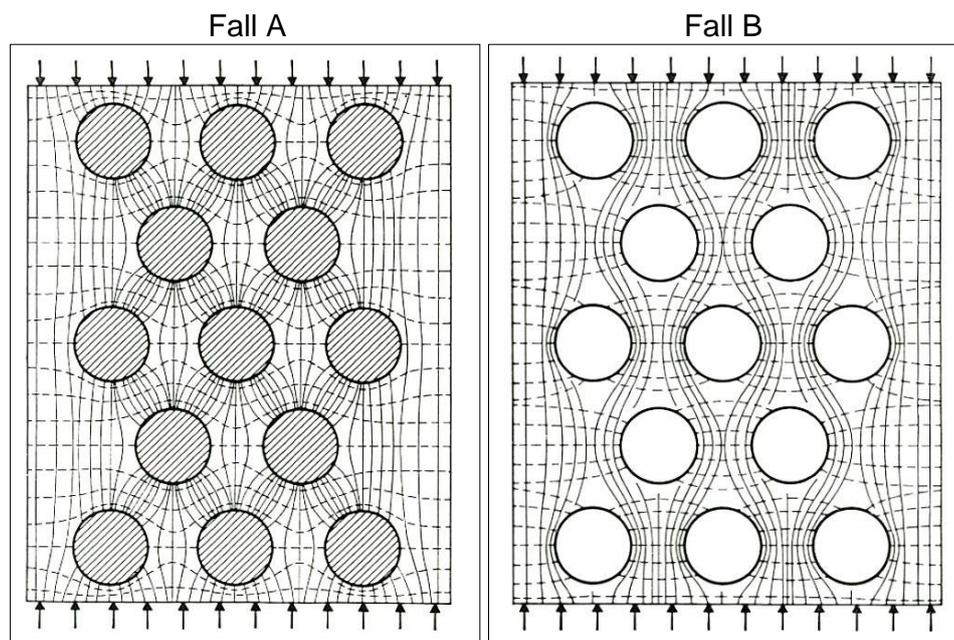


Abbildung 13: Verläufe der Druckspannungstrajektorien [26, 27]. Links: Fall A (charakteristisch für Normalbeton), rechts: Fall B (charakteristisch für gefügedichten Leichtbeton).

Durch die Umlenkung der Druckspannungstrajektorien stellen sich um die Gesteinskörner nicht nur Bereiche mit Druck- sondern auch Zugspannungen ein (Abbildung 14). Im Fall A (vgl. Abbildung 14, links) ergeben sich ober- und unterhalb der Gesteinskörner konzentrierte Druckspannungen in Belastungsrichtung. Seitlich der Gesteinskörner treten lokale Zugspannungen auf, die senkrecht zur Belastungsrichtung orientiert sind und in der Grenzzone zwischen Matrix und Gesteinskorn ihr

Maximum erreichen. Da der Haftverbund zwischen Matrix und Gesteinskorn stets eine „Schwachstelle“ darstellt, entstehen innerhalb der Haftzone bei bereits relativ geringen äußeren Druckbeanspruchungen Mikrorisse. Diese verlaufen senkrecht zur Zugspannungsorientierung und somit bevorzugt parallel zur Belastungsrichtung [26, 27].

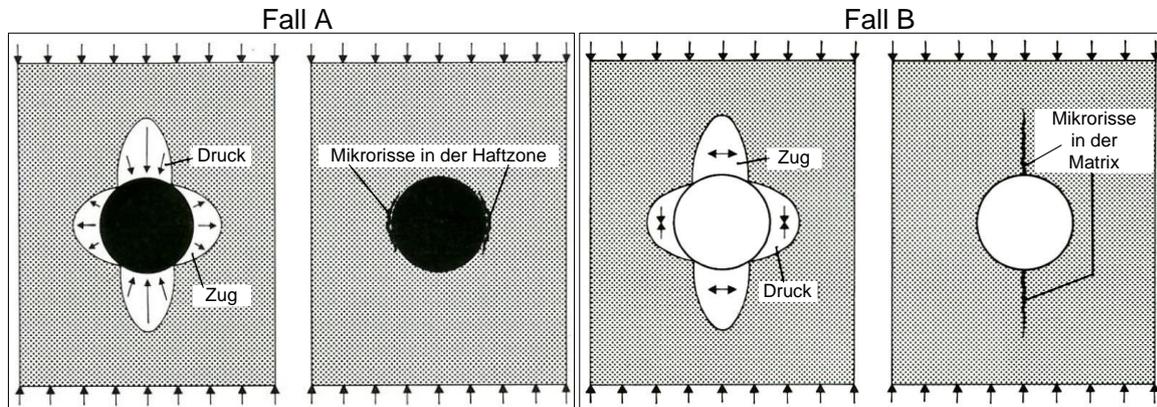


Abbildung 14: Spannungsverteilung und Bildung von Mikrorissen im Bereich eines Gesteinskorns [26]. Links: Fall A (charakteristisch für Normalbeton), rechts: Fall B (charakteristisch für gefügedichten Leichtbeton).

Im Fall B (vgl. Abbildung 14, rechts) stellt sich eine gegensätzliche Spannungsverteilung im Bereich der Gesteinskörner ein. In diesem Fall treten konzentrierte Druckspannungen in Belastungsrichtung hauptsächlich in den seitlich angrenzenden Bereichen der Gesteinskörner auf. Die quer zur Belastungsrichtung orientierten Zugspannungen bilden sich hingegen lokal in den Bereichen ober- und unterhalb der Gesteinskörner aus. Wie auch im Fall A, erreichen die Zugspannungen in der Grenzzone Matrix/Gesteinskorn ihr Maximum. Bei Überschreitung der Matrixzugfestigkeit kommt es ebenfalls zur Bildung von Mikrorissen in Belastungsrichtung. Diese verlaufen jedoch nicht innerhalb der Haftzone, sondern ausgehend von den lokalen Zugspannungsspitzen durch die Matrix hindurch. Da die Matrixzugfestigkeit in der Regel deutlich größer als die Zugfestigkeit der Haftzone ist, stellen sich die Mikrorisse im Fall B erst bei vergleichsweise höheren Spannungen ein [26, 27].

Infolge der lokalen Entstehung von Mikrorissen in den Grenzflächen zwischen Gesteinskörnung und Matrix kommt es zu einer Spannungsumlagerung, da innerhalb der Risse keine Zugspannungen übertragen werden können. Mit zunehmender Druckbelastung entstehen aufgrund unterschiedlicher Querdehnungen der Gesteinskörner und der Matrix zudem neue Zugspannungen, die dazu führen, dass sich die Mikrorisse bevorzugt in Belastungsrichtung ausbreiten und zu größeren Makrorissen zusammenwachsen [26, 27]. Während die Makrorisse im Fall A durch die Matrix und entlang der seitlichen Haftzone um die Gesteinskörner herum verlaufen (Abbildung 15, links), gehen die Risse im Fall B durch die Matrix und durch die Gesteinskörner hindurch (Abbildung 15, rechts). Infolge von parallel zur Belastungsrichtung verlaufenden Makrorissen, die sich mit fortschreitender Rissentwicklung zunehmend auch über den ganzen Betonkörper erstrecken, bildet sich gemäß der Modellvorstellung nach [26, 27] in beiden Fällen eine stabbüdelartige Struktur aus. Das globale Versagen bzw. der vollständige Bruch tritt schließlich durch Ausknicken bzw. Abscheren der einzelnen Stäbe ein [26, 27] (vgl. Abbildung 15).

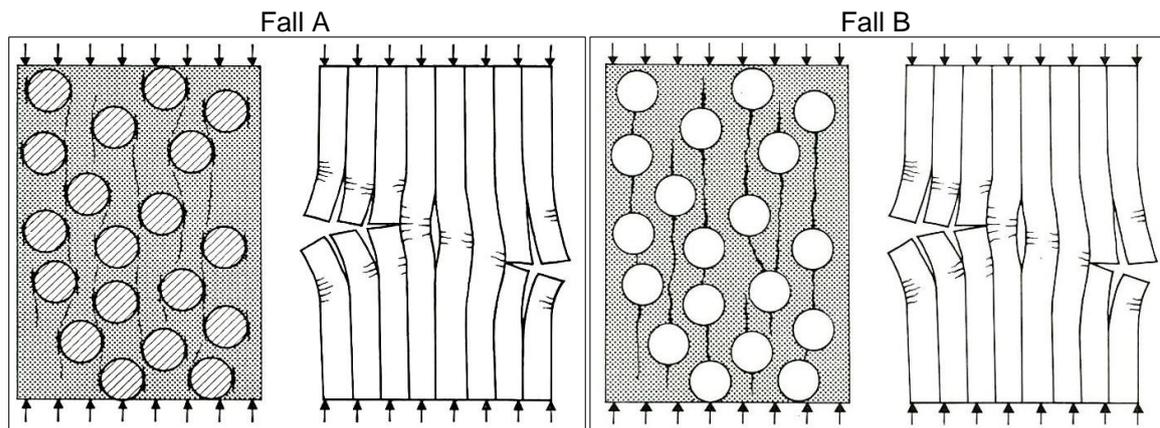


Abbildung 15: Rissentwicklung und Bruchvorgang [26, 27]. Links: Fall A (charakteristisch für Normalbeton), rechts: Fall B (charakteristisch für gefügedichteten Leichtbeton).

Die für Fall B dargelegte Modellvorstellung des Zweistoff-Verbundsystems, die in [26, 27] zur Beschreibung des Trag- und Bruchverhaltens von gefügedichtem Leichtbeton mit $f_{GK} \ll f_{Matrix}$ und $E_{GK} \ll E_{Matrix}$ entwickelt wurde, lässt sich bedingt auch auf Poren- und Schaumbetone übertragen, bei denen die Matrix mit einer Vielzahl von makroskopischen Hohlräumen bzw. Poren durchsetzt ist [30, 31]. Dabei sind die Poren als Einschlüsse zu betrachten, deren Festigkeit und Steifigkeit gleich Null sind.

Solche Betone, die durch eine sehr hohe Matrixporigkeit charakterisiert sind und zudem in der Regel ohne grobe Gesteinskörnung hergestellt werden, weisen jedoch eine Gefügestruktur auf, die deutlich von der eines gefügedichteten Leichtbetons abweicht. Das Trag- und Bruchverhalten wird dabei von Mechanismen dominiert, die nicht hinreichend über das Modell des Zweistoffsystems abgebildet werden können. In [30] wird die Struktur von Porenbeton als eine Art zelluläres Netzwerk approximiert, bei dem die Druckspannungen fachwerkartig über das zementöse Feststoffgerüst, bestehend aus dünnen Zellwänden und -stegen mit variierender Schlankheit, abgetragen werden. Nach [30] wird das globale Versagen dabei nicht durch die Entstehung von Mikro- und Makrorissen initiiert, sondern primär durch ein lokales Stabilitätsversagen (d. h. durch Beulen bzw. Knicken) der Zellwände und -stege, das zu lokalen Gefügezerstörungen in Form von Porenquetsungen und damit einhergehenden Verdichtungserscheinungen führt. Diese Modellvorstellung zum Trag- und Bruchverhalten weist eine starke Analogie zu der von zellulären Werkstoffen auf (vgl. Abschnitt 2.3).

Bei Betonen mit einem matrix- und kornporigen Gefüge ist davon auszugehen, dass sich die zuvor geschilderten, strukturspezifischen Trag- und Bruchmechanismen überlagern.

2.2.2 Spannungs-Stauchungsverhalten unter einachsiger Druckbeanspruchung

Das Spannungs-Stauchungsverhalten von Beton wird maßgeblich durch das strukturspezifische Trag- und Bruchverhalten (vgl. Abschnitt 2.2.1) beeinflusst und variiert in Abhängigkeit seiner strukturellen Zusammensetzung daher teils deutlich.

Die Spannungs-Stauchungskurve von Normalbeton, die sich bei einachsiger Druckbelastung in einem verformungsgesteuerten Kurzzeitversuch mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit ergibt, ist in Abbildung 16 (links) qualitativ dargestellt. Diese verläuft von Belastungsbeginn an zur Stauchungsachse hin gekrümmt [26]. Bis zu einer Spannung, die ca. 40 % der Druckfestigkeit beträgt, ist diese Krümmung jedoch nur sehr geringfügig ausgeprägt, sodass der Zusammenhang zwischen Spannung und Stauchung linear angenähert werden kann. Somit liegt in diesem Bereich näherungsweise ein linear-elastisches Verformungsverhalten nach dem Hook'schen Gesetz vor ($\sigma = E \cdot \varepsilon$) [6, 18]. Mit weiterer Laststeigerung nimmt die Krümmung der Spannungs-Stauchungskurve dann signifikant zu, d. h. die Stauchung steigt mit zunehmender Spannung überproportional an und ist bei Entlastung nur noch teilweise reversibel. Dieser sich durch die Krümmung der Spannungs-Stauchungskurve unter kurzzeitiger Druckbelastung abzeichnende viskose bzw. irreversible Verformungsanteil ist dabei nicht auf die unter Langzeitbeanspruchung verzögert auftretenden Kriechverformungen des Betons zurückzuführen, sondern primär auf die Entstehung von Mikrorissen (vgl. Abschnitt 2.2.1) und sonstige Gefügeänderungen [3, 26, 29].

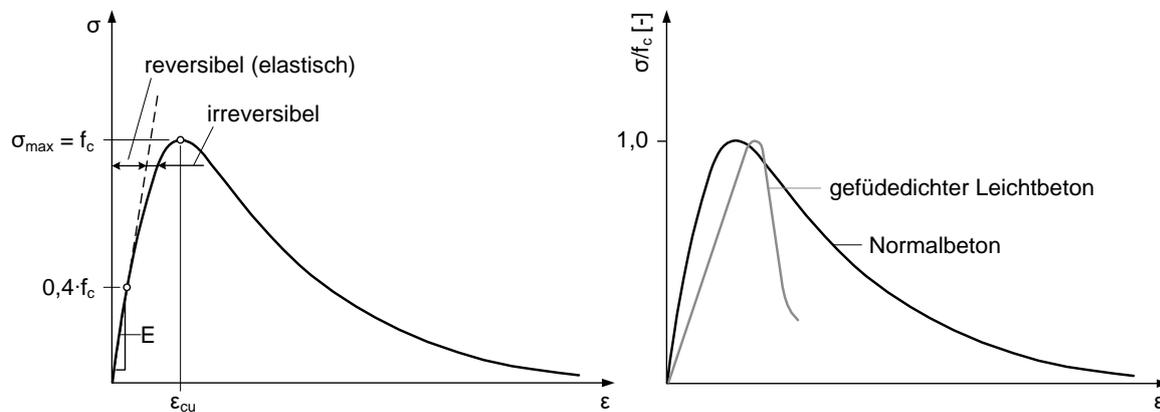


Abbildung 16: Qualitative Spannungs-Stauchungskurve von Normalbeton unter einachsiger Druckbelastung im verformungsgesteuerten Kurzzeitversuch, Kurvenverlauf nach [32] (links), Vergleich zur Spannungs-Stauchungskurve von gefügedichtem Leichtbeton, Kurvenverläufe nach [6] (rechts).

Ab ca. 70 bis 80 % der Druckfestigkeit werden lokale Bruchvorgänge im Betongefüge durch die zunehmende Entstehung von Makrorissen eingeleitet, die mit einem Abflachen der Spannungs-Stauchungskurve einhergehen [26, 29]. Die Bruchstauchung beim Erreichen der Druckfestigkeit liegt für Normalbetone mit üblichen Festigkeiten zwischen ca. 2 und 3 ‰ [3, 6, 18, 29].

Nach Überschreitung der Druckfestigkeit kommt es unter verformungsgesteuerter Belastung zu dem für Normalbeton charakteristischen Entfestigungsverhalten, wobei die Spannung mit zunehmender Stauchung allmählich wieder abnimmt [32]. Dieser Verlauf zeigt, dass zwar kein sprödes Versagen stattfindet. Aufgrund des Vergleichs zu duktilen Werkstoffen mit einem hohen plastischen Verformungsvermögen, das durch große Dehnungen bzw. Stauchungen bei annähernd konstanter Spannung charakterisiert ist, wird das Bruchverhalten von Normalbeton jedoch häufig als

spröde bezeichnet [29]. Bei Stauchungen im einstelligen bis niedrigen zweistelligen Promillebereich ist der Bruch von Normalbeton in der Regel soweit fortgeschritten, dass keine Druckspannungen mehr aufgenommen werden können [29, 32, 33].

Das Spannungs-Stauchungsverhalten von gefügedichtem Leichtbeton ist in etwa mit dem von Zementstein vergleichbar, da der Lastabtrag bevorzugt über die Matrix stattfindet [26, 34] (vgl. Abschnitt 2.2.1). Die qualitativen Verläufe der Spannungs-Stauchungskurven von gefügedichtem Leichtbeton und Normalbeton sind in Abbildung 16 (rechts) gegenübergestellt. Da bei gefügedichtem Leichtbeton keine ausgeprägte Mikrorissbildung in der Haftzone zwischen Matrix und Gesteinskörnung stattfindet und die Entstehung von Mikrorissen innerhalb der Matrix erst ab Druckspannungen von ca. 80 % der Druckfestigkeit beginnt, verläuft die Spannungs-Stauchungskurve bis zu dieser Laststufe annähernd linear [26]. Im Vergleich zu Normalbeton ist die darauffolgende Krümmung der Spannungs-Stauchungskurve bis zur Bruchstauchung ebenfalls deutlich geringer ausgeprägt, weil Makrorisse im Leichtbeton in der Regel erst unmittelbar bei Erreichen der Druckfestigkeit auftreten [29].

Bei annähernd gleicher Druckfestigkeit ist der E-Modul von gefügedichtem Leichtbeton im Vergleich zu Normalbeton aufgrund der geringeren Steifigkeit der Gesteinskörnung geringer [35]. Im Bereich einer Trockenrohddichte von $800 \text{ kg/m}^3 \leq \rho \leq 2.000 \text{ kg/m}^3$ nimmt dieser näherungsweise um den Faktor $(\rho/2.200)^2$ ab [36] und liegt somit zwischen rd. 13 und 83 % des E-Moduls von Normalbeton gleicher Festigkeit. Die Bruchstauchung von gefügedichtem Leichtbeton ist geringfügig größer als die von Normalbeton [6, 18] und beträgt zwischen 2,5 und 3,5 ‰. Bei Überschreitung der Druckfestigkeit weist gefügedichteter Leichtbeton zudem ein deutlich spröderes Bruchverhalten auf, das durch einen abrupten Spannungsabfall gekennzeichnet ist [26, 27, 33] (vgl. Abbildung 16, rechts).

Während das Spannungs-Stauchungsverhalten von Normalbeton und gefügedichtem Leichtbeton weitgehend bekannt ist, sind die Kenntnisse zum Spannungs-Stauchungsverhalten von Betonen mit einer hohen Matrixporigkeit vergleichsweise begrenzt (insbesondere in Bezug auf das Nachbruchverhalten), vor allem weil solche Betone aufgrund ihrer geringen Festigkeiten eine eher untergeordnete Rolle für tragwerksrelevante Anwendungen spielen.

In [4] wurde das Spannungs-Stauchungsverhalten von Betonen mit einem matrix- und kornporigen Gefüge unter einachsiger Druckbelastung bis zu einer Stauchung von 8 ‰ erfasst (Abbildung 17). Die Betone werden in [4] als „Leichtzuschlag-Schaumbetone“ bezeichnet und wurden durch Untermischen eines vorgefertigten Schaums sowie mit Blähton als leichte Gesteinskörnung hergestellt. Der Luftporengehalt wurde variiert und betrug zwischen rd. 2 Vol.-% (Nullbeton ohne Schaum: „T3/1050“) und 25 Vol.-% (Beton „T3/150“). Die Druckfestigkeit der Betone lag in Abhängigkeit des Luftgehaltes zwischen rd. 6 N/mm² („T3/750“) und 13 N/mm² („T3/1050“).

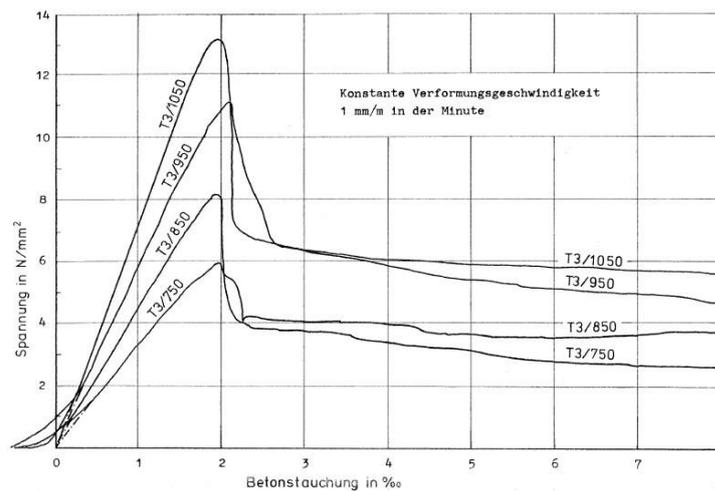


Abbildung 17: Spannungs-Stauchungskurven von Betonen mit matrix- und kornporigem Gefüge („Leichtzuschlag-Schaumbetone“ mit Blätton, variierende Luftporengehalte) unter einachsiger Druckbelastung [4].

Die Spannungs-Stauchungskurven verliefen – ähnlich wie bei gefügedichtetem Leichtbeton – bis zu einer Spannung von ca. 80 % der Druckfestigkeit annähernd linear (vgl. Abbildung 17). Der E-Modul betrug zwischen rd. 2.700 N/mm² („T3/750“) und 7.000 N/mm² („T3/1050“). Bis zum Erreichen der Druckfestigkeit bei einer Bruchstauchung, die unabhängig vom Luftgehalt der Betone bei ca. 2 ‰ lag, waren die Spannungs-Stauchungskurven dann durch eine leichte Krümmung gekennzeichnet. Unmittelbar nach Überschreiten der Bruchstauchung kam es zu einem abrupten Spannungsabfall, der ca. 30 bis 50 % der Druckfestigkeit betrug. Anschließend konnte eine weitere Stauchungszunahme bei annähernd konstanter Spannung bis zum Versuchsende beobachtet werden.

Die in [31] für Porenbeton mit variierenden Festbetonrohddichten ($460 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_{\text{PB}} \leq 580 \text{ kg/m}^3$) bis zu einer Stauchung von 45 ‰ ermittelten Spannungs-Stauchungskurven sind in Abbildung 18 dargestellt. Der Porenanteil lag in Abhängigkeit der Festbetonrohddichte deutlich über 50 Vol.-%.

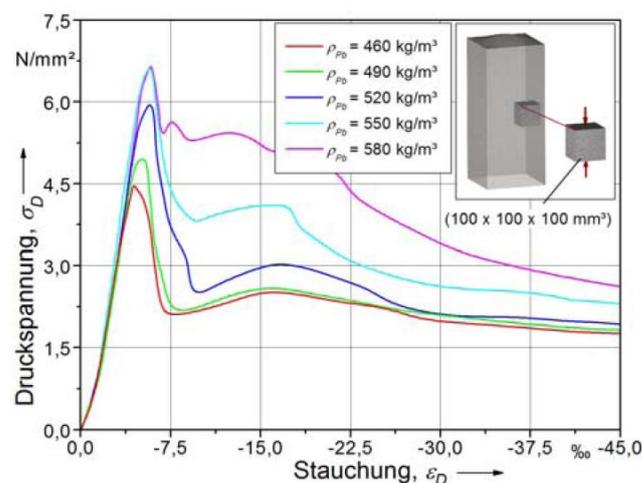


Abbildung 18: Spannungs-Stauchungskurven von Porenbeton unter einachsiger Druckbelastung mit variierenden Festbetonrohddichten [31].

Ähnlich wie bei den Leichtzuschlag-Schaumbetonen aus [4] (vgl. Abbildung 17) waren die Spannungs-Stauchungskurven durch einen annähernd linearen Belastungsast, einen abrupten Spannungsabfall nach Erreichen der Druckfestigkeit sowie einen daran anschließenden, plateauartigen Verlauf bis zum Versuchsende charakterisiert.

Die beispielhaft dargestellten Spannungs-Stauchungskurven des Leichtzuschlag-Schaumbetons aus [4] (Abbildung 17) und des Porenbetons aus [31] (Abbildung 18) zeigen, dass eine matrixporige Gefügestruktur zu einem gegenüber gefügedichtem Beton abweichenden Stauchverhalten führt. Besonders charakteristisch ist dabei der plateauartige Verlauf auf einem mehr oder weniger geringen Restspannungsniveau, der sich nach einem abrupten Spannungsabfall bei Erreichen der Druckfestigkeit einstellt. Dieses plastische Stauchverhalten ist maßgeblich auf den strukturspezifischen Versagensmechanismus zurückzuführen. Infolge der strukturellen Instabilität und dem damit einhergehenden Knicken bzw. Beulen der Porenwände und -stege kommt es vor Eintritt des globalen Versagens zu Porenquetschungen, die zu lokalen Verdichtungserscheinungen und damit zu Teilverfestigungen innerhalb des Gefüges führen [30, 31, 37]. Aufgrund des Versuchsabbruchs bei relativen geringen Stauchungen (8 ‰ bzw. 45 ‰) bleibt in den Untersuchungen in [4] und [31] jedoch offen, ob und wie weit (d. h. bis zu welchen Stauchungen) sich das plastische Stauchverhalten fortgesetzt hätte. Aus der Literatur bekannte Untersuchungen, die sich explizit mit dem plastischen Stauchverhalten stark porosierter Betone befassen, sind in Abschnitt 3.1 dokumentiert.

Neben den dargelegten strukturspezifischen Einflüssen auf das charakteristische Spannungs-Stauchungsverhalten von Beton unter einachsiger Druckbeanspruchung wird dieses von einer Vielzahl weiterer Parameter beeinflusst. Einen wesentlichen Einfluss hat dabei unter anderem die Festigkeit des Betons. Mit zunehmender Druckfestigkeit kommt es zu einem steileren Anstieg im linear-elastischen Bereich und damit zu einer Zunahme des E-Moduls sowie der Bruchstauchung [3, 6, 18, 32, 33, 38]. Aufgrund der auch zeitabhängigen Verformungseigenschaften von Beton wird das Spannungs-Stauchungsverhalten ebenfalls maßgeblich durch die Belastungsgeschwindigkeit beeinflusst [3, 18]. Zu den weiteren Einflussgrößen zählen neben der Zusammensetzung, dem Alter und dem Feuchtezustand des Betons auch die Temperatur sowie verschiedene versuchs- und messtechnische Parameter [2, 3, 18, 29, 33].

2.2.3 Querdehnung unter einachsiger Druckbeanspruchung

Unter einachsiger Druckbelastung erfährt der Beton nicht nur eine Verformung in Belastungsrichtung, sondern auch eine Verformung senkrecht dazu. Das Verhältnis zwischen der Querdehnung ε_q und der Längsstauchung ε wird dabei als Querdehnzahl μ bezeichnet ($\mu = |\varepsilon_q/\varepsilon|$). Die Querdehnung hängt dabei maßgeblich von der aufgebrachtten Druckspannung ab [3, 6, 28, 39].

Typische Verläufe der Querdehnungsentwicklung von Normalbeton, gefügedichtem Leichtbeton und Porenbeton sind in Abbildung 19 dargestellt.

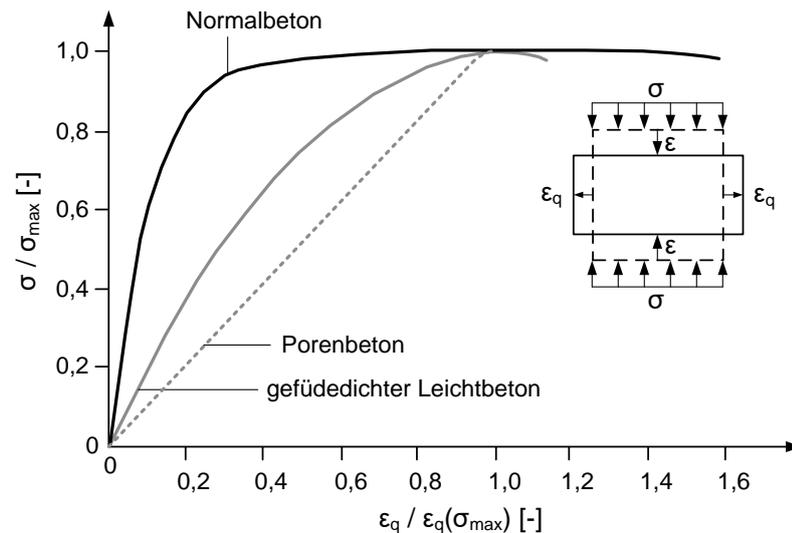


Abbildung 19: Querdehnungsverläufe von Normalbeton, gefüggedichtem Leichtbeton (Kurvenverläufe nach [29]) und Porenbeton (Kurvenverlauf nach [34]).

Bei Normalbeton und gefüggedichtem Leichtbeton nimmt die Querdehnung bis zu einer Spannung von ca. 70 bis 80 % der Druckfestigkeit annähernd linear zu und beträgt zwischen ca. 15 und 25 % der Längsstauchung ($0,15 \leq \mu \leq 0,25$) [2, 3, 29]. Da die Steifigkeit von gefüggedichtem Leichtbeton im Vergleich zu Normalbeton (bei annähernd gleichen Festigkeiten) geringer ist, ergeben sich für gefüggedichtes Leichtbeton in diesem Spannungsbereich etwas größere absolute Querdehnungen [2, 34]. Bei Normalbeton steigen die Querdehnung und die Querdehnzahl aufgrund der ausgeprägten Mikrorissentwicklung in der Haftzone zwischen Matrix und Gesteinskörnung sowie der beginnenden Makrorissbildung (vgl. Abschnitt 2.2.1) mit weiter zunehmender Spannung überproportional an [2, 29]. Bei Spannungen in Höhe der Druckfestigkeit erreicht die Querdehnung Werte, die in der Größenordnung der Längsstauchung liegen (d. h. $\mu \approx 1,0$) [2, 29]. Bei gefüggedichtem Leichtbeton ist der überproportionale Anstieg der Querdehnung aufgrund der reduzierten Rissbildung (vgl. Abschnitt 2.2.1 und 2.2.2) bis zum Erreichen der Druckfestigkeit deutlich geringer ausgeprägt [2, 29]. Bei Erreichen der Druckfestigkeit ergeben sich dementsprechend auch vergleichsweise geringere Querdehnungen.

Wie Untersuchung in [34] gezeigt haben und in Abbildung 19 dargestellt ist, verhält sich die Querdehnung von Porenbeton bis zum Erreichen der Druckfestigkeit direkt proportional zur aufgebrachten Spannung. Mit $\mu \approx 0,2$ entspricht die Querdehnzahl dabei in etwa jenen von Normalbeton bzw. gefüggedichtem Leichtbeton im linear-elastischen Bereich [3]. Dementsprechend ist die absolute Querdehnung bei Erreichen der Druckfestigkeit geringer. Die Querdehnzahl von Schaumbeton liegt ebenfalls bei $\mu \approx 0,2$ [3].

Auch wenn aus der Literatur keine genaueren Untersuchungen zum spannungsabhängigen Querdehnverhalten von Schaumbetonen bekannt sind, kann aufgrund der strukturellen Ähnlichkeit des Gefüges darauf geschlossen werden, dass keine signifikanten Unterschiede zum Querdehnverhalten von Porenbeton bestehen.

Hinsichtlich der strukturellen Zusammensetzung lässt sich zusammenfassend konstatieren, dass eine porige Gefügestruktur bei hohen Lastniveaus zu einer geringeren Querdehnungsentwicklung führt.

Wie auch die Stauchung in Belastungsrichtung, unterliegt die spannungsabhängige Querdehnung bzw. die Querdehnzahl einer Vielzahl weiterer Einflussgrößen (Festigkeit, Betonalter, Feuchtzustand etc.) [6].

2.2.4 Einachsige Druckfestigkeit

Die einachsige Druckfestigkeit von Beton hängt von seinem Trag- und Bruchverhalten (vgl. Abschnitt 2.2.1) ab und wird daher ebenfalls maßgeblich von der Gefügestruktur beeinflusst [3, 26]. Bei Normalbeton wird die Druckfestigkeit erreicht, wenn die Zugspannungen, die sich infolge der Rissbildung in der Haftzone zwischen Matrix und Gesteinskörnung auf die Matrix umlagern, nicht vollständig von dieser aufgenommen werden können [3, 29]. Daher besteht für Normalbeton ein annähernd proportionaler Zusammenhang zwischen der Betondruckfestigkeit und der Matrixfestigkeit [40]. Die Haupteinflussgrößen auf die Matrixfestigkeit und damit auf die Druckfestigkeit von Normalbeton sind die Zementfestigkeit sowie der Wasserzementwert bzw. die daraus resultierende Kapillarporosität des Zementsteingefüges [3, 6, 18, 26, 40] (Abbildung 20, links).

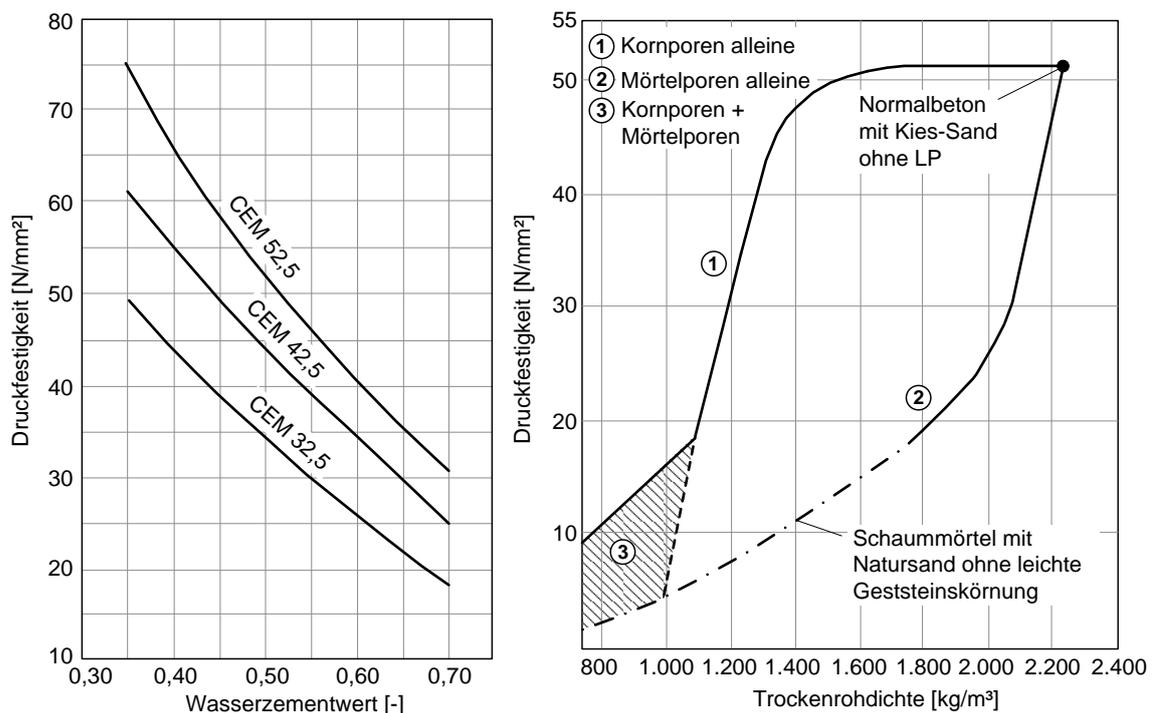


Abbildung 20: Einfluss des Wasserzementwertes und der Zementfestigkeitsklasse auf die Druckfestigkeit von Normalbeton, Abb. modifiziert nach [6] (links), halbqualitativer Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Trockenrohdichte, Abb. modifiziert nach [4] (rechts).

Die Porosierung von Beton führt – sei es durch den Einsatz leichter Gesteinskörnungen oder die Einführung künstlicher Luftporen – zu einer Abminderung der Betonrohddichte (vgl. Abschnitt 2.1). Wie aus Untersuchungen in [4] hervorgeht und in Abbildung 20 (rechts) dargestellt ist, ist in Bezug auf die Betondruckfestigkeit jedoch entscheidend, ob die Poren in den Gesteinskörnern oder in der Matrix vorliegen, weil die Auswirkungen auf das Trag- und Bruchverhalten verschieden sind.

Ausgehend von einem Normalbeton mit dichter Gesteinskörnung (Kies, Natursand) führt die Absenkung der Betonrohddichte durch Luftporen in der Matrix in gleicherweise wie Kapillarporen infolge eines hohen Wasserzementwertes von Anfang an zu einem steilen Abfall der Druckfestigkeit (Linie 2: „Mörtelporen alleine“, vgl. Abbildung 20, rechts). Hingegen führen Poren in den Gesteinskörnern nur dann zu einer Abnahme der Druckfestigkeit, wenn die Festigkeit bzw. Steifigkeit der Gesteinskörner die der Matrix unterschreiten. Bis zu einer gewissen Grenzrohddichte, die abhängig von den Steifigkeitsverhältnissen zwischen Gesteinskörnung und Matrix ist, bleibt die Druckfestigkeit mit zunehmender Kornporigkeit daher konstant (Linie 1: „Kornporen alleine“, vgl. Abbildung 20, rechts). Erst bei einer Umkehr der Festigkeits- und Steifigkeitsverhältnisse (d. h. wenn die Festigkeit und Steifigkeit der leichten Gesteinskörnung im Vergleich zur Matrix geringer sind) führt die Abminderung der Rohddichte infolge einer Erhöhung der Kornporigkeit ebenfalls zu einer signifikanten Abnahme der Betondruckfestigkeit. In diesem Fall ändert sich das Trag- und Bruchverhalten im Vergleich zu Normalbeton (Fall B, vgl. Abschnitt 2.2.1), sodass die Betondruckfestigkeit nicht mehr alleinig von der Matrixfestigkeit, sondern ebenfalls maßgeblich von der Festigkeit der Gesteinskörnung abhängig ist. Aus den zuvor genannten Gründen ist die Druckfestigkeit von gefüggedichtem bzw. kornporigem Leichtbeton ohne Luft- bzw. Matrixporen in der Regel deutlich größer als die Druckfestigkeit eines matrixporigen Schaumbetons gleicher Rohddichte. Unter Verwendung sehr poröser leichter Gesteinskörnung mit einer extrem geringen Festigkeit und Steifigkeit nähern sich die Druckfestigkeiten jedoch wieder an, da sich die Gesteinskörner in diesem Fall kaum noch am Lastabtrag beteiligen und sich somit ähnlich wie Luftporen gleichen Volumens verhalten. Bei matrix- und kornporigen Betonen mit sehr geringen Betonrohddichten (Bereich 3: „Kornporen + Mörtelporen“, vgl. Abbildung 20, rechts) sind Matrix- und Kornporen daher in gewissen Grenzen gegeneinander austauschbar, ohne dass sich das Verhältnis zwischen Betonrohddichte und -druckfestigkeit signifikant ändert [4].

Neben der Matrixfestigkeit ist die von der Gesamtporosität abhängige Betonrohddichte somit die maßgebende Einflussflussgröße auf die Druckfestigkeit von Betonen mit einem matrixporigen bzw. matrix- und kornporigen Gefüge. Der Zusammenhang zwischen der Betonrohddichte und der Druckfestigkeit für Schaumbetone ohne sowie mit verschiedenen leichten Gesteinskörnungen und (Leicht-)Sanden ist in Abbildung 21 dargestellt.

Die nach Abbildung 21 im Vergleich zu Schaumbetonen höhere Druckfestigkeit von Porenbeton mit gleicher Rohddichte ist laut [3] auf die spezielle Autoklaverhärtung und die dabei stattfindende Kalk-Kieselsäure-Reaktion zurückzuführen. Die spezifischen Festigkeitseigenschaften von Porenbeton sind für diese Arbeit jedoch nicht relevant und werden daher nicht weiter thematisiert.

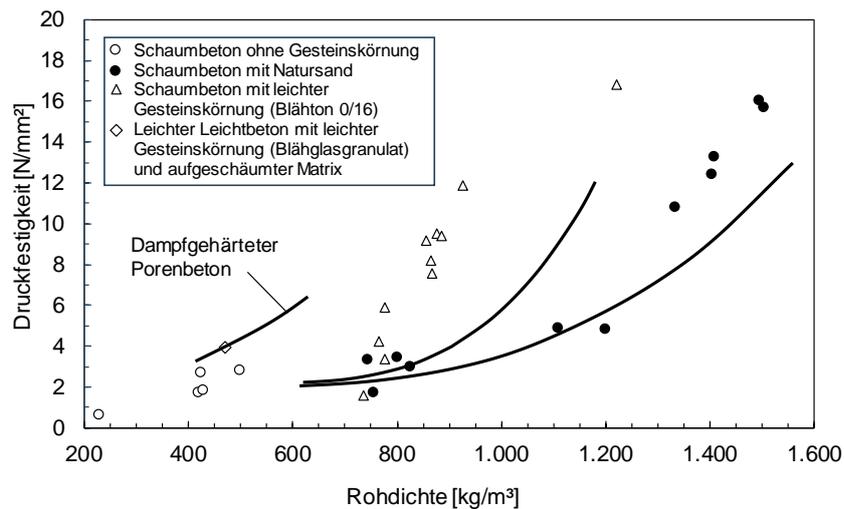


Abbildung 21: Zusammenhang zwischen Betonrohddichte und Druckfestigkeit von Schaumbeton (und Porenbeton), Abb. modifiziert nach [3].

Aus Untersuchungen in [7] geht hervor, dass die Druckfestigkeit von Schaumbetonen bei ansonsten gleicher Zusammensetzung weitgehend unabhängig davon ist, ob die Luftporen während des Mischvorgangs durch die direkte Zugabe von Luftporen- bzw. Schaumbildnern, durch Untermischen eines separat hergestellten Schaums oder in Form von EPS-Perlen mit vernachlässigbar geringer Festigkeit und Steifigkeit eingeführt werden.

2.2.5 Mehrachsige Druckbeanspruchung

Bei mehrachsiger Druckbeanspruchung werden die sich senkrecht zur Hauptbelastungsrichtung einstellenden Querdehnungen behindert und die Querkzugspannungen überdrückt (bei zweiachsiger Druckbelastung in einer Querrichtung, bei dreiachsiger Druckbelastung in beiden Querrichtungen). Risse, die sich unter einachsiger Druckbelastung bereits vor Erreichen der Druckfestigkeit bevorzugt parallel zur Belastungsrichtung ausbilden, entstehen infolge der Querpressung bei mehrachsiger Druckbelastung erst auf höheren Lastniveaus. Dadurch können in der Hauptbelastungsrichtung Druckspannungen aufgenommen werden, die größer als die einachsige Druckfestigkeit sind [2, 18, 41-44].

Bei Normalbeton kann die aufnehmbare Druckspannung unter zweiachsiger Druckbelastung in Abhängigkeit der Querpressung um ca. 25 % gegenüber der einachsigen Druckfestigkeit gesteigert werden [6, 18] (Abbildung 22, links). Unter dreiachsiger Druckbelastung nimmt die aufnehmbare Druckspannung bereits bei geringen Querpressungen deutlich stärker zu als im zweiachsigen Fall, sodass diese ein Vielfaches der einachsigen Druckfestigkeit betragen kann. Die höchste aufnehmbare Druckspannung wird unter hydrostatischer Beanspruchung ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) erreicht [6, 18] (Abbildung 22, rechts).

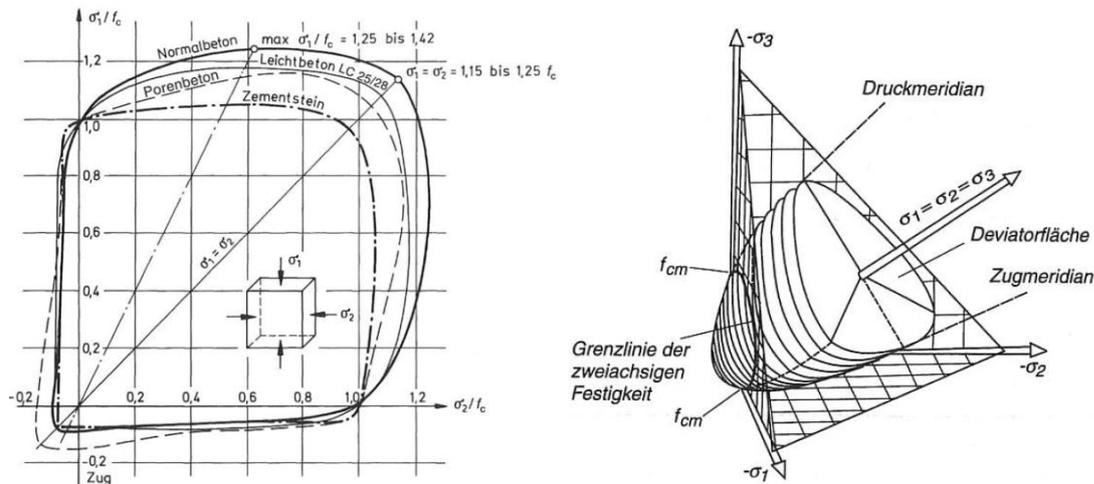


Abbildung 22: *Betondruckfestigkeit unter mehrachsiger Beanspruchung: Grenzlinie bei zweiachsiger Beanspruchung [3], Abb. basierend auf [34, 39, 45] (links), Grenzfläche bei dreiachsiger Beanspruchung [3], Originalabb. aus [46] (rechts).*

Für Betone mit einer porigen Gefügestruktur ist die Effektivität der Querpressung bei mehrachsiger Druckbeanspruchung hinsichtlich der Steigerung der aufnehmbaren Druckspannung deutlich geringer als für Normalbetone (vgl. Abbildung 22, links). Im Wesentlichen ist dies zum einen auf die geringere innere Widerstandsfähigkeit gegen den Querdruck, zum anderen auf die geringe Steifigkeit der Gesteinskörnung und die damit verbundene reduzierte Rissbildung gegenüber Normalbeton zurückzuführen [2]. Aus letzterem Grund ist die festigkeitssteigernde Wirkung unter mehrachsiger Druckbeanspruchung für reinen Zementstein sehr gering [34] (vgl. Abbildung 22, links).

2.2.6 Einachsige Druckbeanspruchung mit Umschnürung

Bei einachsiger Druckbelastung wird die Querdehnung infolge einer Umschnürung behindert. Diese kann beispielsweise in Form einer Umschnürungsbewehrung oder wie bei den in dieser Arbeit durchgeführten Stauchversuchen in Form einer steifen Probenhalterung vorliegen. Dadurch stellen sich Spannungszustände ein, wie sie auch bei einer dreiachsigen Druckbeanspruchung (vgl. Abschnitt 2.2.5) generiert werden, wobei die Querpressungen in den beiden Richtungen senkrecht zur Belastungsrichtung gleich groß sind ($\sigma_2 = \sigma_3 < \sigma_1$). Der wesentliche Unterschied ist, dass die Querpressungen im Falle einer Umschnürung abhängig von der Querdehnung und damit auch von der Stauchung bzw. der Druckspannung in Belastungsrichtung sind [2].

Während die aufnehmbare Druckspannung für Normalbeton durch eine Umschnürung deutlich gesteigert werden kann, ist für Betone mit einer porigen Gefügestruktur hingegen eine eher geringe festigkeitssteigernde Wirkung zu erwarten. Zusätzlich zu den in Abschnitt 2.2.5 genannten Gründen spielt dabei auch die geringere Querdehnungsentwicklung auf höheren Lastniveaus (vgl. Abschnitt 2.2.3) mit hinein [2]. Aufgrund des fehlenden Korngerüsts ist für Zementstein eine nur sehr geringe Steigerung der aufnehmbaren Druckspannung infolge einer Umschnürung zu erwarten (vgl. auch Abbildung 22, links).

2.2.7 Teilflächenbeanspruchung

Bei Teilflächenbeanspruchungen werden Druckkräfte konzentriert über eine lokal begrenzte Fläche der insgesamt zur Verfügung stehenden Querschnittsfläche eingeleitet [47, 48]. Diese Belastungsart führt – wie auch bei vollflächiger einachsiger Druckbelastung – neben einer Stauchung in Belastungsrichtung zu einer Querdehnung. Die Querdehnung kann sich jedoch aufgrund der Umschnürung des umgebenden, unbelasteten Betons nicht unbehindert einstellen (Abbildung 23, links). Gleichzeitig kommt es im sogenannten „St. Venant’schen Einleitungsbereich“ unterhalb der Lasteinleitungsfläche zu einer Ausbreitung und Umlenkung der Druckspannungen (Abbildung 23, Mitte). Infolge der Umlenkung der Spannungstrajektorien sowie der inneren Querdehnungsbehinderung durch den Umschnürungseffekt stellen sich unterhalb der Lastfläche dreiaxiale Spannungszustände ein (Abbildung 23, rechts), die analog zu einer mehrachsigen Druckbelastung (vgl. Abschnitt 2.2.5) bzw. einer äußeren Umschnürung (vgl. Abschnitt 2.2.6) in Abhängigkeit der Gefügestruktur des Betons zu einer mehr oder weniger ausgeprägten Steigerung der maximal aufnehmbaren Druckspannung führen können [2, 48-51].

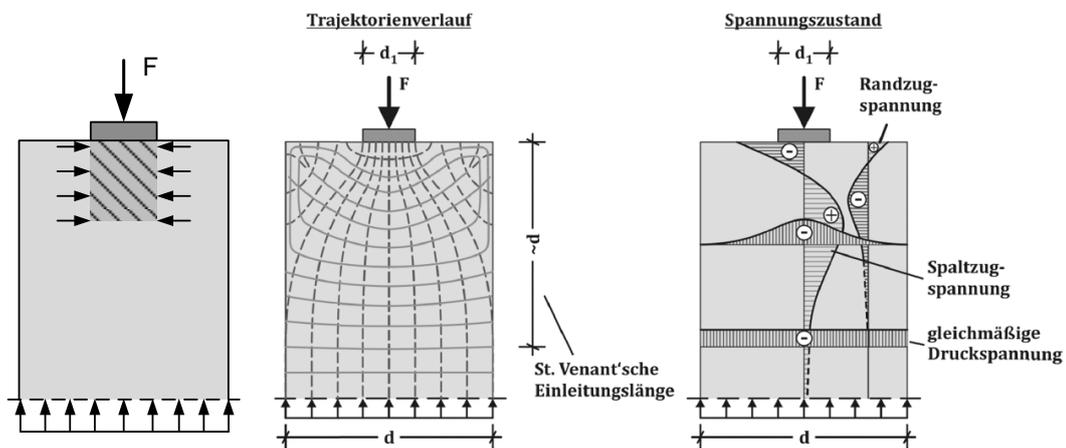


Abbildung 23: Teilflächenbelastung von Beton: Schematische Darstellung der Umschnürungswirkung nach [46] (links), charakteristischer Verlauf der Hauptspannungstrajektorien [48] (Mitte), qualitative Darstellung des resultierenden Spannungszustands [48] (rechts).

Neben hohen lokalen Druckspannungen unmittelbar unterhalb der Lasteinleitungsfläche werden in einem gewissen Abstand zu dieser auch Querspannungen (Spaltzugspannungen) generiert, die bei Überschreiten der Zugfestigkeit zum Spalten des Betons führen und daher für das Versagen von Beton unter Teilflächenbelastung in der Regel maßgebend werden [48, 51].

Für Normalbeton haben Untersuchungen (u. a. [51, 52]) gezeigt, dass sich die Zunahme der maximal aufnehmbaren Teilflächenspannung in etwa proportional zur Quadratwurzel aus dem Verhältnis zwischen der Querschnitts- und der Lasteinleitungsfläche A/A_S verhält. In Untersuchungen in [49] wurde für gefügedichten Leichtbeton mit einer Rohdichte von $\rho \approx 1.500 \text{ kg/m}^3$ hingegen eine Proportionalität zur Kubikwurzel des Flächenverhältnisses festgestellt. Die Zunahme der maximal aufnehmbaren Teilflächenspannung nach dem Quadrat- bzw. Kubikwurzel-Ansatz ist in Abbildung 24 (links) grafisch dargestellt.

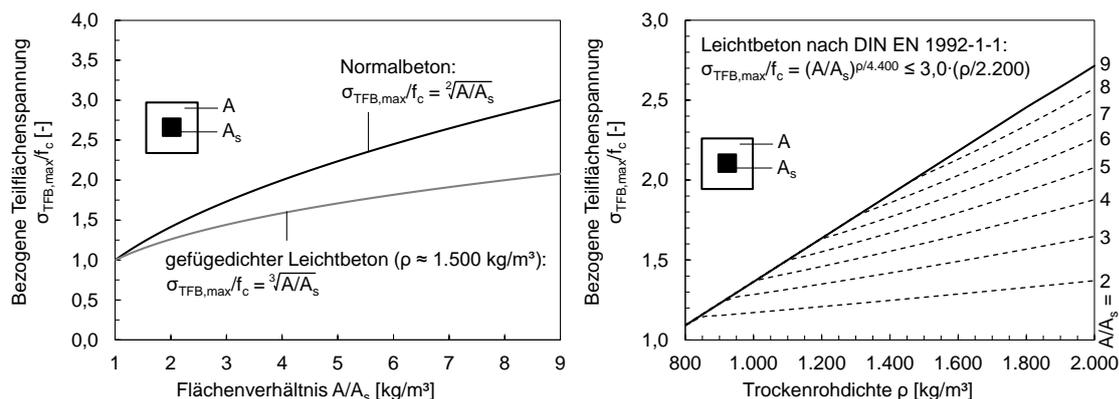


Abbildung 24: Steigerung der maximal aufnehmbaren Teilflächenspannung nach dem Quadrat- bzw. Kubikwurzel-Ansatz (links) und Einfluss der Trockenbeton-Rohdichte nach DIN EN 1992-1-1 [36] (rechts).

In weiteren Untersuchungen an gefügedichteten Leichtbetonen (u. a. [53, 54]) wurde festgestellt, dass der festigkeitssteigernde Effekt unter Teilflächenbelastung mit sinkender Rohdichte abnimmt, wobei der Einfluss der Rohdichte umso ausgeprägter ist, je kleiner das Flächenverhältnis (d. h. je größer die Lastausbreitung) ist [2]. Diesem Umstand wird beispielsweise auch in der einschlägigen Bemessungsnorm DIN EN 1992-1-1 [36] nachgekommen. Nach [36] ergibt sich das Verhältnis zwischen der maximal aufnehmbaren Teilflächenspannung und der einachsigen Druckfestigkeit von gefügedichtem Leichtbeton (Konstruktionsleichtbeton gemäß [36]), wie auch in Abbildung 24 (rechts) grafisch veranschaulicht, zu:

$$\sigma_{TFB,max}/f_c = (A/A_s)^{\rho/4.400} \leq 3,0 \cdot (\rho/2.200) \quad (1)$$

mit:	$\sigma_{TFB,max}$	max. aufnehmbare Teilflächenspannung	[N/mm ²]
	f_c	einachsige Druckfestigkeit	[N/mm ²]
	A	Querschnittsfläche	[cm ²]
	A_s	Lasteinleitungsfläche	[cm ²]
	ρ	Trockenbeton-Rohdichte	[kg/m ³]

Der obere Grenzwert für die Steigerung der aufnehmbaren Teilflächenspannung in Gleichung (1) von $3,0 \cdot (\rho/2.200)$ basiert dabei auf geometrischen Restriktionen der Lastverteilungsfläche.

Bisher liegen nur sehr wenige aussagekräftige Studien vor, in denen Betone mit einem matrixporigen bzw. matrix- und kornporigen Gefüge unter Teilflächenbeanspruchungen untersucht wurden. Aus den Ergebnissen der Untersuchungen an teilflächenbelastetem Porenbeton in [55] deutet sich jedoch an, dass sich für die Steigerung der maximal aufnehmbaren Teilflächenspannung solcher Betone eine ähnliche Abhängigkeit zum Lastflächenverhältnis ergibt, wie für gefügedichteten Leichtbeton. Tendenziell waren die auf die einachsige Druckfestigkeit bezogenen Teilflächenspannungen allerdings etwas geringer [55]. Aufgrund der strukturellen Ähnlichkeit sind für Schaumbetone vergleichbare Tendenzen zu erwarten.

2.3 Zellulare Werkstoffe

2.3.1 Allgemeines und Begriffe

Zellulare bzw. poröse Werkstoffe bestehen in ihrer einfachsten Form aus einem festen Grundmaterial, das mit einer Vielzahl über das Volumen verteilter Hohlräume durchsetzt ist. Die Hohlräume sind in der Regel mit Luft gefüllt und werden als Zellen oder Poren bezeichnet [56].

Unabhängig von der Art des Grundmaterials erfolgt in der Literatur häufig eine Differenzierung zwischen zellularen und porösen Werkstoffen in Abhängigkeit der relativen Dichte. Diese dient gleichzeitig als wichtigste Kenngröße zur Charakterisierung zellulärer bzw. poröser Werkstoffe und ist definiert als das Verhältnis zwischen der auf das Gesamtvolumen bezogenen Dichte (d. h. die Dichte des Werkstoffes inklusive der eingeschlossenen Hohlräume) und der Dichte des festen Grundmaterials [56, 57]. Häufig wird anstelle der relativen Dichte auch die relative Porosität herangezogen. Diese gibt den auf das Gesamtvolumen bezogenen Hohlraumgehalt an [56, 57].

Bedingt durch den charakteristischen Strukturaufbau sind zellulare bzw. poröse Werkstoffe stets durch eine relative Dichte – also relativ zum Grundmaterial – kleiner als 1,0 charakterisiert [57]. Dabei wird für Werkstoffe mit einer sehr geringen relativen Dichte in der Regel der Begriff „zellulär“, für solche mit einer mittleren bis hohen relativen Dichte der Begriff „porös“ verwendet. Beispielsweise wird in [56] der Übergang zwischen einer zellularen und einer porösen Werkstoffstruktur bei einer relativen Dichte von 0,3 festgelegt (entspricht einer relativen Porosität von 70 %). Eine sinnvolle Begründung für eine scharfe Abgrenzung existiert aus technischer Sicht jedoch nicht, sodass die beiden Begriffe in der Literatur teilweise unpräzise und uneinheitlich verwendet werden. In diesem Abschnitt liegt der Fokus auf den charakteristischen Verformungseigenschaften von Werkstoffen mit einer besonders niedrigen relativen Dichte, sodass im Folgenden die Bezeichnung „zellulär“ verwendet wird. Diese Eigenschaften sind bis zu einer gewissen relativen Dichte jedoch ebenso auf poröse Werkstoffe übertragbar.

Das die Zellen umschließende Feststoffgerüst (Matrix) kann aus verschiedensten Materialien (z. B. Metall, Kunststoff, Zementstein) bestehen und bildet ein miteinander verbundenes Netzwerk aus Zellwänden bzw. -stegen, die sogenannte Zellstruktur. Die geometrische Form der Zellstruktur ist ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal zellulärer Werkstoffe und wird durch die Geometrie und die räumliche Anordnung der Zellen bestimmt. Dabei wird zwischen zwei- und dreidimensionalen Zellstrukturen unterschieden. Erstere sind durch parallel angeordnete und in eine Raumrichtung orientierte Zellen charakterisiert. Dementsprechend weisen sie anisotrope Eigenschaften auf. Dreidimensionale Zellstrukturen sind hingegen durch eine raumerfüllende und mehr oder weniger willkürlich orientierte Anordnung der Zellen gekennzeichnet. Sie besitzen daher in der Regel weitgehend isotrope Eigenschaften [56, 57].

Die Zellen können in sich geschlossen und dementsprechend voneinander getrennt vorliegen oder ein offenes und miteinander verbundenes Netzwerk bilden. Zellulare Werkstoffe mit einer dreidi-

mensionalen und überwiegend geschlossenen Zellstruktur werden in der Regel als „Schäume“ bezeichnet [56]. Für solche mit überwiegend offenen Zellen wird hingegen der Begriff „Schwamm“ verwendet [58]. Etwas inkonsistent werden Letztere allerdings häufig auch als „geschlossenzellige Schäume“ bezeichnet [59]. Bei den meisten zellularen Werkstoffen mit einer dreidimensionalen Zellstruktur handelt es sich um „gemischtzellige Schäume“, die sowohl aus geschlossenen als auch offenen Zellen bestehen.

Im Vergleich zu massiven Werkstoffen bzw. solchen mit geringer Porosität weisen zelluläre Werkstoffe aufgrund ihres strukturellen Aufbaus eine Vielzahl günstiger Materialeigenschaften auf, weshalb sie in verschiedensten konstruktiven und funktionellen Anwendungsgebieten zum Einsatz kommen [56-58]. Beispielsweise besitzen sie ein niedriges spezifisches Eigengewicht sowie ein erhöhtes Wärme- und Schalldämmvermögen. Darüber hinaus weisen zelluläre Werkstoffe ein hohes Energieabsorptionsvermögen auf. Dieses resultiert aus dem charakteristischen Spannungs-Stauchungsverhalten, das sich durch ein ausgeprägtes (plastisches) Stauchvermögen auszeichnet und im folgenden Abschnitt näher beschrieben wird.

2.3.2 Spannungs-Stauchungsverhalten

Bemerkenswerterweise stellt sich für eine Vielzahl zellulärer Werkstoffe aus den verschiedensten Grundmaterialien ein Spannungs-Stauchungsverhalten unter Druckbeanspruchung ein, das prinzipiell dem in Abbildung 25 dargestellten idealisierten Spannungs-Stauchungsverhalten entspricht, obwohl sich die Stauchungseigenschaften der Grundmaterialien selber grundlegend unterscheiden können [57].

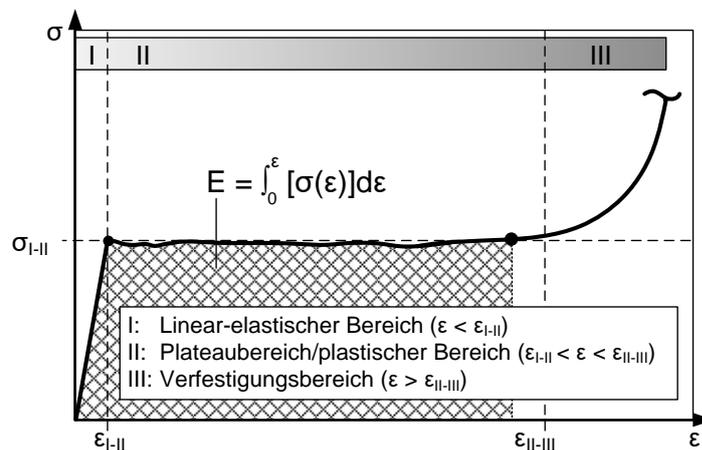


Abbildung 25: Idealisiertes Spannungs-Stauchungsverhalten zellulärer Werkstoffe unter Druckbeanspruchung nach [56].

Das idealisierte Spannungs-Stauchungsverhalten kann in drei charakteristische Bereiche unterteilt werden (vgl. Abbildung 25):

- Bereich I: Linear-elastischer Bereich
- Bereich II: Plateaubereich/plastischer Bereich
- Bereich III: Verfestigungsbereich

Zur Beschreibung der mikro- und makrostrukturellen Mechanismen, die zu dem charakteristischen Spannungs-Stauchungsverhalten führen, entwickelten *Gybson & Ashby* [56] ein phänomenologisches Modell, in dem die komplexe Struktur zellularer Werkstoffe auf eine idealisierte Einheitszelle heruntergebrochen wird (Abbildung 26). In diesem Modell wird angenommen, dass die Zellwände bzw. -stege der Einheitszelle infolge einer von außen angreifenden Druckbelastung primär auf Biegung beansprucht werden.

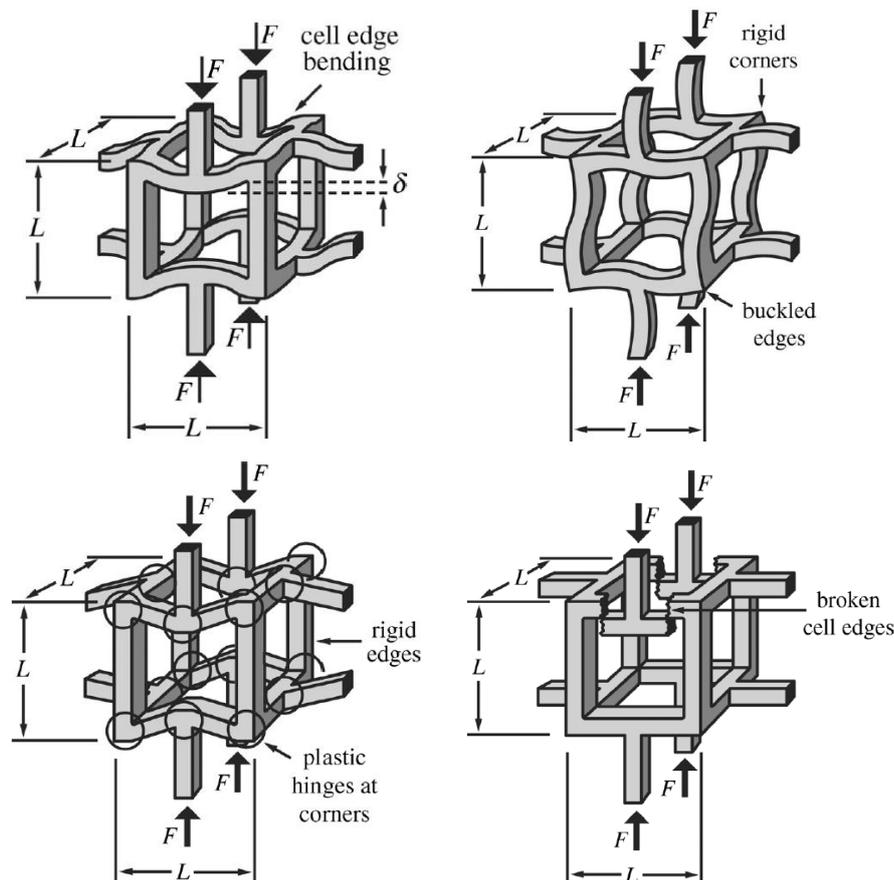


Abbildung 26: Schematische Darstellung der verschiedenen Verformungsmechanismen zellularer Werkstoffe [60]: Linear-elastisches Durchbiegen (oben links), nichtlinear-elastisches Knicken bzw. Beulen (oben rechts), Ausbildung von Fließgelenken (unten links), Brechen bzw. Biegeversagen (unten rechts).

Bei Belastungsbeginn liegt zunächst ein linear-elastisches Stauchverhalten vor (Bereich I, vgl. Abbildung 25), wobei die Steigung der Spannungs-Stauchungskurve in diesem Bereich die initiale Struktursteifigkeit des zellulären Werkstoffes widerspiegelt. Gemäß der Modellvorstellung nach [56] kommt es in diesem Bereich zu einer elastischen Durchbiegung der Zellwände bzw. -stege (vgl. Abbildung 26, oben links).

Bei Erreichen einer gewissen Grenzspannung σ_{I-II} (bzw. Grenzstauchung ε_{I-II}) führt die strukturelle Instabilität zum sukzessiven Kollabieren der Zellwände bzw. -stege. Infolgedessen wird der linear-elastische Bereich verlassen und es stellt sich ein Stauchverhalten ein, das durch große Stauchungen bei einer annähernd konstanten Spannung charakterisiert ist (Bereich II, vgl. Abbildung 25). In

Abhängigkeit der Verformungseigenschaften des Grundmaterials dominieren jedoch andere Mechanismen, die zu dem charakteristischen Spannungsplateau in diesem Stauchungsbereich führen [56, 57, 60]. Nach [56] stellt sich das Spannungsplateau bei zellularen Werkstoffen, die aus Grundmaterialien mit annähernd rein elastischen Verformungseigenschaften bestehen (z. B. Elastomere), infolge eines elastischen Beulens bzw. Knickens der Zellwände und -stege ein (vgl. Abbildung 26, oben rechts). In diesem Fall handelt es sich somit nicht um eine plastische, sondern um eine nicht-linear-elastische Verformung. Besteht das Feststoffgerüst hingegen aus Materialien mit plastischen Verformungseigenschaften (z. B. Metalle) bilden sich bei zunehmender Durchbiegung der Zellwände bzw. -stege Fließgelenke aus (vgl. Abbildung 26, unten links) und der zelluläre Werkstoff verformt sich plastisch im Bereich des Spannungsplateaus. Ein weiterer Mechanismus, der ebenfalls zu irreversiblen Verformungen im Bereich des Spannungsplateaus führt und insbesondere bei zellularen Werkstoffen aus spröden Grundmaterialien (z. B. Glas) dominiert, ist das Brechen bzw. Versagen der Zellwände- bzw. -stege infolge der Überschreitung eines kritischen Biegemoments (vgl. Abbildung 26, unten rechts). Bei einer Vielzahl von Grundmaterialien überlagern sich die verschiedenen Verformungsmechanismen, wobei derjenige maßgebend wird, der die geringste Belastung erfordert [56].

Mit zunehmender Stauchung kommt es gleichzeitig zu Porenquetschungen und damit zu einer Verdichtung der Zellstruktur, wodurch letztlich der Übergang in den Verfestigungsbereich (Bereich III, vgl. Abbildung 25) eingeleitet wird. In diesem Bereich geht die Zunahme der Stauchung mit einem progressiven Spannungsanstieg einher. Das Gesamtstauchvermögen wird dabei durch die zunehmende Verfestigung limitiert [56].

Die drei maßgeblichen Einflussgrößen, die das Spannungs-Stauchungsverhalten zellulärer Werkstoffe bestimmen, sind laut [56-58, 60]:

- 1) Die mechanischen Eigenschaften des Grundmaterials,
- 2) die relative Dichte bzw. Porosität,
- 3) die Zelltopologie (Zellform, Stegdicke, offen-/geschlossenzellige Struktur).

Aufgrund des charakteristischen Spannungsplateaus besitzen zelluläre Werkstoffe ein hohes Energieabsorptionsvermögen. Die bis zu einer bestimmten Stauchung absorbierte Energie (pro Volumen) kann als die Fläche unter der Spannungs-Stauchungskurve visualisiert werden und berechnet sich nach dem in Abbildung 25 angegebenen Integral [56].

3 Zementgebundene Materialsysteme mit hohem plastischen Stauchvermögen

3.1 Bisherige Untersuchungen

3.1.1 Vorbemerkungen

Experimentelle Studien zum Stauchverhalten stark porosierter Betone und betonähnlicher zementgebundener Materialsysteme liegen nur in geringer Anzahl vor. In diesen wurden fast ausschließlich Schaumbetone bzw. -mörtel untersucht, die ohne leichte Gesteinskörnungen oder andere poröse Zuschlagstoffe hergestellt wurden. Zudem sind die Ergebnisse der Untersuchungen nur teilweise und nicht direkt miteinander vergleichbar, da bislang keine genormten Prüfmethoden zur Untersuchung des Stauchverhaltens zementgebundener Materialien verfügbar sind und somit größtenteils unterschiedliche Randbedingungen bei den Versuchen vorlagen. Nachfolgend werden die wesentlichen Erkenntnisse bisher bekannter Studien dargelegt.

3.1.2 Stauchverhalten von Schaumbetonen

Untersuchungen von Zhang et al. ([61])

In [61] wurde ein analytisches Modell für das Energieabsorptionsverhalten von Schaumbetonen entwickelt, die bei Notfall-Abbremsystemen für Flugzeuge auf Start- und Landebahnen (vgl. Abschnitt 3.2) eingesetzt werden. Die mechanischen Eingangsgrößen wurden in Stauchversuchen an Schaumbetonen mit sehr geringen Rohdichten zwischen 274 und 337 kg/m³ untersucht. Die Abmessungen der Probekörper betragen 300 × 300 × 150 mm³. Die Kraft wurde teilflächig über Druckstempel mit variierenden Durchmessern (60, 80, 100 mm) aufgebracht. Die Stauchversuche wurden weggeregelt mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,5 mm/min gefahren.

Wie anhand der Kraft-Verschiebungskurven (hier: Verschiebung \triangleq Eindringtiefe des Druckstempels) in Abbildung 27 (links) abzuleiten ist, wiesen die untersuchten Schaumbetone ein Stauchverhalten auf, das prinzipiell dem von zellularen Werkstoffen entspricht (vgl. Abbildung 25, Abschnitt 2.3.2). Nach einem anfänglich sehr steilen Kurvenanstieg (elastischer Bereich) stellte sich bis zu einer Eindringtiefe des Druckstempels zwischen ca. 80 und 100 mm ($\triangleq \varepsilon \approx 53$ bis 67 %) eine annähernd konstante Kraft ein (plastischer Bereich). Dabei verliefen die Kurven mit zunehmendem Stempelradius auf einem höheren Kraftniveau. Mit weiter zunehmender Stauchung konnte der Übergang in den Verfestigungsbereich anhand des progressiven Kraftanstiegs beobachtet werden.

Für die Grenzspannung („initial yield stress“) bzw. das Spannungsniveau im plastischen Bereich und die absorbierte Energie („tearing energy“) stellten *Zhang et al.* eine annähernd lineare Abhängigkeit zur Rohdichte der Schaumbetone fest (Abbildung 27, rechts).

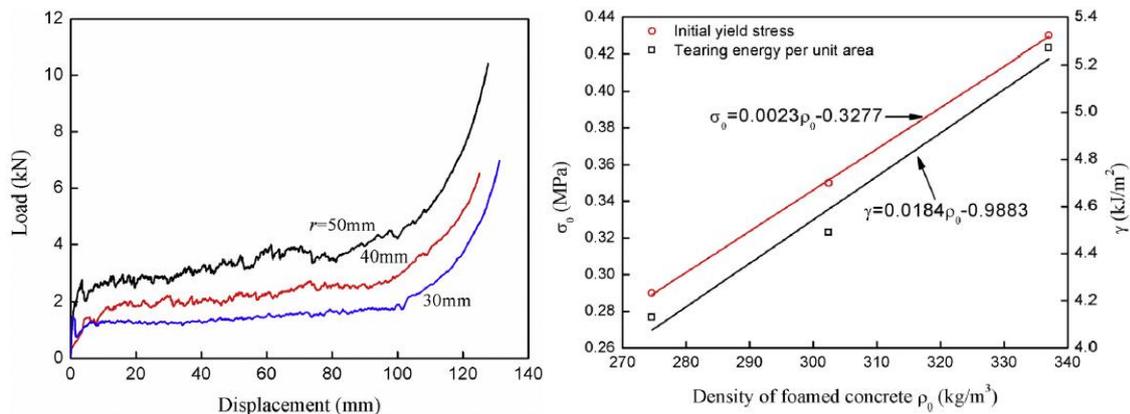


Abbildung 27: Kraft vs. Eindringtiefe des Druckstempels bei teilflächigen Stauchversuchen an Schaumbetonen mit variierendem Lastflächendurchmesser (links) und Zusammenhang zwischen Rohdichte und Grenzspannung bzw. Energieabsorption (rechts) [61].

Untersuchungen von Song & Lange ([62] und [63])

In [62] wurde das Stauchverhalten von Schaumbetonen untersucht, die gänzlich ohne Gesteinskörnung hergestellt wurden. Die angestrebten Rohdichten variierten zwischen rd. 400 und 800 kg/m³. Der Wasserzementwert wurde zwischen $w/z = 0,42$ und $0,47$ variiert. Das Stauchverhalten wurde an zylindrischen Probekörpern mit einem Durchmesser von 101,6 mm und einer Höhe von 203,2 mm untersucht. Während der Stauchversuche wurden die Proben in ihrer Schalung belassen. Durch die Umschnürung der Schalung wurde die Querdehnung der Proben behindert. Die Last wurde teilflächig über eine Stahlstange mit einem Durchmesser von 19,1 mm aufgebracht. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 75 mm/min. Der in [62] verwendete Versuchsaufbau ist in Abbildung 28 dargestellt.



Abbildung 28: Versuchsaufbau für teilflächige Stauchversuche mit Querdehnungsbehinderung aus [62].

In Abweichung zum idealisierten Spannungs-Stauchungsverhalten zellularer Werkstoffe (vgl. Abbildung 25, Abschnitt 2.3.2) stellte sich nach Überschreiten des elastischen Bereichs und vor Erreichen des Spannungsplateaus zunächst ein deutlicher Spannungszuwachs ein (Abbildung 29). Gegen Ende des plastischen Bereichs konnte zudem ein leichter Spannungsabfall festgestellt werden. Die Verfestigung deutete sich kurz vor Versuchsende bei einer Eindringtiefe des Druckstempels von ca. 180 mm ($\hat{=} \epsilon \approx 90 \%$) anhand des erneuten Spannungsanstiegs an.

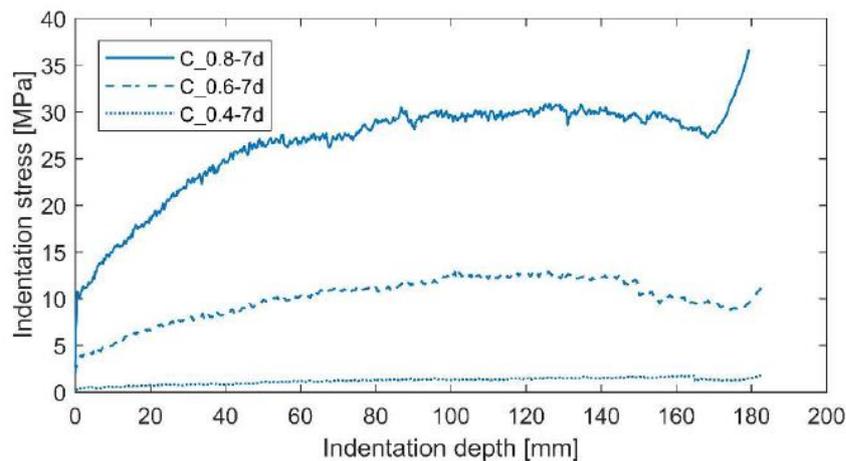


Abbildung 29: Spannung vs. Eindringtiefe des Druckstempels bei teilflächigen Stauchversuchen mit Querdehnungsbehinderung an Schaumbetonen (Betonalter: 7 Tage, Variation der Rohdichte zwischen rd. 400, 600 und 800 kg/m³) [62].

Aus einer Zunahme der Rohdichte resultierte eine deutliche Steigerung der Grenzspannung sowie der Spannungen im plastischen Bereich (vgl. Abbildung 29). Des Weiteren war der Spannungszuwachs im Übergangsbereich zwischen der Grenzspannung und dem Spannungsplateau umso größer, je höher die Rohdichte war. Die Länge des Übergangsbereichs nahm mit zunehmender Rohdichte tendenziell ab. Der Einfluss des Wasserzementwertes spielte innerhalb der untersuchten Grenzen eine untergeordnete Rolle in Bezug auf das Stauchverhalten der Schaumbetone [62].

Anhand von Schnittbildern der Proben nach verschiedenen Eindringtiefen des Druckstempels zeigten Song & Lange, dass sich ein konischer Bereich unterhalb der eingedrückten Lastfläche ausbildete, indem eine lokale Verdichtung des Materials vorlag (Abbildung 30). Dabei wurde mit zunehmender Eindringtiefe eine Ausbreitung des komprimierten Teilbereichs in Belastungsrichtung beobachtet. Auch quer zur Belastungsrichtung zeigte sich eine geringfügige Ausbreitung. Die Ausbildung bzw. Ausbreitung des komprimierten Teilbereichs führten Song & Lange als Ursache für den Spannungszuwachs im Übergangsbereich zwischen der Grenzspannung und dem Spannungsplateau an. Anhand der Schnittbilder konnte darüber hinaus abgeleitet werden, dass die Stauchung, ab der sich die Verfestigung einstellte, ungefähr der Stauchung entsprach, bei der der komprimierte Teilbereich die Unterkante der Probe erreichte.

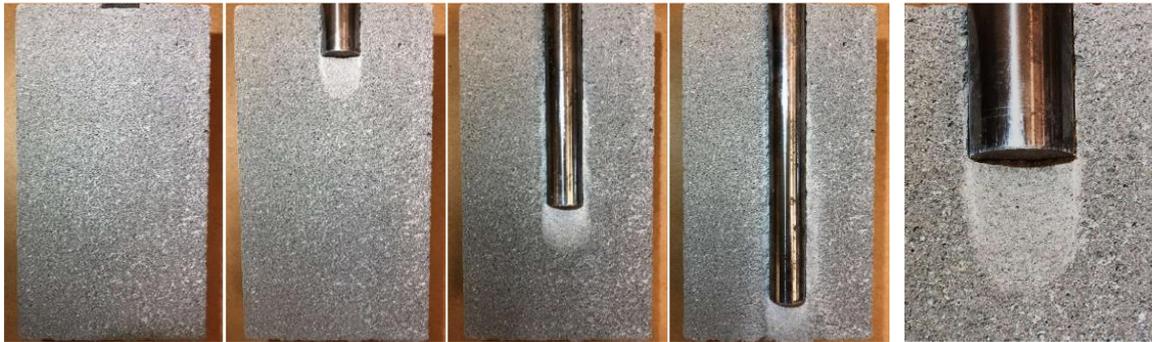


Abbildung 30: Schnittbilder von Proben nach verschiedenen Eindringtiefen des Druckstempels (links): Eindringtiefen (v.l.n.r.): 1, 30, 120 und 180 mm; Detailaufnahme des komprimierten Teilbereichs unterhalb der eingedrückten Lastfläche (rechts) [62].

In [63] untersuchten Song & Lange zudem den Einfluss der Sandpartikelgröße und des Sandgehaltes auf das Stauchverhalten von Schaumbeton mit einer Rohdichte von rd. 550 kg/m^3 . Die Sandpartikelgröße variierte zwischen $300 - 600 \mu\text{m}$, $600 - 850 \mu\text{m}$ und $850 - 1.180 \mu\text{m}$. Bezogen auf den Zementgehalt wurde der Sandgehalt zwischen 0, 15, 30 und 50 M.-% variiert. Aufgrund der angestrebten konstanten Rohdichte von 550 kg/m^3 ging die Erhöhung des Sandgehaltes mit einer Reduktion des Zementgehaltes einher. In die Untersuchungen wurden zudem Variationen des Betonalters (7, 14, 21 Tage) einbezogen. Die Stauchversuche wurden analog zu den Untersuchungen in [62] durchgeführt (Versuchsaufbau: vgl. Abbildung 28).

Den Kurvenverläufen (Spannung vs. Eindringtiefe des Druckstempels) in Abbildung 31 ist zu entnehmen, dass sich nach Überschreiten des elastischen Bereichs ein mäßiger, annähernd konstanter Spannungszuwachs bis zum Versuchsende (maximale Eindringtiefe von ca. 160 mm bzw. maximale Spannung von ca. $5,5 \text{ N/mm}^2$) einstellte. Die lokalen Unstetigkeiten der Kurven im plastischen Bereich führten Song & Lange auf die lokale Entstehung von Rissen innerhalb der Proben zurück. Der Verfestigungsbereich wurde in den Stauchversuchen offensichtlich nicht erfasst.

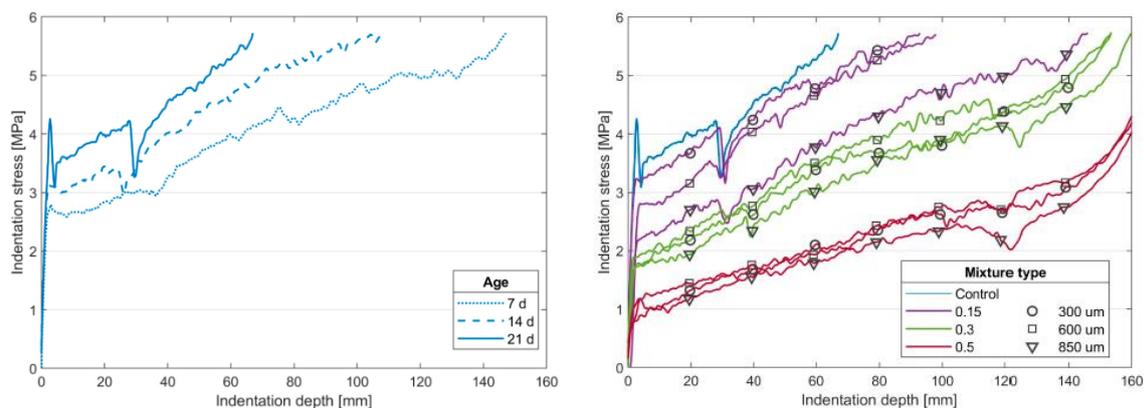


Abbildung 31: Spannung vs. Eindringtiefe des Druckstempels bei teilflächigen Stauchversuchen mit Querdehnungsbehinderung an Schaumbetonen: Einfluss des Betonalters (links), Einfluss des Sandgehaltes und der Sandpartikelgröße (rechts) [63].

In Abbildung 31 (links) ist der Einfluss des Betonalters anhand des Betons ohne Sandanteil („Control“) dargestellt. Mit zunehmendem Betonalter konnte eine Steigerung der Grenzspannung sowie des Spannungsniveaus im plastischen Bereich festgestellt werden. Dies wurde auf die mit zunehmendem Betonalter zunehmende Festigkeit zurückgeführt. Der mittlere Spannungszuwachs der Kurven im plastischen Bereich blieb dabei jedoch nahezu unverändert.

Eine gegenläufige Tendenz ist in Abbildung 31 (rechts) hinsichtlich des Einflusses des Sandgehaltes zu erkennen. Die Erhöhung des Sandgehaltes („Control“ = 0 M.-%, „0,15“ = 15 M.-%, „0,30“ = 30 M.-%, „0,50“ = 50 M.-%) führte aufgrund der damit einhergehenden Reduktion des Zementgehaltes zu einer Abminderung der Festigkeit. Dementsprechend nahmen die Grenzspannung und das Spannungsniveau im plastischen Bereich mit zunehmendem Sandgehalt ab.

Der Einfluss der Sandpartikelgröße („300 μm “ = 300 – 600 μm , „600 μm “ = 600 – 850 μm , „850 μm “ = 850 – 1180 μm) war vergleichsweise geringer ausgeprägt, nahm jedoch mit steigendem Sandgehalt zu. Tendenziell führte eine höhere Sandpartikelgröße ebenfalls zu einer Abnahme der Grenzspannung sowie des Spannungsniveaus im plastischen Bereich (vgl. Abbildung 31, rechts).

3.1.3 Stauchverhalten von faserverstärkten Schaumbetonen

Untersuchungen von Guo et al. ([64])

Gegenstand der Untersuchungen in [64] war das Stauchverhalten von Schaumbetonen mit Polystyrolfasern. Die Betone wiesen eine sehr geringe Rohdichte zwischen 200 und 370 kg/m^3 auf. Das Stauchverhalten wurde an zylindrischen Probekörpern mit einem Durchmesser von 80 mm und einer Höhe von 60 mm untersucht. Die Stauchversuche erfolgten ohne Querdehnungsbehinderung unter Vollflächenbelastung. Neben der Betonrohichte wurde auch die Stauchrate zwischen 0,1 und 0,001 s^{-1} variiert. Bezogen auf die Ausgangshöhe der Proben ($h_0 = 60 \text{ mm}$) entspricht dies einer Belastungsgeschwindigkeit zwischen 3,6 und 360 mm/min .

Grundsätzlich lassen sich die in [64] ermittelten Spannungs-Stauchungskurven (Abbildung 32) analog zum idealisierten Spannungs-Stauchungsverhalten zellulärer Werkstoffe in die drei charakteristischen Bereiche (elastischer Bereich, plastischer Bereich, Verfestigungsbereich) unterteilen (vgl. Abbildung 25, Abschnitt 2.3.2). Besonders auffällig ist jedoch, dass die Spannungen im plastischen Bereich (ausgehend von der Grenzspannung) kontinuierlich abfielen. Betrachtet man die gestauchten Proben in Abbildung 32 (links), so war der Spannungsabfall im plastischen Bereich mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die makroskopischen Schädigungen infolge der enormen Stauchung sowie der damit einhergehenden Querdehnung der Proben zurückzuführen. Etwas verwunderlich ist, dass sich ab einer Stauchung von ca. 70 % (für $\rho = 200 \text{ kg}/\text{m}^3$), trotz der bereits stark fortgeschrittenen Schädigung der Proben, eine deutliche Verfestigung in Form eines steilen Spannungsanstiegs einstellte. Mögliche Ursachen für dieses Verhalten werden in [64] nicht diskutiert, sodass diesbezüglich nur Vermutungen angestellt werden können.

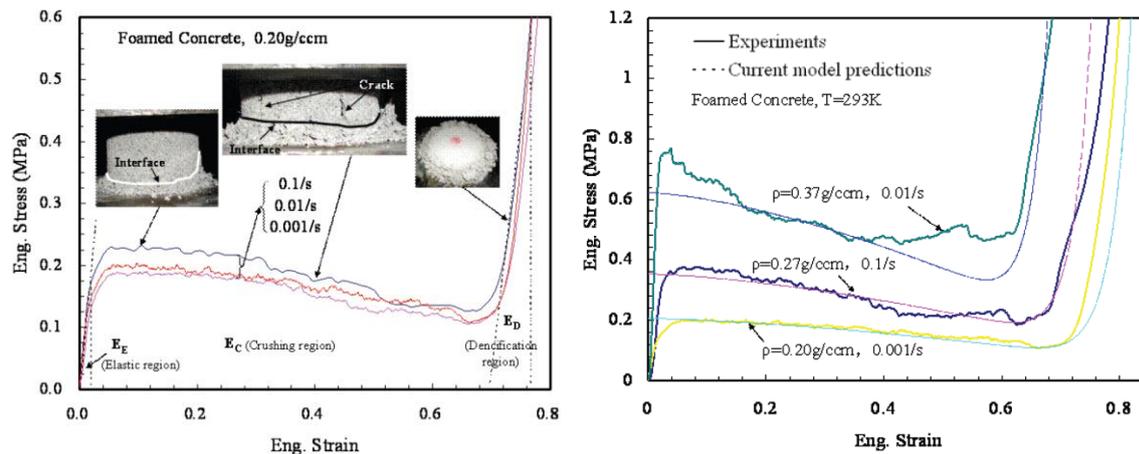


Abbildung 32: Spannungs-Stauchungskurven aus vollflächigen Stauchversuchen an faserverstärkten Schaumbetonen [64]: Einfluss der Stauchrate (links), Einfluss der Rohdichte und Stauchrate (rechts).

Offenbar führte die relativ geringe Probenschlankheit ($h/D = 0,75$) dazu, dass ein ganzheitliches Versagen in Form eines Auseinanderbrechens bzw. Zerbröselns des Betons ausschließlich in den äußeren Randbereichen der Proben stattfand (vgl. Abbildung 32, links). Weiter „innen“ wurde die Querdehnung durch das nach „außen“ anstehende Probenmaterial sowie durch Reibungseffekte an der Ober- und Unterseite (Lasteinleitungs- bzw. Aufstandsfläche) der Proben behindert. In diesem inneren Bereich der Proben führte die Querdehnungsbehinderung folglich zu einer Materialverdichtung und somit zu dem beobachteten Verfestigungseffekt. Neben der geringen Probenschlankheit könnte auch die Faserbewehrung einen Zusammenhalt der Probe im inneren Bereich begünstigt haben. Inwiefern das Stauchverhalten durch die Polystyrolfasern beeinflusst wurde, geht aus den Untersuchung in [64] allerdings nicht eindeutig hervor.

Wie in Abbildung 32 (links) zu erkennen ist, hatte die Stauchrate bzw. Belastungsgeschwindigkeit einen eher geringen Einfluss auf das Spannungs-Stauchungsverhalten. Tendenziell verliefen die Spannungs-Stauchungskurven mit zunehmender Stauchrate jedoch auf einem etwas höheren Spannungsniveau. Wesentlich größer war der Einfluss der Betonrohddichte [64] (Abbildung 32, rechts). Die Erhöhung der Rohddichte führte zu einer Zunahme der Grenzspannung und des Spannungsniveaus im plastischen Bereich. Des Weiteren nahm die Stauchung, ab der eine deutliche Verfestigung eintrat, mit zunehmender Rohddichte ab.

Die Ergebnisse der Stauchversuche nutzten *Guo et. al.* zur Validierung eines analytischen Modells, das zur Prognose der Spannungen im plastischen Bereich und im Verfestigungsbereich in Abhängigkeit der Rohddichte und Stauchrate entwickelt wurde (vgl. [64]). In Abbildung 32 (rechts) ist eine gute Übereinstimmung zwischen den analytisch und experimentell ermittelten Spannungs-Stauchungskurven zu erkennen.

Untersuchungen von Amirrasouli ([65])

In [65] lag der Fokus der experimentellen Untersuchungen auf dem Stauchverhalten faserverstärkter Schaumbetone mit einer Rohdichte zwischen rd. 600 und 1.000 kg/m³. Als Fasern wurden Polypropylen-Fasern (PP-Fasern) und Polyvinylalkohol-Fasern (PVA-Fasern) eingesetzt. Neben Variationen der Rohdichte wurden in [65] auch Variationen der Versuchsrandbedingungen in die Untersuchungen einbezogen. Dabei wurden zum einen vollflächige Stauchversuche ohne Querdehnungsbehinderung durchgeführt, bei denen die Probenschlankheit variiert wurde. Zum anderen wurden teilflächige Stauchversuche mit Querdehnungsbehinderung unter Variation der Laststempelgeometrie durchgeführt.

Unter Vollflächenbelastung (Belastungsgeschwindigkeit: 1,2 mm/min) ohne Querdehnungsbehinderung zeigten die faserverstärkten Schaumbetone prinzipiell das für zelluläre Werkstoffe typische Spannungs-Stauchungsverhalten (Abbildung 33). Die Grenzspannung stieg mit zunehmender Rohdichte an und lag zwischen ca. 1,8 und 8 N/mm². Nach Überschreiten des elastischen Bereichs war zunächst eine geringe aber kontinuierliche Spannungsabnahme zu erkennen. Mit zunehmender Stauchung gingen die Spannungs-Stauchungskurven dann allmählich in den Verfestigungsbereich über. Die Stauchung, bei der die Verfestigung einsetzte, nahm dabei mit zunehmender Rohdichte ab.

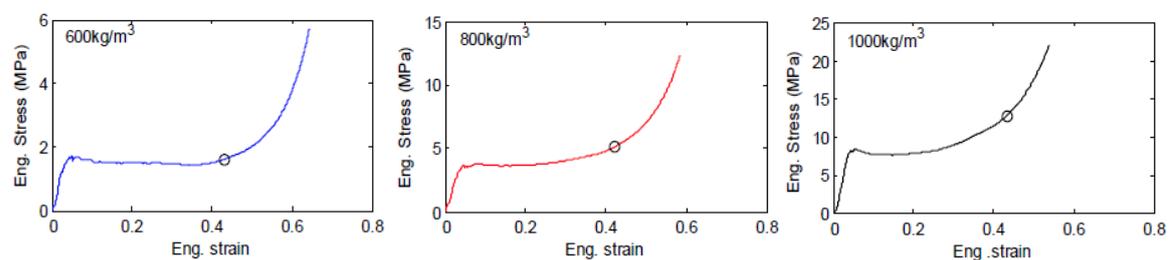


Abbildung 33: Spannungs-Stauchungskurven aus vollflächigen Stauchversuchen an faserverstärkten Schaumbetonen: Einfluss der Betonrohddichte (v.l.n.r.: $\rho = 600, 800, 1.000 \text{ kg/m}^3$) [65].

Wie anhand von Fotos der gestauchten Proben (Zylinder mit $h/D = 0,5$) nach verschiedenen Stauchungsstufen (Abbildung 34) erkenntlich wird, stellte sich mit zunehmender Stauchung und der damit einhergehenden Querdehnung eine sukzessive Schädigung der Proben ein. Neben einer Rissbildung und -ausbreitung in Belastungsrichtung sind in Abbildung 34 Abplatzungen sowie ein Auseinanderbrechen bzw. Zerbröseln des Materials in der Randzone der Proben zu erkennen. Den Spannungsabfall im plastischen Bereich führte Amirrasouli maßgeblich auf diese Schädigungen zurück. Als Begründung für den erneuten Spannungsanstieg (Verfestigungsbereich) wird in [65] die geringe Probenschlankheit genannt, die ähnlich wie bei den Untersuchungen von Guo et al. ([64]) dazu führte, dass das Auseinanderbrechen der Proben ausschließlich in den randnahen Zonen stattfand. Den Zusammenhalt der Proben im inneren Bereich führte Amirrasouli neben der geringen Probenschlankheit auch auf die Faserwirkung zurück. Inwiefern sich die Fasern in der stark porösen Matrix überhaupt entwickeln konnten, bleibt jedoch fraglich.

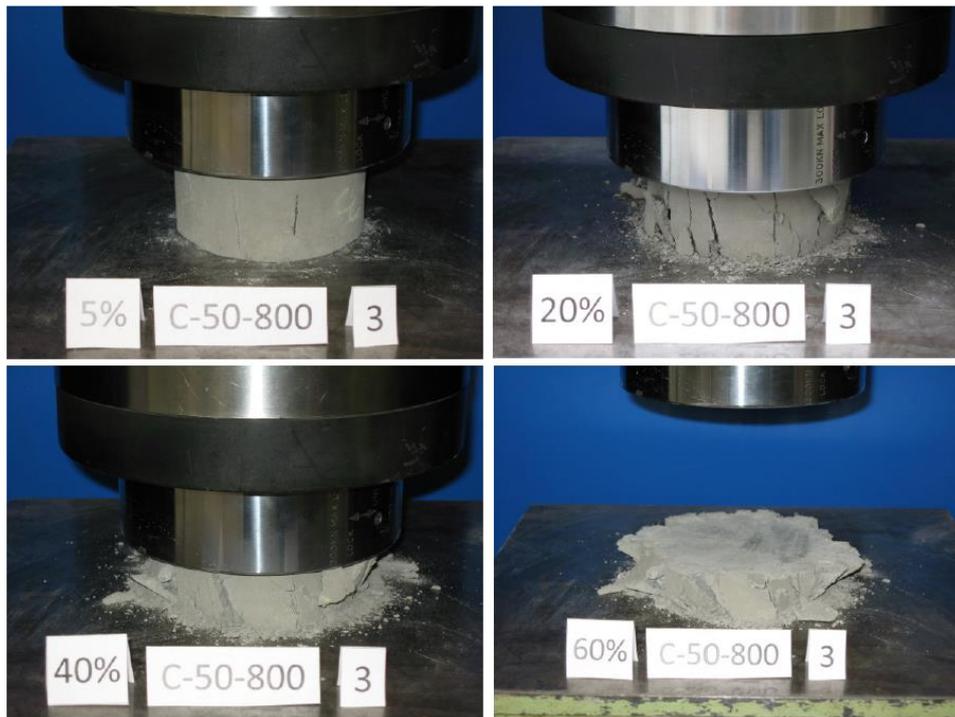


Abbildung 34: Fotos von vollflächig belasteten Proben nach verschiedenen Stauchungsstufen [65].

Um den Einfluss der Probenschlankheit auf das Stauchverhalten (unter Vollflächenbelastung und ohne Querdehnungsbehinderung) genauer zu untersuchen, führte *Amirrasouli* Stauchversuche an zylindrischen Probekörpern mit variierenden Abmessungen durch (Abbildung 35, links). Das Spannungs-Stauchungsverhalten von Proben mit einer Schlankheit von $h/D = 1,0$ („ $d/h = 1$ “), $0,5$ („ $d/h = 2$ ““) und $0,25$ („ $d/h = 4$ “) ist in Abbildung 35 (rechts) dargestellt. Wie darin zu erkennen ist, war der Spannungsabfall im plastischen Bereich umso ausgeprägter, je schlanker die Probe war. Zudem setzte die Verfestigung mit zunehmender Probenschlankheit erst bei größeren Stauchungen ein. Eine konsistente Begründung für dieses Verhalten wird in [65] jedoch nicht angegeben.

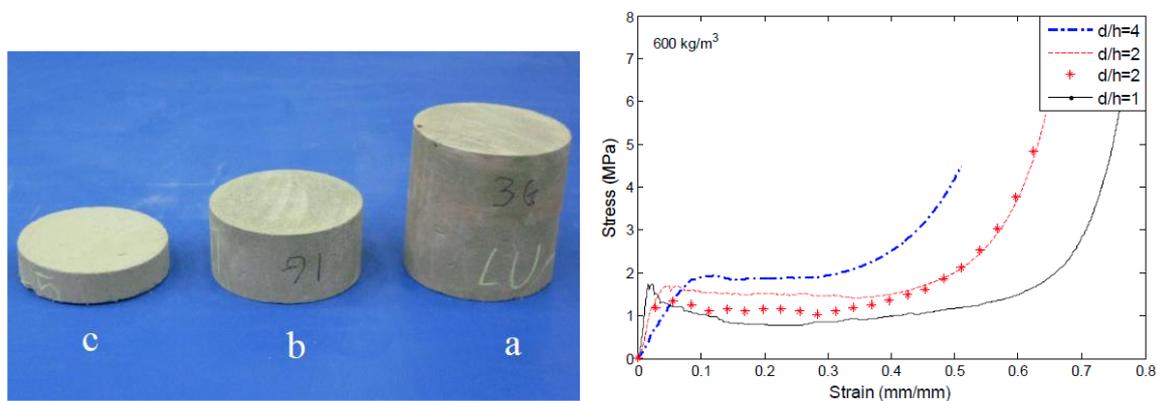


Abbildung 35: Probekörper mit variierender Schlankheit (links) und Spannungs-Stauchungskurven aus vollflächigen Stauchversuchen unter Variation der Probenschlankheit (rechts) [65].

In Ergänzung zu den vollflächigen Stauchversuchen ohne Querdehnungsbehinderung wurden in [65] teilflächige Stauchversuche mit Querdehnungsbehinderung durchgeführt. Die dabei verwendeten Würfelproben mit einer Kantenlänge von 100 mm wurden während der Stauchversuche in ihrer Schalung belassen (Abbildung 36, links). Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 1,5 mm/min. In die Untersuchungen wurden verschiedene Laststempelkonfigurationen (Abbildung 36, rechts) einbezogen.

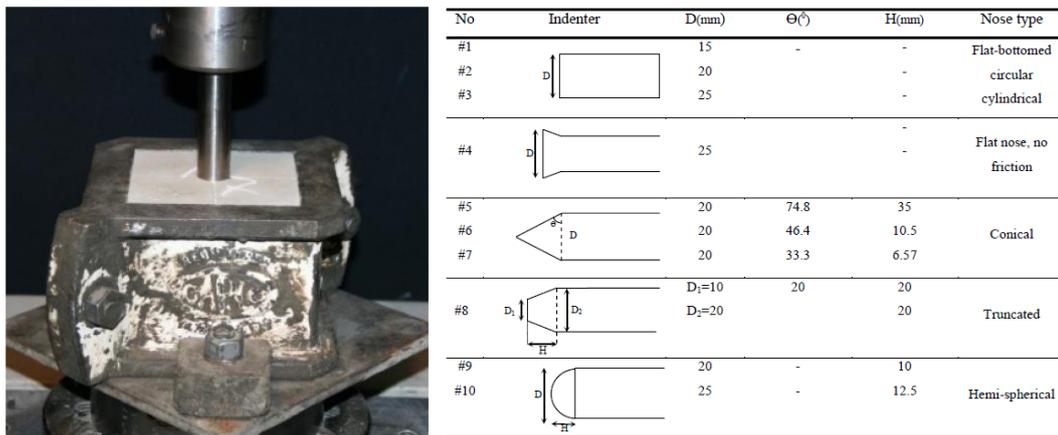


Abbildung 36: Versuchsaufbau für teilflächige Stauchversuche mit Querdehnungsbehinderung (links) und untersuchte Laststempelkonfigurationen (rechts) [65].

Die Kraft-Verschiebungskurven (hier: Verschiebung \cong Eindringtiefe des Druckstempels), die unter Verwendung von zylindrischen Laststempeln mit einer ebenen Kontaktfläche sowie variierenden Durchmessern von 15 mm („#1“), 20 mm („#2“) und 25 mm („#3“) ermittelt wurden, sind in Abbildung 37 (links) dargestellt.

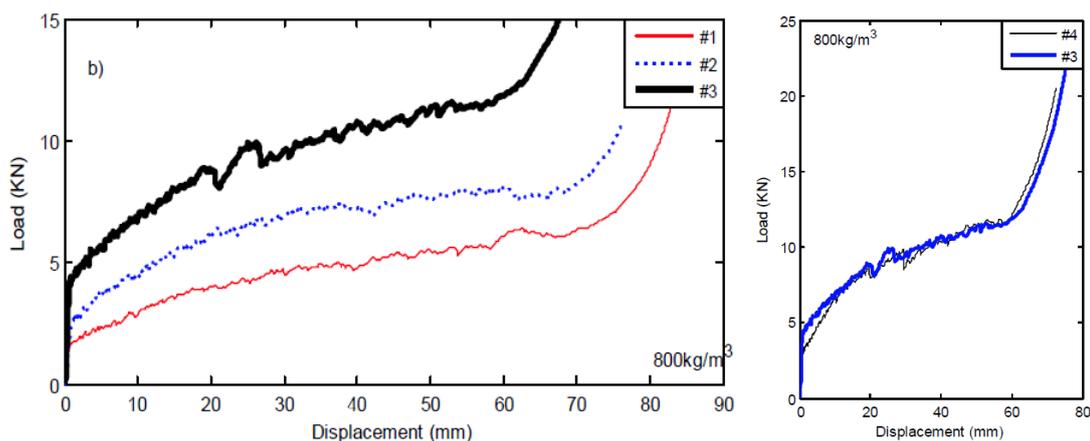


Abbildung 37: Kraft vs. Eindringtiefe des Druckstempels bei teilflächigen Stauchversuchen an faserverstärktem Schaumbeton: Einfluss der Lastflächengröße (links) und Einfluss der Mantelreibung (rechts) [65].

Nach Überschreiten des elastischen Bereichs waren die Kraft-Verschiebungskurven durch einen vergleichsweise mäßigen, aber dennoch deutlichen Anstieg charakterisiert. Global betrachtet war

im plastischen Bereich ein degressiver Kurvenverlauf zu erkennen. Die Zunahme des Laststempeldurchmessers führte in diesem Bereich zu höheren absoluten Kräften sowie zu einem größeren Kraftzuwachs. Des Weiteren war die Eindringtiefe (und damit Stauchung), ab der eine signifikante Verfestigung auftrat, umso geringer, je größer der Laststempeldurchmesser war.

Ein Vergleich zwischen den Kraft-Verschiebungskurven mit den Stempelkonfigurationen „#3“ und „#4“ (vgl. Abbildung 37, rechts) zeigt, dass Reibungseffekte beim Eindringen des Laststempels in die Probe unter den in [65] vorliegenden Versuchsrandbedingungen keinen wesentlichen Einfluss auf das Stauchverhalten hatten.

In Übereinstimmung mit den Untersuchungen von *Song & Lange* [62] (vgl. auch Abbildung 30) zeigte *Amirrasouli* anhand von röntgentomografischen Aufnahmen von teilflächig belasteten Proben nach verschiedenen Eindringtiefen, dass sich ein komprimierter Teilbereich unterhalb der eingedrückten Lastfläche ausbildete (Abbildung 38). Mit zunehmender Eindringtiefe stellte *Amirrasouli* eine degressiv zunehmende Ausbreitung des komprimierten Teilbereichs in Belastungsrichtung fest (Abbildung 39).

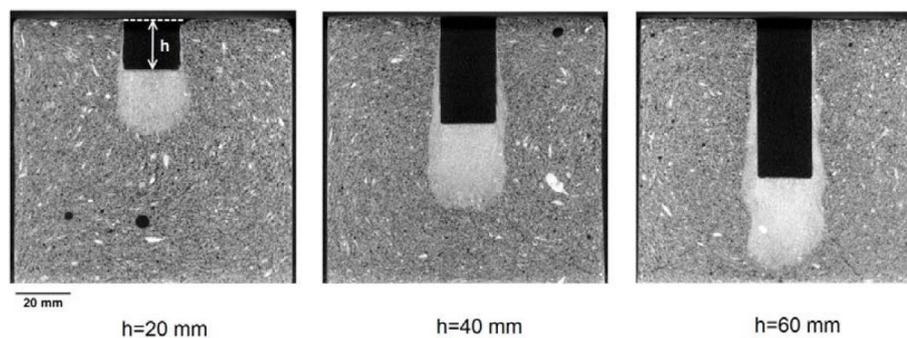


Abbildung 38: Röntgentomografische Aufnahmen von teilflächig gestauchten Proben nach verschiedenen Eindringtiefen des Druckstempels [65].

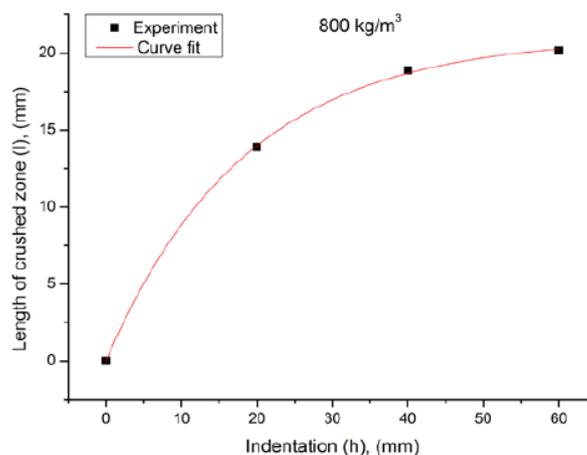


Abbildung 39: Zusammenhang zwischen der Eindringtiefe des Laststempels („Indentation (h)“) und Höhe des komprimierten Teilbereichs unterhalb der eingedrückten Lastfläche („Length of crushed zone (l)“) [65].

3.1.4 Stauchverhalten von Leichtbetonen mit EPS

Untersuchungen der BAM ([66-74])

Das Stauchverhalten von Leichtbeton mit einem hohen Gehalt an EPS-Perlen („Dämpferbeton“) wurde von der *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)* in [66-74] untersucht. Der Beton wurde von der Firma HOCHTIEF AG speziell für die Anwendung bei Stoßdämpferelementen bzw. -fundamenten konzipiert, die zum Schutz von Transport- und Lagerbehältern für Gefahrstoffe eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 3.2). Anhand der in Abbildung 40 dargestellten Gefügestruktur des untersuchten Betons sind die in der Matrix eingebetteten und mehr oder weniger homogen verteilten EPS-Perlen mit einem maximalen Durchmesser von ca. 1,5 mm zu erkennen. Die Rohdichte des Betons betrug ca. 800 kg/m³, die einachsige Druckfestigkeit ca. 6 N/mm².

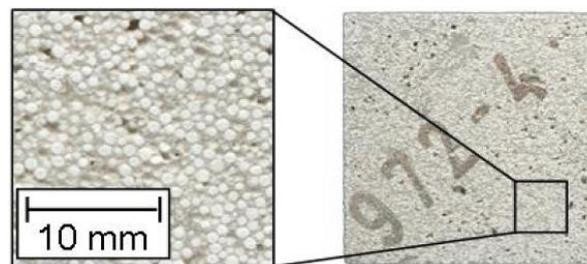


Abbildung 40: Gefüge von „Dämpferbeton“ mit einem hohen Gehalt an EPS-Perlen ($\varnothing \approx 1,5$ mm) [68-71].

Im Rahmen des Versuchsprogramms wurden unter anderem Stauchversuche an Würfelproben (Kantenlänge: 100 mm) mit bzw. ohne vollständige Querdehnungsbehinderung durchgeführt (Abbildung 41, links). Die Last wurde vollflächig aufgebracht. Bei den Versuchen mit Querdehnungsbehinderung wurde die Belastungsgeschwindigkeit zwischen 0,02 mm/s und 3.000 mm/s variiert. Der Einfluss der Querdehnungsbehinderung und der Belastungsgeschwindigkeit auf das Spannungs-Stauchungsverhalten sind in Abbildung 41 (rechts) dargestellt.

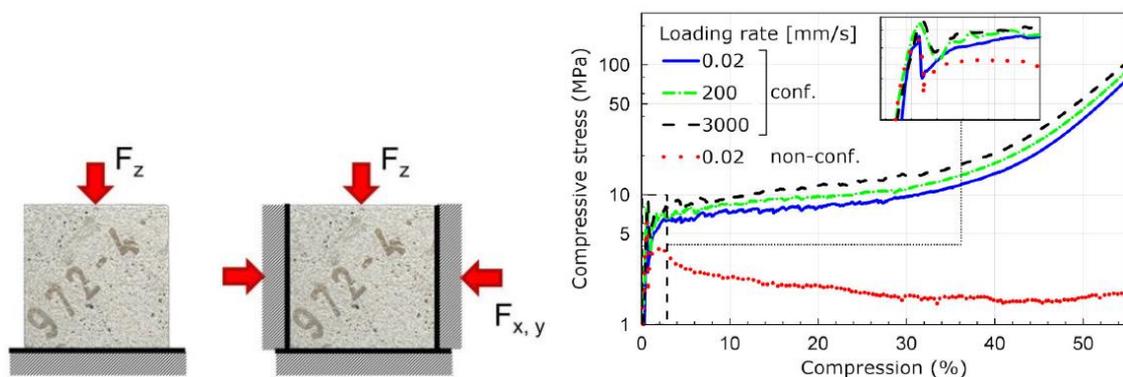


Abbildung 41: Schematische Darstellung der Stauchversuche mit bzw. ohne vollständige Querdehnungsbehinderung [70, 72] (links), Einfluss der Querdehnungsbehinderung und der Belastungsgeschwindigkeit auf das Spannungs-Stauchungsverhalten [72] (rechts).

Mit Querdehnungsbehinderung („conf.“) wurde ein Spannungs-Stauchungsverhalten beobachtet, das prinzipiell dem von zellularen Werkstoffen entspricht (vgl. Abbildung 25, Abschnitt 2.3.2). Allerdings waren die Spannungs-Stauchungskurven nach Überschreiten der Grenzspannung zunächst durch einen abrupten Spannungsabfall gekennzeichnet. Des Weiteren war mit zunehmender Stauchung im plastischen Bereich ein zwar mäßiger, aber kontinuierlicher Spannungszuwachs zu erkennen. Aufgrund der zunehmenden Verdichtung fand ab einer Stauchung von ca. 40 % der Übergang in den Verfestigungsbereich statt.

Qualitativ waren unter Variation der Belastungsgeschwindigkeit keine Abweichungen zwischen den Spannungs-Stauchungskurven festzustellen. In Übereinstimmung mit den Untersuchungen in [64] war mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit jedoch eine leichte Steigerung der Grenzspannung sowie der Spannungen im plastischen Bereich und im Verfestigungsbereich zu erkennen (vgl. Abbildung 41, rechts).

Für das Spannungs-Stauchungsverhalten ohne Querdehnungsbehinderung („non-conf.“) lagen im elastischen Bereich zunächst keine wesentlichen Abweichungen im Vergleich zum Spannungs-Stauchungsverhalten mit Querdehnungsbehinderung vor. Bei gleicher Belastungsgeschwindigkeit (0,02 mm/s) waren die Grenzspannungen annähernd identisch. Nach Überschreiten des elastischen Bereichs war die Spannungs-Stauchungskurve ohne Querdehnungsbehinderung jedoch durch einen kontinuierlichen Spannungsabfall charakterisiert (vgl. Abbildung 41, rechts), der gemäß den Erläuterungen in [72] mit einem ganzheitlichen Versagen der Probe einherging.

Neben vollflächigen Stauchversuchen wurden auch teilflächige Stauchversuche in einer steifen Probenhalterung (d. h. mit Querdehnungsbehinderung) durchgeführt (Abbildung 42, links). Durch verschiedene Konfiguration des Laststempels (Abbildung 42, rechts) wurden Einflüsse durch die Laststempelgeometrie sowie durch Reibungseffekte (Mantelreibung zwischen dem Laststempel und der Probe) untersucht [68, 70].

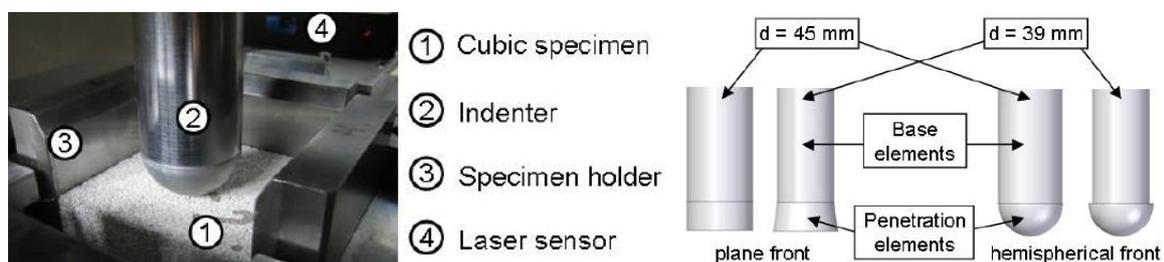


Abbildung 42: Foto des Versuchsaufbaus für teilflächige Stauchversuche mit Querdehnungsbehinderung (links) und untersuchte Laststempelkonfigurationen (rechts) [68].

Im Falle einer teilflächigen Belastung durch den Laststempel mit einer ebenen Kontaktfläche („plane front“) wurde ein Stauchverhalten detektiert, das ebenfalls durch die drei charakteristischen Stauchbereiche gekennzeichnet war (Abbildung 43, links). Ähnlich wie bei den vollflächigen Stauchversuchen stellte sich im plastischen Bereich ein mäßiger und kontinuierlicher Kraftanstieg ein. Für die Konfiguration des Laststempels mit einer halbkugelförmigen Geometrie („hemisp.

front“) war bei Belastungsbeginn ein deutlich flacherer Verlauf der Kraft-Verschiebungskurve (hier: Verschiebung \triangleq Eindringtiefe des Druckstempels) festzustellen (Abbildung 43, links). Ein eindeutiger Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich war dabei nicht zu erkennen. Bei einer Eindringtiefe zwischen ca. 15 und 55 mm waren die Kurvenverläufe unabhängig von der Laststempelgeometrie annähernd identisch. Im daran anschließenden Bereich setzte die Verfestigung bei dem Laststempel mit einer ebenen Kontaktfläche jedoch deutlich eher (d. h. bei einer geringeren Eindringtiefe) ein.

Der Einfluss der Mantelreibung, die bei den Stauchversuchen in Abhängigkeit der Laststempelkonfiguration unter Teilflächenbelastung generiert wurde, ist in Abbildung 43 (rechts) dargestellt. Während beim Eindringen des Laststempels mit der Konfiguration „plane front, d = 39 mm“ (vgl. Abbildung 42, rechts) keine Mantelreibung aktiviert wurde, nahm diese beim Laststempel mit der Konfiguration „plane front, d = 45 mm“ (vgl. Abbildung 42, rechts) mit zunehmender Eindringtiefe zu. Bis zu einer Eindringtiefe von ca. 20 mm war die Mantelreibung jedoch offensichtlich so gering, dass keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Kraft-Verschiebungskurven vorlagen. Mit zunehmender Eindringtiefe führte die zunehmende Mantelreibung bei der Laststempelkonfiguration „plane front, d = 45 mm“ jedoch zu einem etwas steileren Kurvenanstieg.

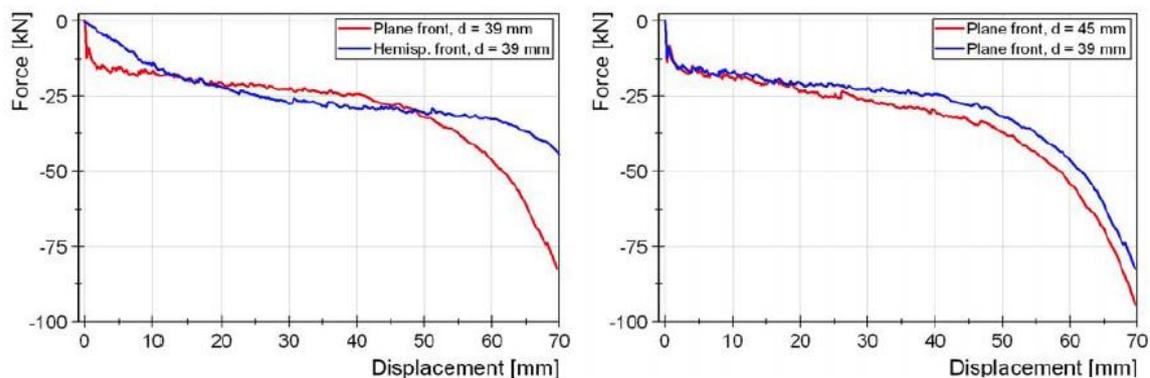


Abbildung 43: Einfluss der Laststempelgeometrie (links) und der Mantelreibung (rechts) auf das Kraft-Eindringverhalten bei teilflächigen Stauchversuchen mit Querdehnungshinderung [68].

3.2 Anwendungsgebiete

Betone und betonähnliche zementgebundene Materialien, die aufgrund einer hohen Materialporigkeit ein ausgeprägtes plastisches Stauchvermögen aufweisen, kommen in verschiedenen besonderen Anwendungsbereichen zum Einsatz. Die Anwendungen lassen sich hinsichtlich der Beanspruchung sowie der angestrebten funktionalen Aufgabe der Materialien in zwei übergeordnete Gruppen einteilen. Zum einen handelt es sich um Anwendungen, bei denen relativ langsam auftretende Verformungen infolge einer quasi-statischen Beanspruchung durch das plastische Stauchvermögen lastneutral kompensiert werden sollen. Zum anderen wird das plastische Stauchvermögen solcher Materialien bei Anwendungen genutzt, die auf eine Energieabsorption bei dynamischen bzw. stoß- oder explosionsartigen Beanspruchungen abzielen. Nachfolgend werden einige konkrete Anwendungsfälle beispielhaft beschrieben.

Kompensation von Gebirgsverformungen im Tunnel- und Bergbau

In speziellen Anwendungsfällen im Bereich des Tunnel- und Bergbaus werden zementgebundene Materialien mit einem ausgeprägten plastischen Stauchvermögen zur Realisierung eines verformungsfähigen Ausbaus eingesetzt [75-87]. Durch das plastische Stauchvermögen werden Gebirgsverformungen, wie sie bei quellfähigem bzw. druckhaftem Gebirge über längere Zeiträume auftreten können, kontrolliert zugelassen und die auf den tragenden Teil des Ausbaus wirkenden Belastungen reguliert [84, 88]. Das Funktionsprinzip eines verformungsfähigen Ausbaus ist in Abbildung 44 veranschaulicht. Dargestellt sind die qualitativen Verläufe einer typischen Gebirgskennlinie für druckhaftes Gebirge sowie der Kennlinien eines steifen und eines verformungsfähigen Ausbaus. Im Falle eines steifen Ausbaus stellt sich bereits bei geringen Gebirgsverformungen ein hoher Gebirgsdruck ein, dem mit einem entsprechend hohen Ausbauwiderstand begegnet werden muss. Bei einem verformungsfähigen Ausbau wird der Gebirgsdruck durch das Plastifizieren des stauchfähigen Materials hingegen über einen großen Verformungsbereich begrenzt, sodass ein wesentlich geringerer Ausbauwiderstand erforderlich wird.

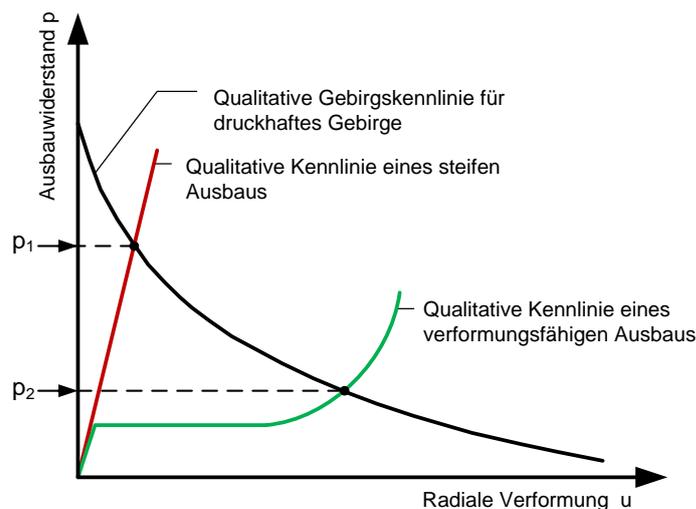


Abbildung 44: Funktionsprinzip eines verformungsfähigen Ausbaus (qualitative Verläufe der Ausbaukennlinien) nach [76, 84].

Beim konventionellen Tunnelbau in Spritzbetonbauweise kann ein verformungsfähiger Ausbau durch stauchfähige Betonelemente realisiert werden, die in sogenannten Deformationsschlitzten der Spritzbetonschale eingebaut werden (Abbildung 45, links). Eine bekannte Systemlösung für diesen Anwendungsfall wurde von der Firma Solexperts AG entwickelt und ist unter der Bezeichnung hiDCon (High Deformable Concrete) bekannt [75, 77, 78, 80]. Das plastische Stauchvermögen von hiDCon-Elementen wird unter anderem durch die Verwendung sehr poröser leichter Gesteinskörnungen (z. B. Blähglas) erzielt. Um einen Zusammenhalt der Elemente auch bei großen Stauchungen zu gewährleisten, werden diese in der Regel mit Bewehrungseinlagen (Platten-/Ringbewehrung) oder Faserbewehrung hergestellt [75]. Das Spannungs-Stauchungsverhalten von quaderförmigen hiDCon-Elementen mit verschiedenen (nicht genauer bekannten) Material- und Bewehrungskonfigurationen ist in Abbildung 45 (rechts) dargestellt.

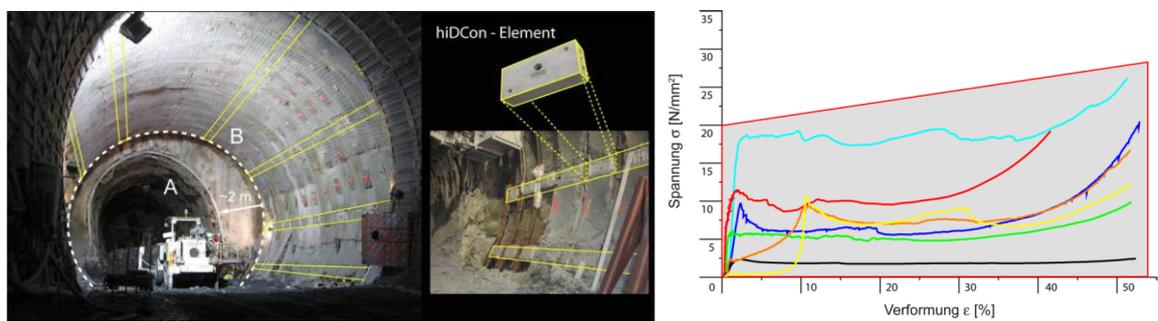


Abbildung 45: Stauchfähige Betonelemente (hiDCon) in einer Spritzbetonschale (links) und Spannungs-Stauchungsverhalten von hiDCon-Elementen mit verschiedenen Material- und Bewehrungskonfigurationen (rechts) [75].

In einem ähnlichen Anwendungsfall wurde hiDCon auch bereits in Form von Fundations- und Ankerenlementen eingesetzt, um Gebirgsdrücke auf die Tunnelsohle und daraus resultierende Sohlhebungen zu reduzieren [75, 77] (Abbildung 46).

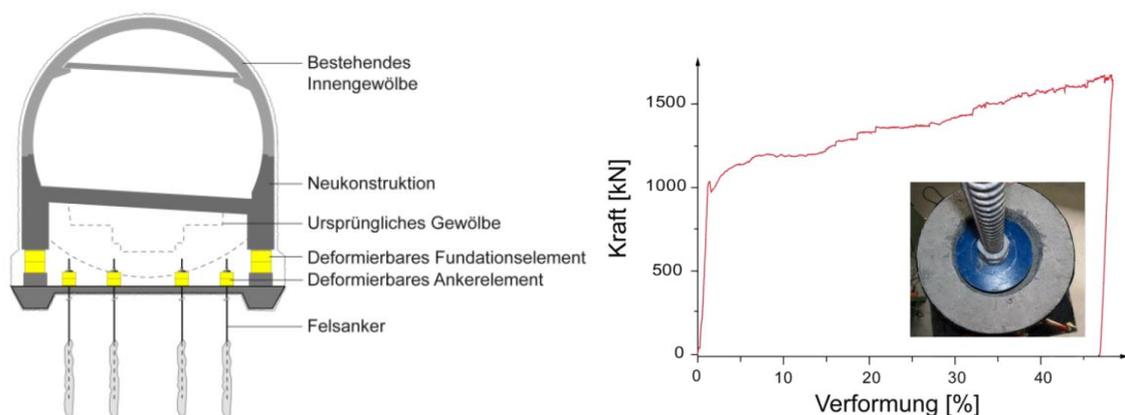


Abbildung 46: Anwendung von hiDCon als Fundations- bzw. Ankerenlemente im Bereich einer Tunnelsohle (links) und Kraft-Stauchungskurve eines Ankerenlements aus hiDCon (rechts) [75, 77].

Im maschinellen Tunnelbau können stauchfähige zementgebundene Materialien auf der gebirgszugewandten Seite der Tübbingauskleidung in Form von Ringspaltmörtel oder einer zusätzlichen Stauchschiicht angeordnet werden [76, 85-87, 89] (Abbildung 47).

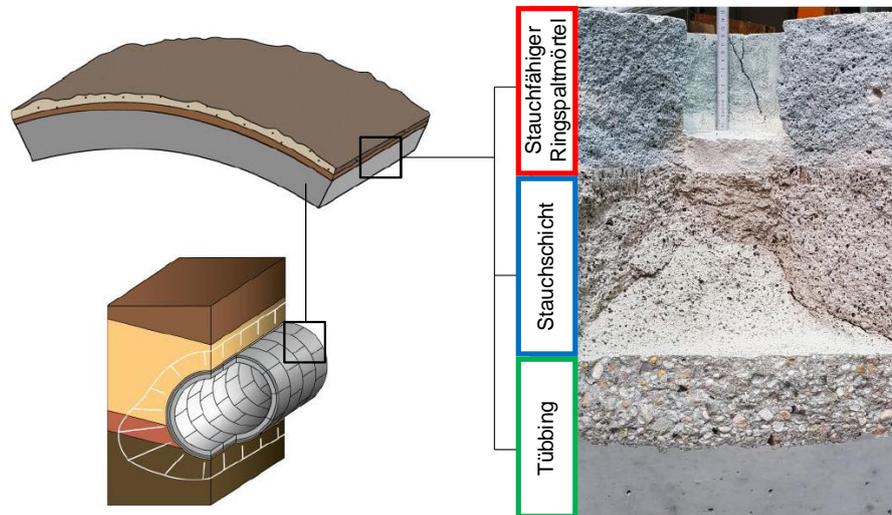


Abbildung 47: Schematische Darstellung eines verformungsfähigen Tunnelausbaus in Tübbingbauweise mit stauchfähigem Ringspaltmörtel und zusätzlicher Stauchschiicht, Abb. modifiziert nach [85, 86].

Ringspaltmörtel mit einem ausgeprägten plastischen Stauchvermögen wurden unter anderem durch das sogenannte Compex-Support-System [82] bekannt. Die Firma HOCHTIEF AG entwickelte Ringspaltmörtel mit ähnlichen Materialeigenschaften unter der Bezeichnung DeCo-Grout [76]. Im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereichs SFB 837 an der Ruhr-Universität Bochum wurden ebenfalls intensive Forschungsarbeiten zu stauchfähigen Ringspaltmörteln betrieben (siehe u. a. [85, 86, 90]). Die Porosierung solcher Ringspaltmörtel erfolgt durch die Beimischung von EPS-Perlen und stark lufteintragender Zusatzmittel [76, 82]. Das Spannungs-Stauchungsverhalten von stauchfähigen Ringspaltmörteln ist beispielhaft in Abbildung 48 dargestellt.

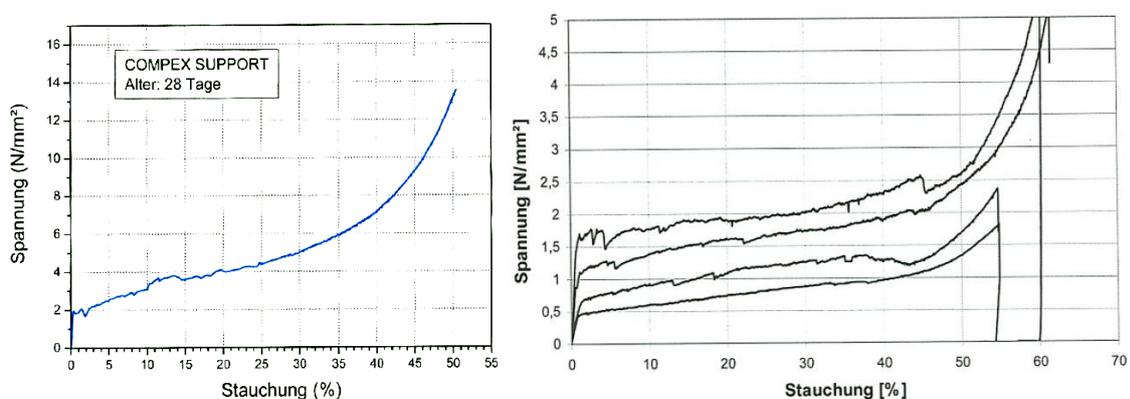


Abbildung 48: Spannungs-Stauchungskurven von stauchfähigen Ringspaltmörteln: Compex-Support-System [82] (links), DeCo-Grout [76] (rechts).

Schutzsysteme gegen stoß- und explosionsartige Beanspruchungen

Aufgrund ihres hohen Energieabsorptionsvermögens kommen stauchfähige zementgebundene Materialsysteme in verschiedenen Anwendungsbereichen zum Einsatz, die zum Schutz gegen stoß- oder explosionsartige Beanspruchungen dienen.

Zum Schutz von Behältern für Gefahrstoffen während eines Transports werden die Behälter in der Regel mit Stoßdämpferelementen ausgestattet [91, 92] (Abbildung 49, links). In Lagerstätten oder auf Verladeplätzen (beispielsweise in kerntechnischen Anlagen) werden die Stoßdämpferelemente aus platztechnischen Gründen häufig auf dem Boden platziert bzw. als Stoßdämpferfundamente in den Boden eingelassen [70, 91, 92] (Abbildung 49, rechts). Durch das plastische Stauchvermögen der Stoßdämpfer wird im Falle eines Absturzes oder Anpralls Energie partiell absorbiert und so die mechanische Einwirkung auf die Gefahrstoffbehälter minimiert [70, 71, 91, 92]. Für die Herstellung von Stoßdämpferelementen kommen unter anderem Materialien wie Metallschäume (z. B. Aluminiumschäume), Kunststoffschäume (z. B. Polyurethanschäume) oder bestimmte Hölzer (z. B. Fichtenholz) zum Einsatz [91, 92]. Teilweise werden aber auch stark porosierte zementgebundene Materialsysteme eingesetzt [68-71, 91]. Speziell für die Anwendung bei Stoßdämpferfundamenten wurde von der Firma HOCHTIEF AG ein Beton („Dämpferbeton“) mit einem hohen plastischen Stauchvermögen entwickelt, der zu einem hohen Anteil aus EPS-Perlen besteht [68-70].



Abbildung 49: Gefahrstoffbehälter mit Stoßdämpferelementen [91] (links) und Stoßdämpferfundament [72] (rechts).

Stoßdämpfersysteme aus zementgebundenen Materialien könnten ebenso als Anprallschutz bei Autos oder Schiffen Anwendung finden [8, 93]. Neben der Anwendung bei Stoßdämpfern werden zementgebundene Materialsysteme mit einem hohen plastischen Stauchvermögen auch zum Schutz von Bauwerksstrukturen gegen stoß- und explosionsartige Beanspruchungen eingesetzt. Solche hochdynamischen und impulsiven Beanspruchungen können beispielsweise bei unfallbedingten Explosionen in der Öl- und Gasindustrie oder bei terroristischen Angriffen auftreten. Durch das hohe Energieabsorptionsvermögen der Materialien kann das Schadensausmaß deutlich reduziert werden [65].

Notfall-Abbremsysteme für Flugzeuge

Flugzeuge können beim Start und bei der Landung unplanmäßig über die Start- bzw. Landebahn hinaus rollen, was zu Flugzeug- und Personenschäden führen kann. Insbesondere bei Flughäfen mit besonders kurzen Start- und Landebahnen sind sogenannte „Engineered Material Arresting Systems (EMAS)“ eine Lösung, um das Schadensrisiko im Falle eines Überrollens zu minimieren. EMAS sind Notfall-Abbremsysteme, die am Ende von Start- bzw. Landebahnen in Form eines Weichbetts aus Materialien mit einem hohen plastischen Stauchvermögen angeordnet werden [61, 64, 94, 95]. Infolge des plastischen Stauchvermögens wird ein hoher Anteil der kinetischen Energie beim Überrollen des Flugzeugs absorbiert, sodass dieses allmählich abgebremst und letztlich gestoppt wird. Als Materialien für die Anwendung bei EMAS wurden neben Glas- und Polymerschäumen auch stark porosierte zementgebundene Materialsysteme (u. a. Schaumbetone) untersucht und erfolgreich erprobt [61, 64, 94, 95].



Abbildung 50: Fotos eines Notfall-Stoppsystems (Engineered Material Arresting System) für Flugzeuge auf Start- und Landebahnen aus zementgebundenen Materialien mit hohem plastischen Stauchvermögen (links: [96], rechts: [97]).

4 Übersicht der experimentellen Untersuchungen zum Stauchverhalten

Das experimentelle Untersuchungsprogramm dieser Arbeit umfasst Stauchversuche an stark porosiertem Beton sowie an dessen Einzelkomponenten.

Im ersten Schritt wird das Stauchverhalten von verschiedenen leichten Gesteinskörnungen (Blähton-Leichtsand, Blähton, Blähglas, Vermiculite) sowie von Schaumstoffperlen aus expandiertem Polystyrol (EPS-Perlen) untersucht. Dabei werden auch verschiedene Korngrößen der porösen Zuschlagstoffe berücksichtigt. Die Stauchversuche werden an Schüttungen der ungebundenen Zuschlagstoffe in einem Stahlzylinder ($h/D = 300 \text{ mm}/150 \text{ mm}$) durchgeführt.

Anschließend wird das Stauchverhalten von porosiertem Zementstein untersucht. Die Porosierung des Zementsteins erfolgt durch die Einführung von Luftporen unter Verwendung eines Schaumbildners sowie alternativ durch die Beimischung von EPS-Perlen. Das Stauchverhalten wird unter Variation des Luft- bzw. EPS-Gehaltes untersucht. Im Falle der Verwendung von EPS-Perlen werden darüber hinaus unterschiedliche EPS-Korngrößen in die Untersuchungen einbezogen, um den Einfluss der Porengröße auf das Stauchverhalten zu erfassen. Die Stauchversuche erfolgen an Würfelproben (Kantenlänge: 150 mm) unter Vollflächenbelastung in einem speziell entwickelten Versuchsstand, der eine nahezu vollständige Querdehnungsbehinderung der Proben ermöglicht.

Aufbauend auf den Untersuchungen der Einzelkomponenten finden die Stauchversuche an stark porosierten Betonen statt. Diese sind durch ein matrix- und kornporiges Gefüge charakterisiert, das durch den Einsatz eines Schaumbildners in Kombination mit der Verwendung poröser Zuschlagstoffe erzielt wird. Auf Materialebene wird der Einfluss der Art und Korngröße der porösen Zuschlagstoffe untersucht. Des Weiteren werden Variationen des Wasserzementwertes einbezogen, um den Einfluss der Kapillarporosität der Zementsteinmatrix zu erfassen. Die Stauchversuche werden an Zylinderproben ($h/D = 300 \text{ mm}/150 \text{ mm}$) mit Querdehnungsbehinderung in einer vollumschließenden Probenhalterung durchgeführt. Da bei typischen Anwendungsfällen von Stauchschichten bzw. -elementen davon auszugehen ist, dass diese nicht vollflächig, sondern eher partiell gestaucht werden, erfolgen die Stauchversuche zur Erfassung der materialtechnischen Einflussparameter unter Teilflächenbelastung. Um den Einfluss der Versuchsrandbedingungen hinsichtlich voll- bzw. teilflächigen Stauchungen abzudecken, werden die Stauchversuche an einer ausgewählten Betonvariante auch unter Variation des Lastflächenverhältnisses durchgeführt.

Das Stauchverhalten wird anhand der in den Versuchen ermittelten Spannungs-Stauchungskurven grundlegend charakterisiert und hinsichtlich der material- und versuchstechnischen Einflussparameter quantifiziert. Zudem erfolgt eine begleitende Untersuchung der Struktur- und Gefügeänderungen, um die wesentlichen mechanischen Effekte während der Stauchversuche und deren Auswirkungen auf das Stauchverhalten analysieren zu können.

Eine Übersicht über die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen ist in Abbildung 51 gegeben.

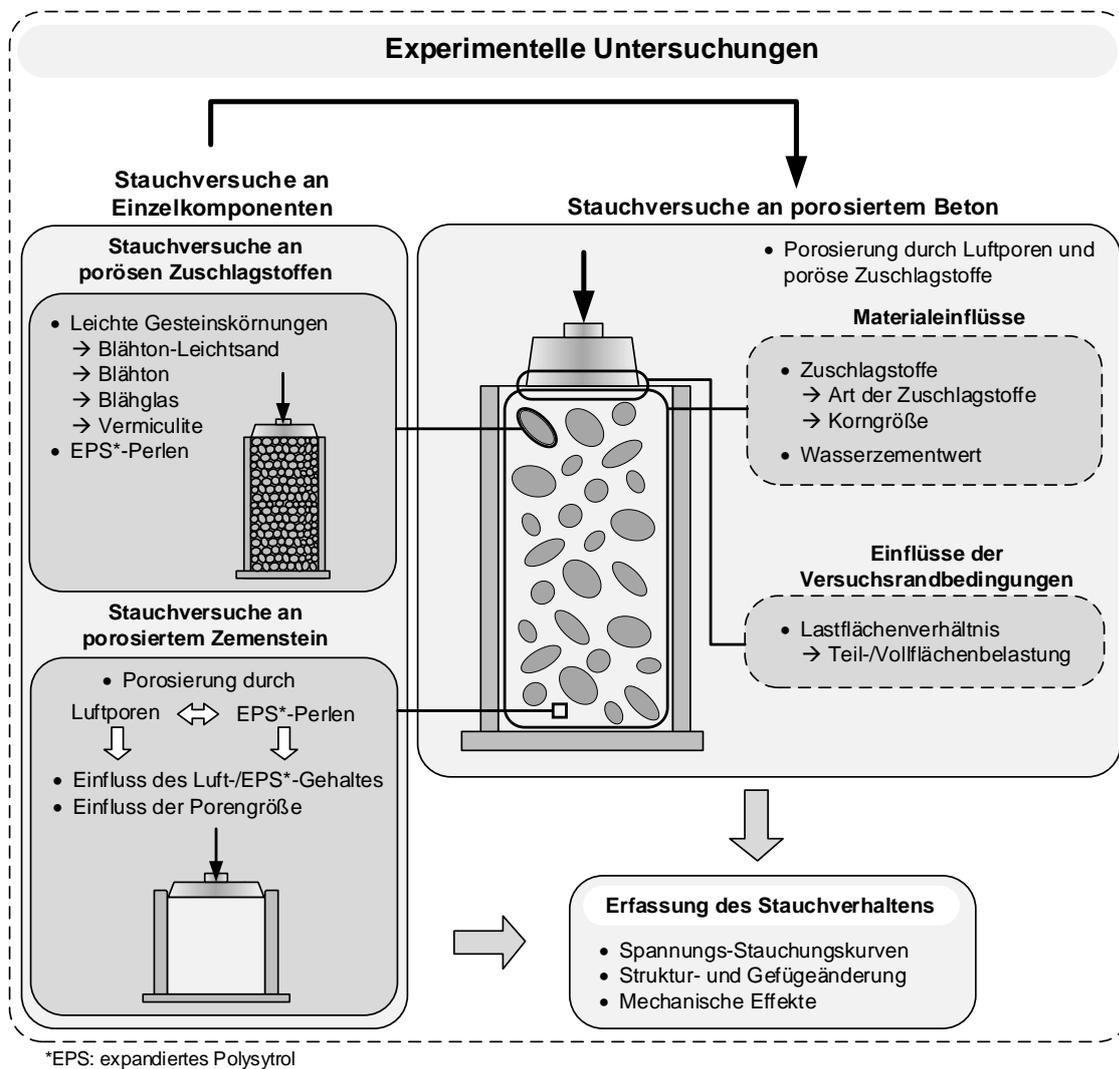


Abbildung 51: Übersicht der experimentellen Untersuchungen zum Stauchverhalten von stark porositätem Beton und dessen Einzelkomponenten.

5 Untersuchungen an porösen Zuschlagstoffen

5.1 Poröse Zuschlagstoffe

Das Stauchverhalten wurde an Schüttungen von verschiedenen industriell hergestellten leichten Gesteinskörnungen (Blähton-Leichtsand, Blähton, Blähglas, Vermiculite) und Schaumstoffperlen aus expandiertem Polystyrol (EPS-Perlen) untersucht (Abbildung 52). Da es sich bei EPS-Perlen nicht um eine (leichte) Gesteinskörnung handelt, werden die Materialien im Folgenden unter dem Begriff „poröse Zuschlagstoffe“ zusammengefasst. Für eine einheitliche Terminologie bei der Charakterisierung der porösen Zuschlagstoffe werden für die EPS-Perlen auch die Begriffsbezeichnungen für Gesteinskörnungen verwendet (Kornform, -größe, -rohdichte etc.).



Abbildung 52: Poröse Zuschlagstoffe (v.o.l.n.u.r.): Blähton-Leichtsand 0/2 mm, Blähton 2/8 mm, Blähglas 2/4 mm, Vermiculite 2/8 mm, EPS-Perlen 2/5 mm.

5.2 Charakterisierung der Zuschlagstoffe

5.2.1 Allgemeine Eigenschaften

Die Ausgangsmaterialien, die granulometrischen Eigenschaften (Kornform, Kornoberflächenbeschaffenheit) und die (Liefer-)Korngrößen der porösen Zuschlagstoffe sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Ausgangsmaterial, granulometrische Eigenschaften (Kornform, Kornoberfläche) und (Liefer-)Korngröße der porösen Zuschlagstoffe.

Bezeichnung	Ausgangsmaterial	Kornform	Kornoberfläche	(Liefer-)Korngröße
Blähton-Leichtsand	Tone und Schiefertone	gebrochen	offenporig	0/2 mm
Blähton		rund	glatt bis mäßig rau, geschlossenporig (Sinterhaut teilweise mit lokalen Fehlstellen und Rissen)	2/8 mm
Blähglas	Altglas	rund bis gedrunen	glatt, geschlossenporig (Sinterhaut weitgehend ohne Fehlstellen)	0,5/1 mm 1/2 mm 2/4 mm 4/8 mm
Vermiculite	Glimmerschiefer	harmonikabalgförmig	blättrig (mit dazwischenliegenden Furchen)	0,5/1 mm 1/2 mm 2/8 mm
EPS-Perlen	Polystyrol	rund	glatt, geschlossen (keine Wasseraufnahme)	0,5/1 mm 1/2 mm 2/5 mm

Die Korngrößenverteilung der Lieferkörnungen wurde nach DIN EN 933-1 [98] bestimmt und ist dem Anhang A (Tabelle A 5 bis Tabelle A 8) zu entnehmen.

5.2.2 Reindichte, Kornrohndichte und Schüttdichte

Die Reindichte $\rho_{a,sp}$ wurde mit einem Pyknometer in Anlehnung an DIN EN 1936 [99] bestimmt. Der Anwendungsbereich der DIN EN 1936 [99] umfasst zwar ausschließlich Naturstein, das Prüfverfahren lässt sich jedoch ebenso auf die hier untersuchten porösen Zuschlagstoffe anwenden. Die Kornrohndichte ρ_a wurde mit dem Messzylinder-Verfahren bzw. für den Blähton-Leichtsand mit dem BVK-Verfahren nach DIN V 18004 [100] ermittelt. Die Schüttdichte ρ_b wurde nach DIN EN 1097-3 [101] bestimmt. Die ermittelten Kennwerte sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Reindichte, Kornrohndichte und Schüttdichte der porösen Zuschlagstoffe.

Bezeichnung	Reindichte $\rho_{a,sp}$ [g/cm ³]	Kornrohndichte ρ_a [kg/m ³]	Schüttdichte ρ_b [kg/dm ³]
Blähton-Leichtsand 0/2	2.685	1.678*	842
Blähton 2/8	2.665	666	347
Blähglas 0,5/1	2.544	516	275
Blähglas 1/2		421	224
Blähglas 2/4		336	182
Blähglas 4/8		312	168
Vermiculite 0,5/1	2.531	247	131
Vermiculite 1/2		221	117
Vermiculite 2/8		205	106
EPS 0,5/1	1.056	21,2	13,2
EPS 1/2		27,6	16,9
EPS 2/5		22,0	13,5

* Bestimmung durch BVK-Verfahren

Bei typischen leichten Gesteinskörnungen variieren die Reindichten in der Regel in relativ engen Grenzen (vgl. Abschnitt 2.1.3). Mit Reindichten zwischen 2.685 kg/m^3 (Blähton-Leichtsand) und 2.531 kg/m^3 (Vermiculite) trifft dies auch für die hier untersuchten leichten Gesteinskörnungen zu. Die Kornrohdichten wichen herstellungsbedingt hingegen deutlich voneinander ab ($205 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_a \leq 1.678 \text{ kg/m}^3$). Dabei zeigten sich sowohl Unterschiede zwischen den verschiedenen Gesteinskörnungsarten als auch innerhalb einer Gesteinskörnungsart (Blähglas, Vermiculite) in Abhängigkeit der Korngröße. Im Vergleich zu den leichten Gesteinskörnungen waren die EPS-Perlen durch eine wesentlich geringere Reindichte ($\rho_{a,sp} = 1.056 \text{ kg/m}^3$) sowie geringere Kornrohdichte ($21,2 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_a \leq 27,6 \text{ kg/m}^3$) charakterisiert. Die Schüttdichte der porösen Zuschlagstoffe ($13,2 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_b \leq 842 \text{ kg/m}^3$) betrug zwischen rd. 50 und 62 % der jeweiligen Kornrohdichte.

5.2.3 Hohlraumgehalt des Haufwerks

Der Hohlraumgehalt des Haufwerks v (Haufwerksporenvolumen) ergibt sich aus der Rohdichte und der Schüttdichte zu:

$$v = (1 - \rho_b / \rho_a) \cdot 100 \quad (2)$$

mit: v	Hohlraumgehalt des Haufwerks	[Vol.-%]
ρ_a	Rohdichte	[kg/m ³]
ρ_b	Schüttdichte	[kg/m ³]

Die ermittelten Hohlraumgehalte sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Hohlraumgehalt des Haufwerks der porösen Zuschlagstoffe.

Bezeichnung	Hohlraumgehalt des Haufwerks v [Vol.-%]
Blähton-Leichtsand 0/2	49,8
Blähton 2/8	47,9
Blähglas 0,5/1	46,7
Blähglas 1/2	46,8
Blähglas 2/4	45,8
Blähglas 4/8	46,2
Vermiculite 0,5/1	47,0
Vermiculite 1/2	47,1
Vermiculite 2/8	48,3
EPS 0,5/1	37,7
EPS 1/2	38,8
EPS 2/5	38,6

Für die leichten Gesteinskörnungen lag der Hohlraumgehalt in der gleichen Größenordnung ($46,2 \text{ Vol.-%} \leq v \leq 49,8 \text{ Vol.-%}$). Mit rd. 38 Vol.-% war der Hohlraumgehalt bei den EPS-Perlen hingegen etwas geringer.

5.2.4 Porosität

Die (Gesamt-)Porosität p der Zuschlagstoffe ergibt sich aus der Rohdichte und der Reindichte zu:

$$p = (1 - \rho_a / \rho_{a,sp}) \cdot 100 \quad (3)$$

mit: p	Porosität	[Vol.-%]
ρ_a	Kornrohichte	[g/cm ³]
$\rho_{a,sp}$	Reindichte	[g/cm ³]

Die berechneten Porositäten sind in Tabelle 4 angegeben.

Tabelle 4: Porosität der porösen Zuschlagstoffe.

Bezeichnung	Porosität p [Vol.-%]
Blähton-Leichtsand 0/2	37,5
Blähton 2/8	75,0
Blähglas 0,5/1	79,7
Blähglas 1/2	83,5
Blähglas 2/4	86,8
Blähglas 4/8	87,7
Vermiculite 0,5/1	90,2
Vermiculite 1/2	91,3
Vermiculite 2/8	91,9
EPS 0,5/1	98,0
EPS 1/2	97,4
EPS 2/5	97,9

Die Porosität der leichten Gesteinskörnungen lag zwischen 37,5 Vol.-% (Blähton-Leichtsand 0/2 mm) und 91,9 Vol.-% (Vermiculite 2/8 mm). Aufgrund der sehr ähnlichen Reindichten der leichten Gesteinskörnungen war eine annähernd lineare Abnahme der Porosität mit zunehmender Kornrohichte zu erkennen (Abbildung 53). Im Vergleich zu den leichten Gesteinskörnungen war die Porosität der EPS-Perlen mit rd. 98 Vol.-% am höchsten.

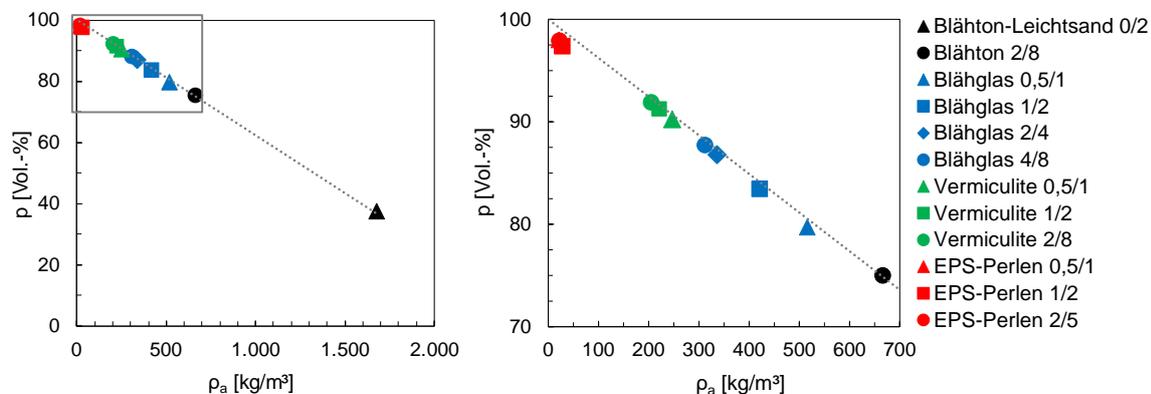


Abbildung 53: Zusammenhang zwischen der Porosität und der Kornrohichte der porösen Zuschlagstoffe.

5.2.5 Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahme w_{60} bzw. w_{BVK} wurde mit dem Messzylinder-Verfahren bzw. für den Blähton-Leichtsand mit dem BVK-Verfahren nach DIN V 18004 [100] bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 dokumentiert.

Tabelle 5: Wasseraufnahme der porösen Zuschlagstoffe.

Bezeichnung	Wasseraufnahme w_{60} bzw. w_{BVK} [M.-%]
Blähton-Leichtsand 0/2	28*
Blähton 2/8	15
Blähglas 0,5/1	23
Blähglas 1/2	24
Blähglas 2/4	20
Blähglas 4/8	15
Vermiculite 0,5/1	199
Vermiculite 1/2	187
Vermiculite 2/8	175
EPS 0,5/1	≈ 0
EPS 1/2	
EPS 2/5	

* Bestimmung durch BVK-Verfahren

5.2.6 Korndruckfestigkeit

Die Korndruckfestigkeit grober leichter Gesteinskörnungen ($d > 4$ mm) wird in der Regel am Haufwerk mit dem Druckzylinderverfahren nach DIN EN 13055 [16] bestimmt (vgl. Abschnitt 2.1.3.3). Für feine leichte Gesteinskörnungen bzw. Leichtsande ($D \leq 4$ mm) wird die Korndruckfestigkeit hingegen meist indirekt an Mörtelprismen nach dem BVK-Verfahren (DIN V 18004 [100]) ermittelt. Um die Korndruckfestigkeiten der untersuchten porösen Zuschlagstoffe unabhängig von deren Korngröße vergleichen zu können, wurde einheitlich das Druckzylinderverfahren angewendet. Da das grundlegende Prinzip des Druckzylinderverfahrens nach DIN EN 13055 [16] den in diesem Abschnitt durchgeführten Stauchversuchen entspricht, wurde die Korndruckfestigkeit anhand der in den Versuchen ermittelten Spannungs-Stauchungskurven (vgl. Abschnitt 5.4.2) bestimmt.

Nach DIN EN 13055 [16] wird die Korndruckfestigkeit C aus der Spannung bei einer Stauchung des Haufwerks von $\varepsilon_z = 20$ % (C_a für $\rho_b > 150$ kg/m³) bzw. $\varepsilon_z = 40$ % (C_b für $\rho_b \leq 150$ kg/m³) ermittelt. Die ermittelten Korndruckfestigkeiten der porösen Zuschlagstoffe sind in Tabelle 6 angegeben.

Wie Tabelle 6 zu entnehmen ist, weisen EPS-Perlen und Vermiculite keine nennenswerte Korndruckfestigkeit auf ($C < 0,38$ N/mm²). Die Korndruckfestigkeit des Blähglases lag zwischen 1,62 und 2,74 N/mm² und stieg mit zunehmender Korngröße an. Mit 3,50 N/mm² war die Korndruckfestigkeit des Blähtons etwas größer. Für den Blähton-Leichtsand konnte anhand der Spannungs-Stauchungskurve keine Korndruckfestigkeit ermittelt werden, da die maximale Spannung ($\sigma_{z,max} = 14,0$ N/mm²) bereits bei einer Stauchung von $\varepsilon_{z,max} = 18,4$ % < 20 % erreicht wurde (vgl. Abschnitt 5.4.2). Daraus kann allerdings abgeleitet werden, dass die Korndruckfestigkeit des

Blähton-Leichtsandes größer als $14,0 \text{ N/mm}^2$ war und damit ein Vielfaches im Vergleich zu den anderen porösen Zuschlagstoffen betrug.

Tabelle 6: Korndruckfestigkeiten der porösen Zuschlagstoffe.

Bezeichnung	ρ_b [kg/m ³]	Kornfestigkeit C [N/mm ²]	
		$C_a = \sigma(\epsilon_z = 20 \%)$	$C_b = \sigma(\epsilon_z = 40 \%)$
Blähton-Leichtsand 0/2	> 150	> 14,0	
Blähton 2/8		3,50	(7,51)
Blähglas 0,5/1		2,74	(5,07)
Blähglas 1/2		2,16	(3,72)
Blähglas 2/4		1,84	(3,09)
Blähglas 4/8		1,62	(2,92)
Vermiculite 0,5/1	< 150	(0,12)	0,38
Vermiculite 1/2		(0,09)	0,29
Vermiculite 2/8		(0,11)	0,29
EPS-Perlen 0,5/1		(0,06)	0,15
EPS-Perlen 1/2		(0,07)	0,16
EPS-Perlen 2/5		(0,05)	0,11

Für Blähton, Blähglas und die EPS-Perlen liegt eine nahezu lineare Korrelation zwischen der Korndruckfestigkeit und der Porosität vor (Abbildung 54). Aufgrund des ebenfalls annähernd linearen Zusammenhangs zwischen der Kornrohddichte und der Porosität (vgl. Abbildung 53) ergibt sich diese Korrelation auch zwischen der Korndruckfestigkeit und der Kornrohddichte. Die Korndruckfestigkeit nimmt dabei mit zunehmender Porosität bzw. mit abnehmender Kornrohddichte ab.

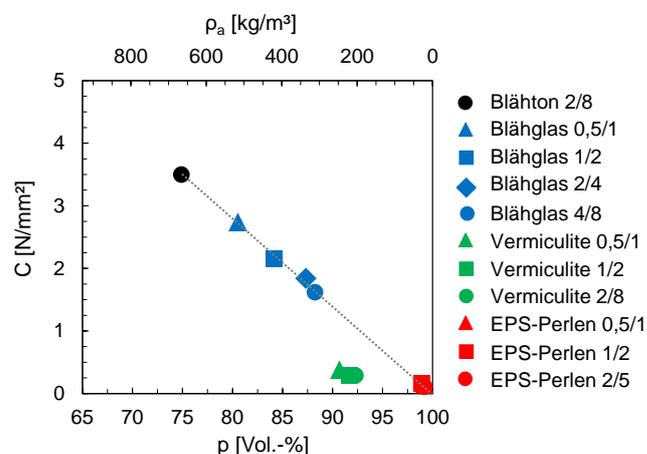


Abbildung 54: Zusammenhang zwischen der Korndruckfestigkeit und der Kornrohddichte bzw. Porosität der porösen Zuschlagstoffe.

Da die Vermiculite im Vergleich zu den EPS-Perlen zwar durch eine deutlich geringere Porosität bzw. höhere Kornrohddichte charakterisiert waren, die Korndruckfestigkeiten dieser Zuschlagstoffe jedoch auf einem ähnlich niedrigen Niveau lagen, lässt sich der für die anderen porösen Zuschlagstoffe dargestellte, nahezu lineare Zusammenhang zwischen der Korndruckfestigkeit und der Porosität bzw. Kornrohddichte nicht auf die Vermiculite übertragen (vgl. Abbildung 54). Dies war maßgeblich auf die charakteristische Kornstruktur der Vermiculite zurückzuführen (vgl. Abschnitt 5.4.2).

5.3 Stauchversuche

Das Stauchverhalten wurde in Anlehnung an das Druckzylinderverfahren nach DIN EN 13055 [16] am Haufwerk der ungebundenen porösen Zuschlagstoffe untersucht. Der verwendete Versuchsaufbau ist in Abbildung 55 dargestellt.

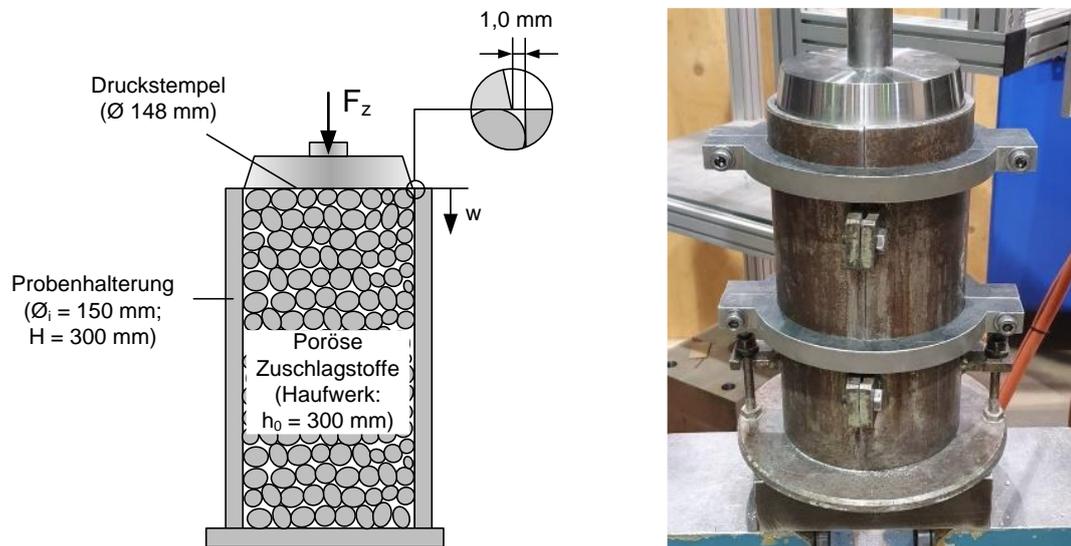


Abbildung 55: Schematische Darstellung (links) und Foto (rechts) des Versuchsaufbaus für Stauchversuche am Haufwerk der porösen Zuschlagstoffe.

In Abweichung zu DIN EN 13055 [16] wurde als Prüfcylinder eine zylindrische Stahlschalung mit einem Innendurchmesser von 150 mm und einer von Höhe 300 mm verwendet, die auch für die Stauchversuche an zylinderförmigen Betonproben zum Einsatz kam (vgl. Abbildung 99, Abschnitt 7.6). Die porösen Zuschlagsstoffe wurden lagenweise (drei Lagen mit $h \approx 100$ mm) in den Stahlzylinder gefüllt und durch leichte Stöße mit einem Stößel verdichtet. Die oberste Lage wurde mit einem Stahllineal glatt gestrichen, sodass sich eine Ausgangshöhe des Haufwerks von $h_0 = 300$ mm ergab.

Die Kraft wurde über einen Druckstempel mit einem Durchmesser von 148 mm vertikal und zentrisch von oben in das Haufwerk eingeleitet. Die Versuche wurden weggeregelt mit einer Geschwindigkeit von 20 mm/min durchgeführt. Die maximale Lastkapazität der verwendeten Prüfmaschine betrug 250 kN. Der Weg des Druckstempels wurde zum einen über den Kolbenweg der Prüfmaschine und zum anderen über induktive Wegaufnehmer erfasst. Bei Erreichen einer Stauchung von $\varepsilon_{z,\max} = 75$ % bzw. einer Kraft von $F_{z,\max} = 240$ kN ($\cong \sigma_{z,\max} = 14,0$ N/mm²) wurden die Versuche automatisch beendet.

5.4 Stauchverhalten

5.4.1 Verdichtungseffekte während der Stauchversuche

Während der Stauchversuche kam es zu einer Überlagerung verschiedener Verdichtungseffekte, die mit einer Volumenreduktion des Haufwerks einhergingen. Zum einen fand eine Verdichtung des

Haufwerks infolge von Setzungen bzw. Umlagerungen kleinerer Körner in die Zwischenräume (Haufwerksporen) der größeren Körner statt. Zum anderen kam es zu einer Verdichtung durch die aus der Druckbelastung resultierenden Verformungen der porösen Zuschlagstoffe, da diese sowohl zu einer Reduktion des initialen Hohlraumgehaltes des Haufwerks (Haufwerksporenvolumen) als auch zu einer Volumenkompression der porösen Zuschlagstoffe selber führten.

Ab einer gewissen Stauchung bzw. Spannung kam es bei den leichten Gesteinskörnungen sukzessiv zum Brechen bzw. „Zermahlen“ der einzelnen Körner. Die dabei vom Korn abgelösten Bruchstücke konnten sich teilweise in die angrenzenden und im Vergleich zum „ganzen“ Korn kleineren Hohlräume umlagern, wodurch es ebenfalls zu einer Verdichtung des Haufwerks kam.

Bei den Stauchversuchen an den leichten Gesteinskörnungen waren nach Versuchsende keine „ganzen“ Körner mehr vorzufinden. Das Haufwerk hatte sich durch die Stauchung zu einer mehr oder weniger homogenen Masse aus feinsten Bruchstücken der Körner verdichtet. Im Gegensatz dazu fanden bei den EPS-Perlen auch infolge großer Stauchungen keine Bruchvorgänge statt, was auf ihre hochporöse Struktur und das vergleichsweise sehr weiche bzw. verformungsfähige Grundmaterial zurückzuführen war. In diesem Fall resultierte die Verdichtung des Haufwerks primär aus der Verformung bzw. Kompression der EPS-Perlen selber.

5.4.2 Spannungs-Stauchungsverhalten

Die am Haufwerk ermittelten Spannungs-Stauchungskurven der porösen Zuschlagstoffe sind in Abbildung 56 dargestellt.

Die Stauchung $\varepsilon_{z,max}$ und Spannung $\sigma_{z,max}$ bei Versuchsende sind in Tabelle 7 aufgeführt. Des Weiteren ist der spezifische Spannungszuwachs $\Delta\sigma_{z,sp}$ in Tabelle 7 angegeben, der sich aus dem Verhältnis von $\sigma_{z,max}$ zu $\varepsilon_{z,max}$ ergibt.

Tabelle 7: Spannung/Stauchung bei Versuchsende und spezifischer Spannungszuwachs der porösen Zuschlagstoffe.

Bezeichnung	$\varepsilon_{z,max}$ [%]	$\sigma_{z,max}$ [N/mm ²]	$\Delta\sigma_{z,sp}$ [N/mm ²]
Blähton-Leichtsand 0/2	18,4	14,0	76,0
Blähton 2/8	53,8	14,0	26,0
Blähglas 0,5/1	61,1	14,0	22,8
Blähglas 1/2	71,3	14,0	19,6
Blähglas 2/4	75,0	12,8	17,1
Blähglas 4/8	75,0	10,2	13,6
Vermiculite 0,5/1	75,0	1,87	2,49
Vermiculite 1/2	75,0	1,48	1,97
Vermiculite 2/8	75,0	1,22	1,63
EPS 0,5/1	75,0	0,33	0,44
EPS 1/2	75,0	0,35	0,47
EPS 2/5	75,0	0,29	0,39

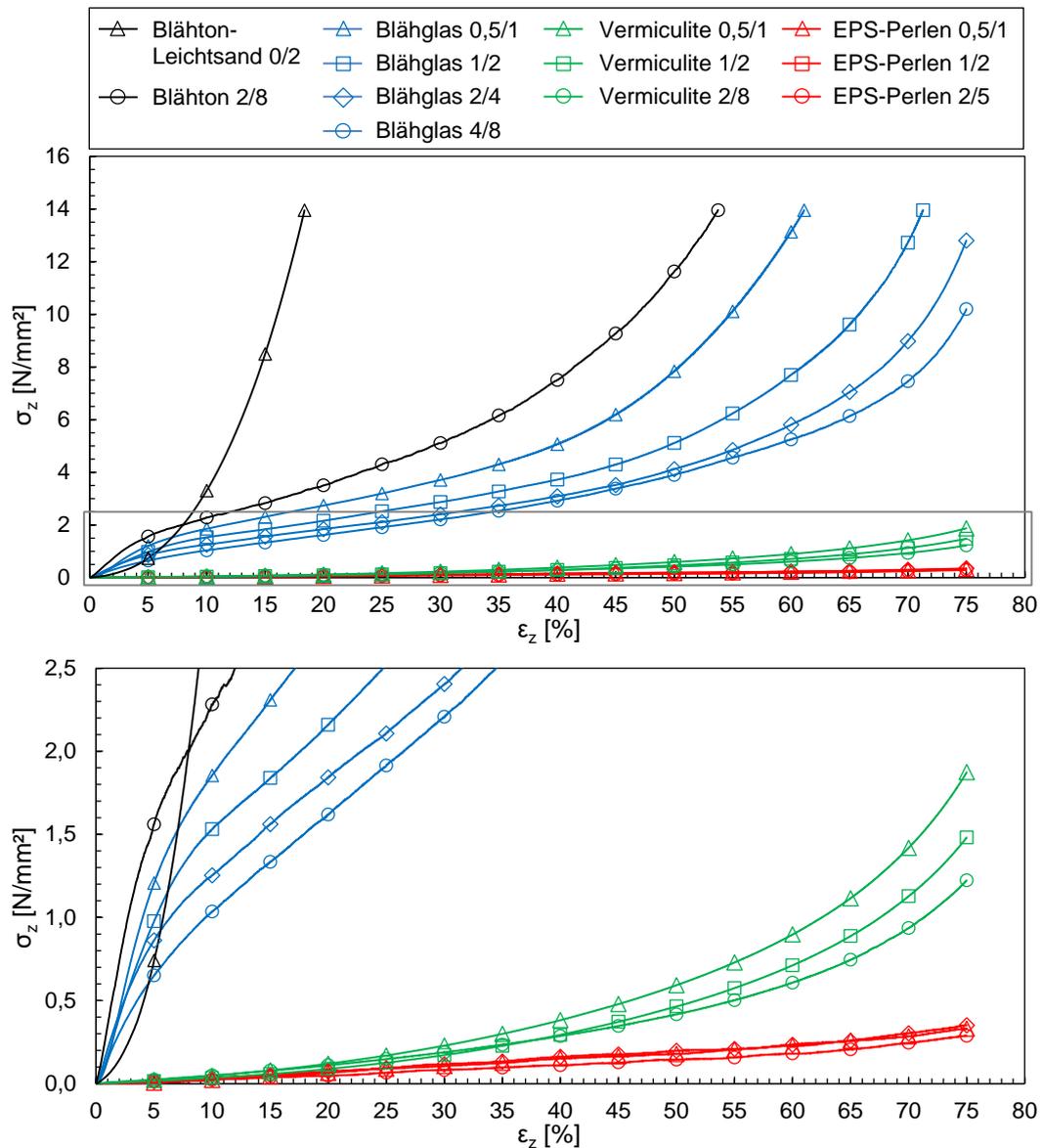


Abbildung 56: Am Haufwerk ermittelte Spannungs-Stauchungskurven der porösen Zuschlagstoffe im Spannungsbereich von 0 bis 14 N/mm² (oben) bzw. 0 bis 2,5 N/mm² (unten).

EPS-Perlen

Die Spannungs-Stauchungskurven der EPS-Perlen waren von Belastungsbeginn bis zum Versuchsende durch einen sehr flachen und annähernd linearen Verlauf gekennzeichnet (vgl. Abbildung 56, unten). Auch bei großen Stauchungen bis $\varepsilon_{z,\max} = 75\%$ waren die Spannungen mit Werten $\leq 0,35$ N/mm² noch sehr gering. Aufgrund der extrem hohen Porosität ($p \approx 98$ Vol.-%, vgl. Tabelle 4) und der gegen Null tendierenden Steifigkeit des EPS hätten noch größere Stauchungen aufgebracht werden können, bevor die zunehmende Verdichtung des Haufwerks zu einem nennenswerten Spannungsanstieg geführt hätte. Die Spannungsunterschiede zwischen den verschiedenen Korngrößen waren marginal. Ein Einfluss der Korngröße auf das Stauchverhalten der EPS-Perlen konnte somit ausgeschlossen werden.

Vermiculite

Die Vermiculite ließen sich ebenfalls ohne nennenswerten Widerstand zusammenstauchen. Dies war zum einen auf ihre hohe Porosität ($91,9 \text{ Vol.-%} \geq p \geq 90,2 \text{ Vol.-%}$, vgl. Tabelle 4), zum anderen auf ihre blättrige und damit anisotrope sowie instabile Kornstruktur (Abbildung 57) zurückzuführen. Trotz der im Vergleich zu den EPS-Perlen niedrigeren Porosität lagen die Spannungen der Vermiculite bis zu einer Stauchung von ca. 20 % auf einem ähnlich geringen Niveau (vgl. Abbildung 56, unten). In diesem Stauchungsbereich konnten für die Vermiculite ebenfalls keine nennenswerten Unterschiede zwischen den verschiedenen Korngrößen festgestellt werden.

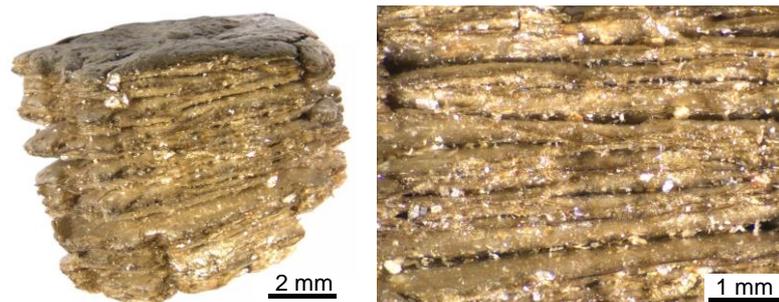


Abbildung 57: Charakteristische Kornstruktur von Vermiculiten: Mikroskopische Aufnahmen eines Vermiculitkorns von außen.

Im Gegensatz zu den EPS-Perlen deutete sich bei den Vermiculiten mit weiterer Stauchung eine leichte Verfestigung in Form des progressiven Spannungsanstiegs an. Diese resultierte aus der zunehmenden Verdichtung des Haufwerks bzw. aus der Volumenkompression der Körner (vgl. Abschnitt 5.4.1). Der Spannungsanstieg nahm dabei mit abnehmender Korngröße zu (vgl. Abbildung 56, unten). Bei einer Stauchung von $\varepsilon_{z,\max} = 75 \text{ %}$ war die Spannung der Vermiculite 0,5/1 mm um rd. 53 % größer als die der Vermiculite 2/8 mm. Der Tabelle 4 ist zu entnehmen, dass die Porosität der Vermiculite mit abnehmender Korngröße geringfügig abnahm. Daraus lässt sich ableiten, dass der für die kleineren Körner steilere Spannungsanstieg aus der geringeren Porosität und dem damit verbundenen reduzierten stauchbaren Volumen des Haufwerks resultierte.

Blähglas

Die Spannungs-Stauchungskurven der Blähglaskörnungen zeigten qualitativ einen Verlauf, der für die meisten industriell hergestellten leichten Gesteinskörnungen unter diesen Prüfbedingungen charakteristisch ist (vgl. Abbildung 8, Abschnitt 2.1.3.3). Auf einen anfänglich degressiven Verlauf, der auf die zunehmend stattfindenden Kornbrüche hindeutete, folgte zunächst ein Bereich mit einer annähernd linearen Spannungszunahme (vgl. Abbildung 56, oben). Ab einer gewissen Stauchung ($\varepsilon_z > 35 \text{ %}$) führte die Verdichtung des Haufwerks bzw. die Volumenkompression der Körner (vgl. Abschnitt 5.4.1) schließlich zu einer Verfestigung, die durch einen progressiven Spannungsanstieg charakterisiert war.

Quantitativ waren die Spannungs-Stauchungskurven der Blähglaskörnungen durch einen im Vergleich zu den EPS-Perlen und Vermiculiten deutlich steileren Anstieg gekennzeichnet. Im Anfangs-

bereich war der steilere Spannungsanstieg maßgeblich auf die Unterschiede in den von der Kornstruktur abhängigen mechanischen Eigenschaften zurückzuführen. Zum einen weist Blähglas eine deutlich niedrigere Porosität auf ($79,7 \text{ Vol.-%} \leq p \leq 87,7 \text{ Vol.-%}$, vgl. Tabelle 4). Zum anderen ist Blähglas im Vergleich zu Vermiculiten durch eine kompakte und annähernd runde Kornform, eine dichte Kornhülle (Sinterhaut) sowie eine überwiegend geschlossene Porenstruktur charakterisiert (Abbildung 58). Aufgrund dieser Struktureigenschaften weist Blähglas neben einer höheren Festigkeit vor allem eine höhere Steifigkeit auf, was zu einem steileren Spannungsanstieg führte.



Abbildung 58: Charakteristische Kornstruktur von Blähglas: Mikroskopische Aufnahmen eines Blähglaskorns von außen (links) und im Querschnitt (Mitte und rechts).

Leichte Unterschiede zwischen den verschiedenen Korngrößen zeichneten sich bereits bei kleinen Stauchungen ab. Die Spannungszunahme war dabei umso größer, je geringer die Korngröße war (vgl. Abbildung 56, oben). Dieser Zusammenhang war maßgeblich auf die mit abnehmender Korngröße abnehmende Porosität (vgl. Tabelle 4) und die damit verbundene Zunahme der Festigkeit und Steifigkeit der Körner zurückzuführen.

Mit zunehmender Stauchung wurden die Unterschiede zwischen den verschiedenen Korngrößen noch deutlicher. Die Verfestigung infolge der Verdichtung des Haufwerks deutete sich in Abhängigkeit der Korngröße ab einer Stauchung zwischen ca. 35 und 50 % an (Abbildung 56, oben). Auch wenn der Übergang nicht eindeutig lokalisierbar war, ist zu erkennen, dass der progressive Anstieg mit abnehmender Korngröße zum einen früher (d. h. bei einer kleineren Stauchung) einsetzte und zum anderen deutlich ausgeprägter war (vgl. Abbildung 56, oben). Bei einer Stauchung von $\varepsilon_z = 50 \text{ %}$ betrug die Spannung des Blähglases 0,5/1 mm ungefähr das Doppelte im Vergleich zur Spannung des Blähglases 4/8 mm. Da das initiale Haufwerksporenvolumen der Blähglaskörnungen unabhängig von deren Korngröße annähernd gleich groß war ($45,8 \text{ Vol.-%} \leq v \leq 46,8 \text{ Vol.-%}$, vgl. Tabelle 3), nahm das stauchbare Volumen des Haufwerks in etwa proportional zur Porosität der Blähglaskörner ab. Der mit abnehmender Korngröße früher einsetzende Verfestigungseffekt sowie der dabei deutlich größere Spannungszuwachs waren somit auf die niedrigere Porosität der Körner und das damit einhergehende reduzierte stauchbare Volumen des Haufwerks zurückzuführen.

Blähton

Das Spannungs-Stauchungsverhalten des Blähtons entsprach qualitativ dem des Blähglases, was auf die gleichartige Kornstruktur (kompakte/runde Kornform, dichte Sinterhaut, überwiegend geschlossenporig) der beiden Gesteinskörnungen zurückzuführen war (Abbildung 59). Allerdings war die Spannungs-Stauchungskurve des Blähtons insgesamt durch einen steileren Spannungsanstieg gekennzeichnet (vgl. Abbildung 56, oben), da die niedrigere Porosität ($p = 75,0$ Vol.-%, vgl. Tabelle 4) zum einen mit einer höheren Festigkeit und Steifigkeit, zum anderen mit einem geringeren stauchbaren Volumen des Haufwerks einherging. Bei einer Stauchung von $\varepsilon_z = 10$ % betrug die Spannung des Blähtons 2/8 mm im Vergleich zum Blähglas 4/8 mm bereits etwas mehr das Doppelte, bei $\varepsilon_z = 50$ % ungefähr das Dreifache.



Abbildung 59: Charakteristische Kornstruktur von Blähton: Mikroskopische Aufnahmen eines Blähtonkorns von außen (links) und im Querschnitt (Mitte und rechts).

Blähton-Leichtsand

Beim Blähton-Leichtsand zeigten sich deutlich Unterschiede im Spannungs-Stauchungsverhalten im Vergleich zum groben Blähton sowie den anderen porösen Zuschlagstoffen. Zum einen war die Spannungs-Stauchungskurve bereits mit Belastungsbeginn durch einen progressiven Verlauf gekennzeichnet. Zum anderen war der Spannungsanstieg insgesamt um ein Vielfaches größer (vgl. Abbildung 56, oben). Bei einer Stauchung von $\varepsilon_z = 15$ % betrug die Spannung des Blähton-Leichtsandes 0/2 mm bereits das Dreifache im Vergleich zum Blähton 2/8 mm. Aufgrund des sehr steilen Kurvenanstiegs wurde die maximale Spannung von $\sigma_{z,max} = 14,0$ N/mm² bereits bei einer vergleichsweise kleinen Stauchung von $\varepsilon_{z,max} = 18,4$ % erreicht. Der steilere Spannungsanstieg resultierte vor allem aus der deutlich niedrigeren Porosität des Blähton-Leichtsandes ($p = 37,5$ Vol.-%, vgl. Tabelle 4), die mit einer höheren Festigkeit und Steifigkeit sowie einem reduzierten stauchbaren Volumen des Haufwerks einherging. Zudem war das Verdichtungspotenzial des Haufwerks infolge von Kornbrüchen bzw. anschließenden Umlagerungseffekten (vgl. Abschnitt 5.4.1) aufgrund der sehr feinen Körnung des Blähton-Leichtsandes geringer als bei den gröberen leichten Gesteinskörnungen.

5.4.3 Korrelation zwischen Spannung und Porosität bzw. Kornrohddichte

Wie in Abschnitt 5.4.2 dargelegt wurde, variiert das Spannungs-Stauchungsverhalten der verschiedenen porösen Zuschlagstoffe mehr oder weniger stark und wird maßgeblich durch die Porosität bzw. die damit zusammenhängenden mechanischen Korneigenschaften sowie das resultierende stauchbare Volumen des Haufwerks bestimmt. Dementsprechend korrelieren die ermittelten Spannungen insgesamt gut mit der Porosität bzw. Kornrohddichte der porösen Zuschlagstoffe. Die absoluten Spannungen bei Stauchungen von $\epsilon_z = 15\%$ und $\epsilon_z = 50\%$ sind in Abhängigkeit der Porosität bzw. Kornrohddichte in Abbildung 60 dargestellt. Analog dazu ist der spezifische Spannungszuwachs (vgl. Tabelle 7) in Abbildung 61 dargestellt.

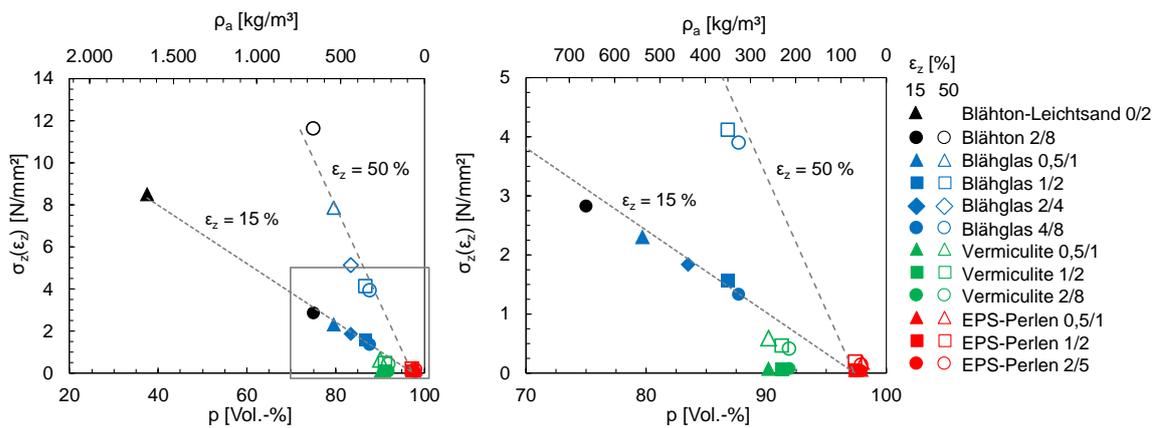


Abbildung 60: Spannungen bei einer Stauchung von 15 bzw. 50 % in Abhängigkeit der Porosität bzw. Kornrohddichte.

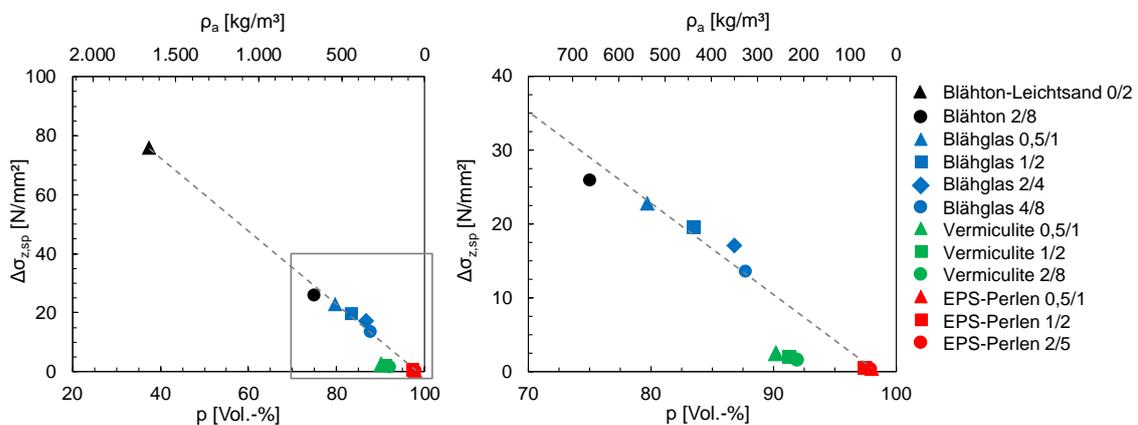


Abbildung 61: Spezifischer Spannungszuwachs in Abhängigkeit der Porosität bzw. Kornrohddichte.

Für Blähton-Leichtsand, Blähton, Blähglas und die EPS-Perlen ist eine nahezu lineare Abnahme der Spannungen und des spezifischen Spannungszuwachses mit zunehmender Porosität bzw. abnehmender Kornrohddichte zu erkennen. Für Blähglas lässt sich über diesen Zusammenhang auch der Einfluss der Korngröße abbilden, da der flachere Spannungsanstieg bei den größeren Körnern auf die mit zunehmender Korngröße zunehmende Porosität bzw. abnehmende Kornrohddichte zurückzuführen war (vgl. Abschnitt 5.4.2).

Für Vermiculite konnte hingegen keine mit den anderen porösen Zuschlagstoffen übereinstimmende Korrelation zur Porosität bzw. Kornrohddichte festgestellt werden. Trotz der deutlich geringeren Porosität bzw. höheren Kornrohddichte im Vergleich zu den EPS-Perlen, waren die Spannungen bzw. der spezifische Spannungszuwachs der Vermiculite nur unwesentlich größer. Dies war auf die charakteristische Kornstruktur der Vermiculite (vgl. Abbildung 57) zurückzuführen, die zu einem in Bezug auf ihre Porosität ($91,9 \text{ Vol.-%} \geq p \geq 90,2 \text{ Vol.-%}$, vgl. Tabelle 4) bzw. Kornrohddichte ($205 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_a \leq 247 \text{ kg/m}^3$, vgl. Tabelle 2) verhältnismäßig geringen Widerstand gegen die aufgebrauchte Stauchung führte.

Auch wenn das Stauchverhalten der porösen Zuschlagstoffe zweifelsohne von einer Vielzahl weiterer Parameter (z. B.: Kornform, Kornhülle) abhängig ist, konnten anhand der Ergebnisse die Porosität bzw. die Kornrohddichte als maßgebende Einflussgrößen auf das Stauchverhalten identifiziert werden. Dies ist sicherlich auch darauf zurückzuführen, dass für die meisten der strukturellen und mechanischen Korneigenschaften ein enger Zusammenhang mit der Porosität und der Kornrohddichte besteht (vgl. Abschnitt 2.1.3).

6 Untersuchungen an porosiertem Zementstein

6.1 Variationen

Bei den nachfolgenden Untersuchungen zum Stauchverhalten des porosierten Zementsteins erfolgte die Porosierung zum einen durch die Einführung von Luftporen unter Verwendung eines Schaumbildners, zum anderen durch die Beimischung von EPS-Perlen. Das Stauchverhalten wurde unter Variation des Luft- bzw. EPS-Gehaltes (40, 50, 60 Vol.-%) untersucht. Im Falle der Verwendung von EPS-Perlen wurden darüber hinaus unterschiedliche EPS-Korngrößen (0,5/1 mm, 1/2 mm) in die Untersuchungen einbezogen.

6.2 Zusammensetzung, Herstellung und Probekörper

Die Zusammensetzung des nicht-porosierten Basis-Zementsteins ZS-0 ist in Tabelle 8 angegeben. Verwendet wurde ein Portlandzement CEM I 42,5 R. Die wesentlichen Kenndaten des Zements sind in Tabelle A 1 (Anhang A) aufgeführt. Der Wasserzementwert betrug $w/z = 0,70$. Für die Mischungsberechnung wurde zunächst angenommen, dass der Luftgehalt ≈ 0 Vol.-% beträgt.

Als stabilisierende Komponente kam ein Gemisch aus Natrium- und Kaliumwasserglas (Mischungsverhältnis 1:1) zum Einsatz. Die wesentlichen Kenndaten der Wassergläser können Tabelle A 4 (Anhang A) entnommen werden. Die Beimischung der beiden Wassergläser bewirkte eine Erhöhung der Viskosität sowie ein beschleunigtes Ansteif- und Erstarrungsverhalten der zunächst sehr flüssigen Zementsuspension. Dadurch konnte eine Sedimentation der Zementpartikel im Basis-Zementleim verhindert werden.

Tabelle 8: Mischungszusammensetzung des nicht-porosierten Basis-Zementsteins ZS-0.

Komponenten	Rohdichte ρ [kg/dm ³]	Einwaage [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]
Zement (Z) (CEM I 42,5 R)	3,1	941,3	303,6
Wasser (W)	1,0	658,9	658,9
			$\Sigma(Z+W)$ = 962,6
w/z-Wert		0,70	
Luftporengehalt (LP) (Annahme)	-	-	0
Wasserglas Na+Ka (Wg)	1,43	53,9 (5,7 M.-% v. Z.)	37,4
			$\Sigma = 1000$

Durch den Einsatz eines Schaumbildners auf Basis eines organischen Tensids wurden während des Mischvorgangs hohe Volumenanteile an künstlichen Luftporen in den Basis-Zementleim eingeführt. Die wesentlichen Kenndaten des eingesetzten Schaumbildners sind in Tabelle A 3 (Anhang A) dokumentiert. Angestrebt wurden Luftgehalte von 40, 50 und 60 Vol.-%. Die in Vorversuchen ermittelten Dosiermengen des Schaumbildners sind in Tabelle 9 aufgeführt. Bezogen auf das Gesamtvolumen (Zementsteinvolumen inklusive Luftporen) reduzierte sich der Volumenanteil des

Basis-Zementsteins (Zementsteinvolumen exklusive Luftporen) um die Volumenanteile der eingeführten Luftporen. Das Verhältnis zwischen den Massen- und Volumenanteilen der einzelnen Ausgangskomponenten des Basis-Zementsteins blieb dabei jedoch unverändert. Die genauen Mischungszusammensetzungen der Zementsteinvarianten mit Luftporen können Tabelle A 10 (Anhang B-I) entnommen werden.

Tabelle 9: Zementsteinvarianten mit Luftporen und Zugabemengen des Schaumbildners.

Bezeichnung	Schaumbildner (SB)		Luftporengehalt [Vol.-%]
	Rohdichte [kg/m ³]	Einwaage [kg/m ³] (M.-% v. Z.)	
ZS-L40	1,1	2,2 (0,4)	40
ZS-L50		2,6 (0,6)	50
ZS-L60		4,0 (1,1)	60

Alternativ zur Einführung von künstlichen Luftporen erfolgte die Porosierung des Basis-Zementsteins durch die Beimischung von EPS-Perlen mit einer Korngröße von 0,5/1 mm bzw. 1/2 mm. Die charakteristischen Eigenschaften der EPS-Perlen können Abschnitt 5.2 entnommen werden. Die Zugabemengen und Volumenanteile der EPS-Perlen sind in Tabelle 10 angegeben. Die genauen Mischungszusammensetzungen der porosierten Zementsteinvarianten mit EPS-Perlen sind in Tabelle A 11 und Tabelle A 12 (Anhang B-I) dokumentiert.

Tabelle 10: Zementsteinvarianten mit EPS-Perlen und Zugabemengen der EPS-Perlen.

Bezeichnung	EPS-Korngröße	Rohdichte [kg/m ³]	Einwaage [kg/m ³]	EPS-Gehalt [Vol.-%]
ZS-EPS40_0,5/1	0,5/1 mm	21,2	8,48	40
ZS-EPS50_0,5/1			10,60	50
ZS-EPS60_0,5/1			12,72	60
ZS-EPS50_1/2	1/2 mm	27,6	13,80	50
ZS-EPS60_1/2			16,56	60

Die Herstellung der Zementsteine erfolgte in einem 100-Liter-Zwangsmischer. Das Mischregime ist in Abbildung 62 dargestellt.

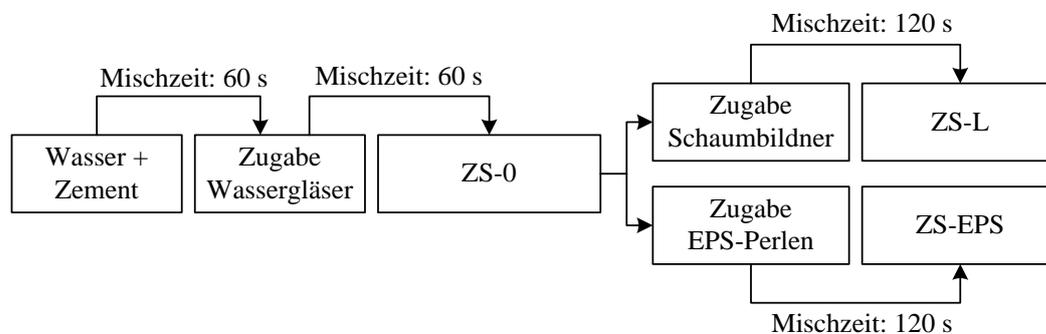


Abbildung 62: Mischregime für die Herstellung des Basis-Zementsteins (ZS-0) und der porosierten Zementsteinvarianten mit Luftporen (ZS-L) bzw. EPS-Perlen (ZS-EPS).

Während die angestrebten EPS-Volumenanteile relativ präzise über die aus der Rohdichte berechneten Zugabemengen der EPS-Perlen eingestellt werden konnten, mussten die Dosiermengen des Schaumbildners zur Erzielung der angestrebten Luftgehalte zunächst in Vorversuchen ermittelt werden. Erwartungsgemäß zeigte sich dabei, dass der während des Mischvorgangs erzeugte Luftgehalt des Zementleims zum einen von der Dosierung des Schaumbildners und zum anderen von der Mischzeit, d. h. von der eingetragenen Mischenergie abhängig war (vgl. Abschnitt 2.1.2). Es bestand jedoch weder ein linearer Zusammenhang zwischen der Dosiermenge des Schaumbildners und dem Luftgehalt, noch zwischen der Mischzeit und dem Luftgehalt (Abbildung 63). In den Vorversuchen wurden daher durch iteratives Vorgehen die erforderlichen Dosiermengen des Schaumbildners ermittelt, um nach einer Mischzeit von 120 Sekunden den jeweils angestrebten Luftgehalt zu erzielen. Die erforderlichen Dosiermengen betragen 0,4 M.-% (für $v_{\text{Luft}} = 40$ Vol.-%), 0,6 M.-% (für $v_{\text{Luft}} = 50$ Vol.-%) und 1,1 M.-% (für $v_{\text{Luft}} = 60$ Vol.-%) vom Zementgehalt (vgl. Tabelle 9 und Abbildung 63).

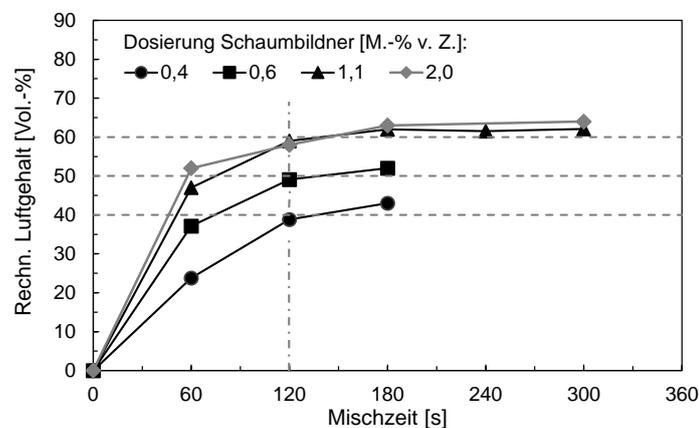


Abbildung 63: Luftgehalt in Abhängigkeit der Schaumbildner-Dosierung und der Mischzeit.

Wie in Abbildung 63 zu erkennen ist, führte eine deutliche Erhöhung der Dosiermenge des Schaumbildners auf 2,0 M.-% vom Zementgehalt auch in Kombination mit einer wesentlich längeren Mischzeit von bis zu fünf Minuten nur noch zu einer geringen Zunahme Luftgehaltes auf rd. 64 Vol.-%. Diese Erkenntnisse decken sich mit den Untersuchungen in [5], wo der maximale Luftgehalt von mit Tensidschaumbildnern aufgeschäumten Zementleimen ca. 65 Vol.-% betrug. In [5] wird dieser obere Grenzwert des einführbaren Luftgehaltes auf geometrische Randbedingungen zurückgeführt, die sich aus der Porengrößenverteilung der Luftporen ergeben.

Für die Zementsteine mit EPS-Perlen wurde der maximale EPS-Gehalt durch das Verhältnis zwischen der Schüttdichte und der Rohdichte der EPS-Perlen begrenzt. Dieses lag für beide EPS-Korngrößen knapp über 60 % (vgl. Tabelle 2, Abschnitt 5.2.2).

Zur Charakterisierung des Zementsteins und zur Durchführung der Stauchversuche wurden Würfelproben mit einer Kantenlänge von 150 mm hergestellt. Aufgrund des hohen Fließvermögens (vgl. Abschnitt 6.3.1) waren die Zementleime weitgehend selbstverdichtend. Größere Luft einschließen, die teilweise beim Befüllen der Schalungen entstanden, konnten durch leichtes Stochern und Klopfen an der Schalung ausgetrieben werden. Die Oberfläche der Zementleime wurde glatt

abgezogen und dann mit Folie abgedeckt. Nach 24 Stunden wurden die Proben ausgeschalt, luftdicht in Folie gepackt und anschließend bei einer Temperatur von 20 °C gelagert. Um eine gleichmäßige Lasteinleitung bei den Stauchversuchen zu gewährleisten, wurden die nicht geschalteten Seitenflächen der Proben (Einfüllseite) im Alter von 21 Tagen planparallel geschliffen. Anschließend wurden die Proben bis zur Durchführung der Versuche (im Alter von 28 ± 2 Tagen) ohne Folie bei einer Temperatur 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 65 % gelagert.

6.3 Charakterisierung der Zementleime

6.3.1 Fließvermögen

Das Fließvermögen der Zementleime wurde mit dem Trichterverfahren nach DIN EN 445 [102] erfasst. Die Trichterauslaufzeiten (TAZ) sind in Abbildung 64 dargestellt.

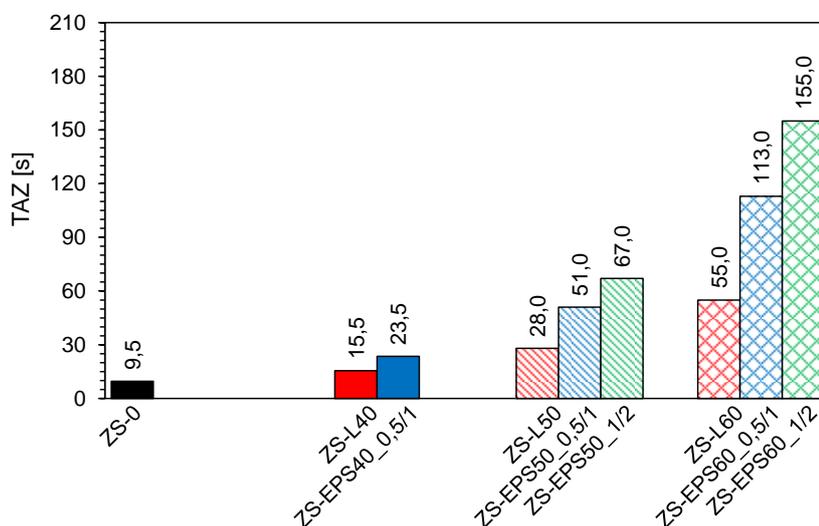


Abbildung 64: Trichterauslaufzeiten (TAZ) der Zementleime unmittelbar nach der Herstellung.

Im Vergleich zum Basis-Zementleim mit einer TAZ von 9,5 Sekunden führte die Einführung der Luftporen bzw. die Beimischung der EPS-Perlen zu einer Zunahme der TAZ, d. h. zu einer Abnahme des Fließvermögens. Dabei war ein Anstieg der TAZ mit zunehmendem Luft-/EPS-Gehalt zu verzeichnen. Bei annähernd gleichem Luft-/EPS-Gehalt wiesen die Zementleime mit EPS-Perlen im Vergleich zu denen mit Luftporen deutlich höhere TAZ auf. Des Weiteren wurde eine Zunahme der TAZ mit zunehmender EPS-Korngröße festgestellt.

6.3.2 Frischrohddichte

Die Frischrohddichte ρ_f der Zementleime wurde nach DIN EN 12350-6 [103] bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 dokumentiert. Des Weiteren sind in Tabelle 11 die Sollwerte der Frischrohddichten angegeben, die sich aus den jeweiligen Mischungsberechnungen (vgl. Anhang B-I) ergeben.

Tabelle 11: Frischrohdichten der Zementleime.

Bezeichnung	Frischrohdichte ρ_f [kg/m ³]	
	Soll	Ist
ZS-0	1.654	1.641
ZS-L40	991	977
ZS-L50	826	831
ZS-L60	659	675
ZS-EPS40_0,5/1	1001	968
ZS-EPS50_0,5/1	837	813
ZS-EPS60_0,5/1	674	681
ZS-EPS50_1/2	841	844
ZS-EPS60_1/2	678	690

Die Frischrohdichte des Basis-Zementleims betrug 1.641 kg/m³ und stimmte annähernd mit der Soll-Frischrohdichte von 1.654 kg/m³ überein. Mit zunehmendem Luft-/EPS-Gehalt nahm die Frischrohdichte entsprechend ab. Aufgrund der sehr geringen Kornrohdichten der EPS-Perlen (vgl. Tabelle 10) waren die Soll-Frischrohdichten der Zementleime mit EPS-Perlen im Vergleich zu denen der Zementleime mit Luftporen bei in etwa gleichem Luft-/EPS-Gehalt nur geringfügig größer. Wie Tabelle 11 zu entnehmen ist, waren die Abweichungen zwischen den Soll- und Ist-Frischrohdichten für alle Zementleime sehr gering ($|\Delta\rho_f| \leq 33$ kg/m³).

6.3.3 Luft-/EPS-Gehalt

Der Luftgehalt des Basis-Zementleims wurde rechnerisch über die Frischrohdichte und zusätzlich mit dem Druckausgleichsverfahren nach DIN EN 12350-7 [10] bestimmt. Bei den Zementleimen mit Luftporen wurde der Luftgehalt ausschließlich rechnerisch über die Frischrohdichte ermittelt.

Unter der Annahme, dass die Rohdichten der Ausgangskomponenten in relativ engen Grenzen variieren, ergibt sich der rechnerische Luftgehalt v_{Luft} des Basis-Zementleims und der Zementleime mit Luftporen zu:

$$v_{Luft} = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_{f,soll}} \cdot \left(1 - \frac{v_{Luft,soll}}{100} \right) \right) \cdot 100 \quad (4)$$

mit:	v_{Luft}	rechnerischer Luftgehalt	[Vol.-%]
	$v_{Luft,soll}$	Soll-Luftgehalt	[Vol.-%]
	ρ_f	Frischrohdichte	[kg/m ³]
	$\rho_{f,soll}$	Soll-Frischrohdichte	[kg/m ³]

Die ermittelten Luftgehalte des Basis-Zementleims und der Zementleime mit Luftporen sind in Tabelle 12 dokumentiert. Da der Basis-Zementleim ein sehr hohes Fließvermögen aufwies (vgl. Abschnitt 6.3.1), waren nahezu keine Verdichtungsporen zu erwarten. Der ermittelte Luftgehalt von $v_{Luft} < 1,0$ Vol.-% erschien daher plausibel. Dabei stimmten der rechnerisch und nach

DIN EN 12350-7 [10] ermittelte Luftgehalt mit 0,8 bzw. 0,5 Vol.-% annähernd überein. Wie anhand der geringen Abweichungen zwischen den rechnerisch ermittelten Luftgehalten und den Soll-Luftgehalten ($|\Delta v_{\text{Luft}}| \leq 1,0$ Vol.-%, vgl. Tabelle 12) deutlich wird, konnten die angestrebten Luftgehalte sehr präzise über die Frischrohddichte eingestellt werden.

Tabelle 12: Rechnerische Luftgehalte des Basis-Zementleims und der Zementleime mit Luftporen.

Bezeichnung	Rechnerischer Luftgehalt v_{Luft} [Vol.-%]	
	Soll	Ist
ZS-0	0	0,8 (0,5 ^{*)})
ZS-L40	40,0	40,9
ZS-L50	50,0	49,7
ZS-L60	60,0	59,0

^{*)} bestimmt nach DIN EN 12350-7 [10]

Zur Überprüfung des EPS-Gehaltes v_{EPS} am Zementleim, wurde dieser ebenfalls rechnerisch über die Frischrohddichte nach Gleichung (5) ermittelt. Dabei wurde angenommen, dass der Luftgehalt der Zementleime mit EPS-Perlen dem des Basis-Zementleims entsprach.

$$v_{\text{EPS}} = \left(\frac{\rho_f - \rho_{f,ZS-0}}{\rho_{a,EPS} - \rho_{f,ZS-0}} \right) \cdot 100 \quad (5)$$

mit:	v_{EPS}	rechnerischer EPS-Gehalt	[Vol.-%]
	ρ_f	Frischrohddichte des Zementleims inkl. EPS-Perlen	[kg/m ³]
	$\rho_{f,ZS-0}$	Frischrohddichte des Basis-Zementleims (ZS-0) ($\rho_{f,ZS-0} = 1.641$ kg/m ³ , vgl. Tabelle 11)	[kg/m ³]
	$\rho_{a,EPS}$	Kornrohddichte der EPS-Perlen ($\rho_{a,EPS-0,5/1 \text{ mm}} = 21,2$ kg/m ³ , $\rho_{a,EPS-1/2 \text{ mm}} = 27,6$ kg/m ³ , vgl. Tabelle 10)	[kg/m ³]

Die rechnerisch ermittelten EPS-Gehalte sind in Tabelle 12 angegeben. Diese wichen mit $|\Delta v_{\text{EPS}}| \leq 1,5$ Vol.-% ebenfalls nur geringfügig von den angestrebten EPS-Gehalten ab.

Tabelle 13: Rechnerische EPS-Gehalte der Zementleime mit EPS-Perlen.

Bezeichnung	EPS-Gehalt v_{EPS} [Vol.-%]	
	Soll	Ist
ZS-EPS40_0,5/1	40,0	41,5
ZS-EPS50_0,5/1	50,0	51,1
ZS-EPS60_0,5/1	60,0	59,3
ZS-EPS50_1/2	50,0	49,4
ZS-EPS60_1/2	60,0	58,9

6.4 Charakterisierung der Zementsteine

6.4.1 Festrohddichte und relative Porosität

Die Festrohddichte des Zementsteins ρ_s wurde nach DIN EN 12390-7 [104] an jeweils drei Würfelproben (Kantenlänge: 150 mm) unmittelbar vor der Prüfung der Druckfestigkeit nach 28 ± 2 Tagen bestimmt. Die Einzelwerte sind in Tabelle A 19 (Anhang C-I) aufgeführt.

Als weiterer charakteristischer Kennwert wurde die auf den Basis-Zementstein bezogene relative Porosität p_r ermittelt. Diese ergibt sich zu:

$$p_r = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_{s,ZS-0}}\right) \cdot 100 \quad (6)$$

mit:	p_r	relative Porosität	[Vol.-%]
	ρ_s	Festrohddichte des porierten Zementsteins	[kg/m ³]
	$\rho_{s,ZS-0}$	Festrohddichte des Basis-Zementsteins ZS-0	[kg/m ³]
		($\rho_{s,ZS-0} = 1.621 \text{ kg/m}^3$, vgl. Tabelle 14)	

Die gemittelten Festrohddichten und relativen Porositäten sind in Tabelle 14 aufgelistet.

Tabelle 14: Festrohddichten und relative Porositäten der Zementsteine.

Bezeichnung	Festrohddichte ρ_s [kg/m ³]	Relative Porosität p_r [Vol.-%]
ZS-0	1.621	0,0
ZS-L40	947	41,6
ZS-L50	808	50,2
ZS-L60	643	60,3
ZS-EPS40_0,5/1	929	42,7
ZS-EPS50_0,5/1	789	51,3
ZS-EPS60_0,5/1	644	60,3
ZS-EPS50_1/2	801	50,6
ZS-EPS60_1/2	656	59,5

Die Festrohddichten waren etwas kleiner als die Frischrohddichten ($20 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_r - \rho_s \leq 43 \text{ kg/m}^3$). Dies war auf den relativ hohen Wasserzementwert von $w/z = 0,70$ und das damit einhergehende freie, nicht gebundene Wasser zurückzuführen, das teilweise während der Luftlagerung der Proben an die Umgebungsluft abgegeben wurde.

Die relative Porosität und der Luft-/EPS-Gehalt der porierten Zementsteine (vgl. Tabelle 12 und Tabelle 13) stimmten annähernd überein.

6.4.2 Gefüge- und Porenstruktur

Die Gefüge- und Porenstruktur des Zementsteins wurde an Schnittflächen von präparierten Würfelproben untersucht. Dabei wurden Teilbereiche der Schnittflächen unter einem Auflichtmikroskop analysiert.

Die Schnittflächen von Würfelproben der Zementsteine mit rd. 40, 50 und 60 Vol.-% Luftporen sind in Abbildung 65 (oben) dargestellt. Abbildung 65 (unten) zeigt das Zementsteingefüge innerhalb von Teilbereichen der Schnittflächen unter einem Auflichtmikroskop bei 20-facher Vergrößerung.

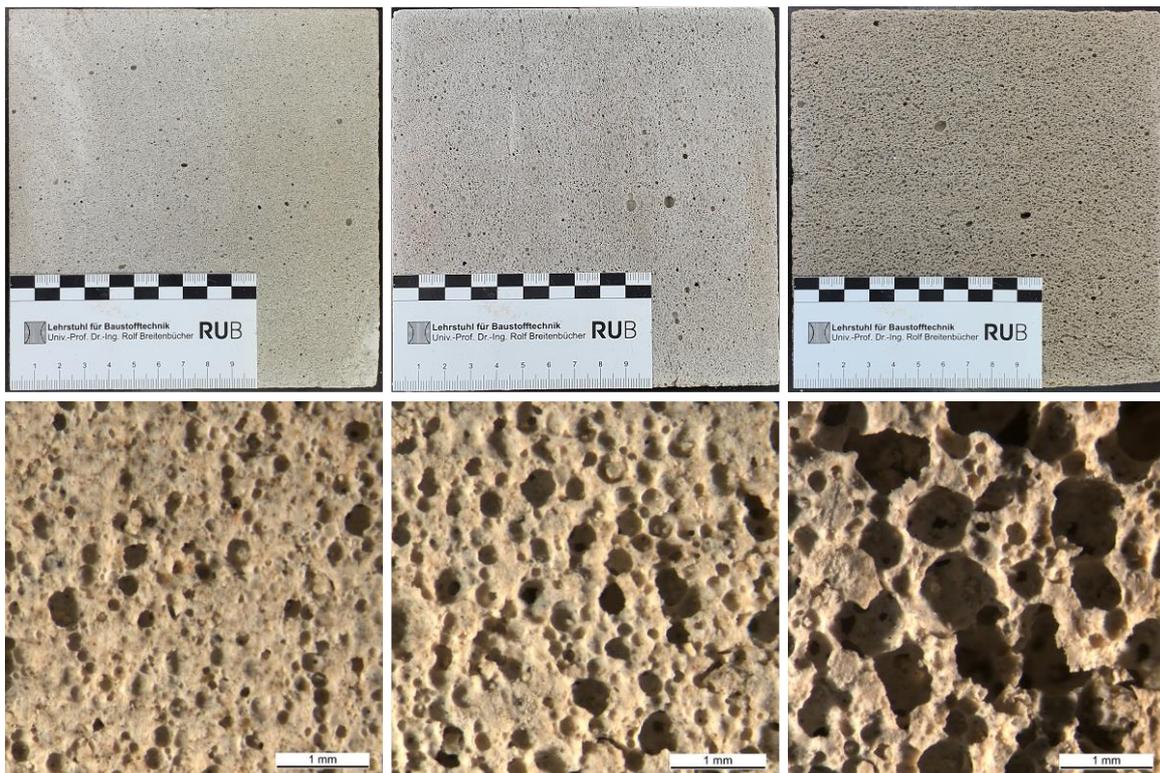


Abbildung 65: Schnittbilder von Würfelproben (oben) und mikroskopische Aufnahmen (20-fache Vergrößerung, Maßstab: 1 mm) von Teilbereichen der Schnittflächen (unten): ZS-L40 (links), ZS-L50 (Mitte) und ZS-L60 (rechts) [105].

Anhand der Schnittbilder konnte augenscheinlich eine gleichmäßige Verteilung der mehr oder weniger kugelförmigen Luftporen über den Querschnitt der Proben festgestellt werden. Bei einem Luftgehalt von rd. 40 Vol.-% (ZS-40) lagen die Luftporen überwiegend als geschlossene Poren vor (vgl. Abbildung 65, unten links). Bei höheren Luftgehalten waren hingegen vermehrt Überschneidungen einzelner Luftporen zu erkennen. Solche Luftporenzusammenschlüsse waren insbesondere für die Porenstruktur des Zementsteins mit einem Luftgehalt von rd. 60 Vol.-% (ZS-L60) charakteristisch (vgl. Abbildung 65, unten rechts). Des Weiteren war anhand der mikroskopischen Gefügaufnahmen qualitativ eine Zunahme der Porendurchmesser mit zunehmenden Luftgehalt zu erkennen (vgl. Abbildung 65, unten).

Für eine grobe Quantifizierung dieser Beobachtung wurden die im Querschnitt sichtbaren Porendurchmesser $\geq 0,03$ mm in Teilbereichen der Schnittflächen unter dem Auflichtmikroskop gemessen. Die Einzelwerte der gemessenen Porendurchmesser sind in Tabelle A 20 bis Tabelle A 22 (Anhang C-I) dokumentiert. Der mittlere Porendurchmesser betrug 0,15 mm für ZS-40, 0,19 mm für ZS-L50 und 0,28 mm für ZS-L60 (Tabelle 15).

Tabelle 15: Luftporendurchmesser der Zementsteine ZS-L40, ZS-L50 und ZS-L60.

Bezeichnung	ZS-L40	ZS-L50	ZS-L60
Anzahl der gemessenen Poren n [-]	199	222	152
min. Porendurchmesser [mm]	0,03	0,03	0,03
max. Porendurchmesser [mm]	0,76	0,81	0,96
Mittlerer Porendurchmesser [mm]	0,15	0,19	0,28

Die absolute und kumulative Porengrößenverteilung sind in Abbildung 66 dargestellt. Wie darin zu erkennen ist, fand mit zunehmendem Luftgehalt eine Verschiebung der Porengrößenverteilung hin zu größeren Porendurchmessern statt. Ähnliche Beobachtungen wurden auch in [5] gemacht.

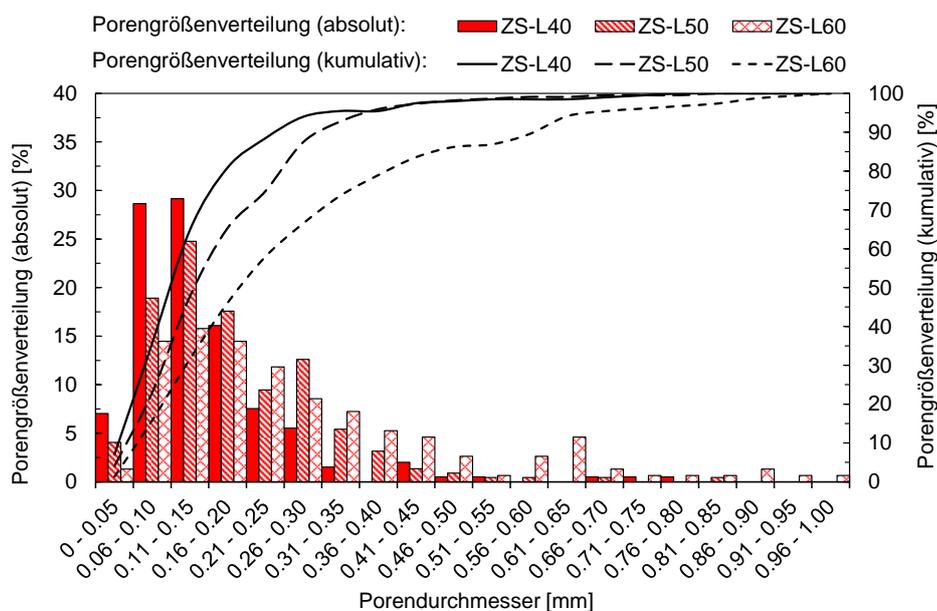


Abbildung 66: Luftporengrößenverteilung der Zementsteine ZS-L40, ZS-L50 und ZS-L60.

Die Schnittflächen von Würfelproben der Zementsteine mit einem EPS-Gehalt von rd. 50 Vol.-% und einer EPS-Korngröße von 0,5/1 mm bzw. 1/2 mm sind in Abbildung 67 dargestellt. Augenscheinlich war eine homogene Verteilung der EPS-Perlen erkennbar, d. h. es wurden keine Anzeichen für ein Aufschwimmen der EPS-Perlen festgestellt. Dies traf auch auf die weiteren Zementsteine mit EPS-Perlen zu.

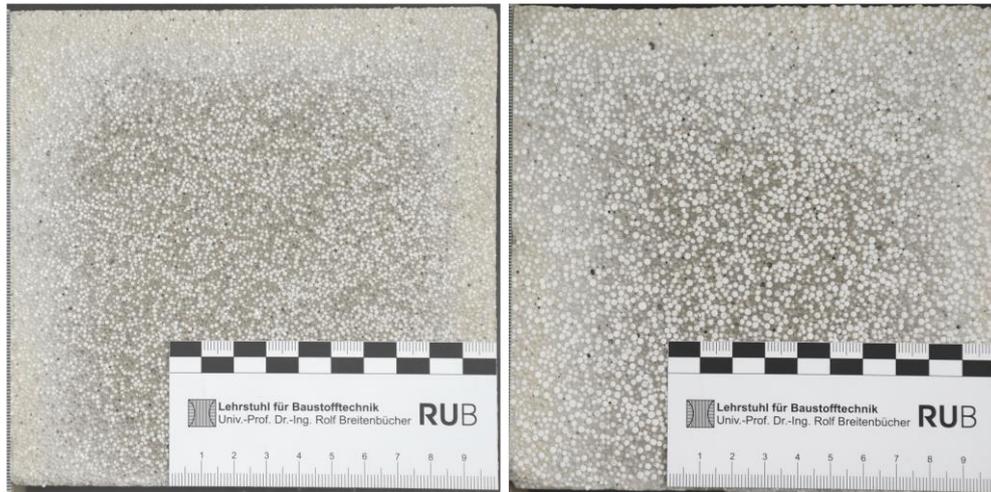


Abbildung 67: Schnittbilder von Würfelproben der Zementsteine ZS-EPS50_0,5/1 (links) und ZS-EPS50_1/2 (rechts).

Abbildung 68 zeigt lichtmikroskopische Gefügaufnahmen (10-fache Vergrößerung) der Zementsteine mit einer EPS-Korngröße von 0,5/1 mm und einem EPS-Gehalt von rd. 40, 50 und 60 Vol.-%. Beim Schneiden der Proben kam es in den Schnittflächen teilweise zu einem Herauslösen einzelner EPS-Perlen. Dennoch ist in Abbildung 68 deutlich zu erkennen, dass die Abstände zwischen den EPS-Perlen (d. h. die Stegdicken des Zementsteins) mit zunehmendem EPS-Gehalt abnahmen. Bei einem EPS-Gehalt von rd. 60 Vol.-% (ZL-EPS60_0,5/1), der nur geringfügig unter dem Verhältnis zwischen der Schütt- und Rohdichte der EPS-Perlen lag, stellte sich annähernd ein haufwerksporiges Gefüge ein, wobei die Haufwerksporen vollständig mit Zementstein gefüllt waren. Die EPS-Korngrößenverteilung kann den jeweiligen Sieblinien entnommen werden (Tabelle A 8, Anhang A) und wurde anhand der Schnittflächen nicht genauer untersucht.

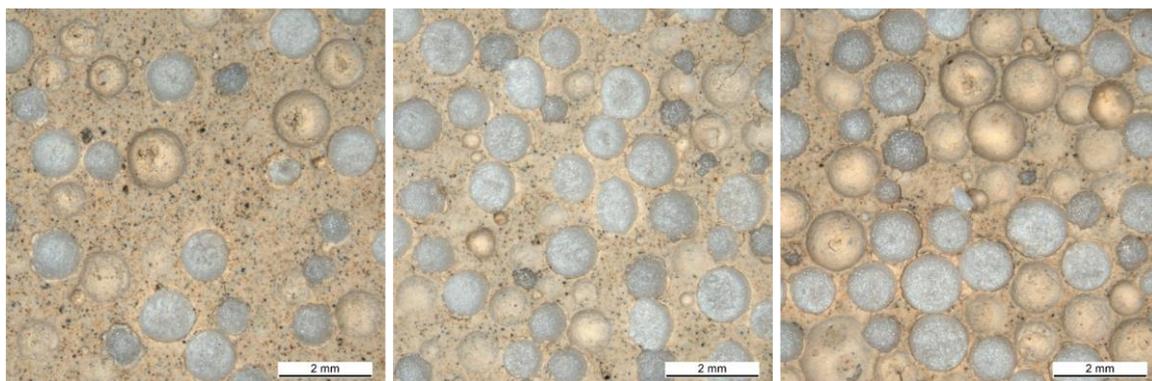


Abbildung 68: Mikroskopische Aufnahmen (10-fache Vergrößerung, Maßstab: 2 mm) von Teilbereichen der Schnittflächen der Zementsteine ZL-EPS40_0,5/1 (links), ZL-EPS50_0,5/1 (Mitte) und ZL-EPS60_0,5/1 (rechts).

Ein Vergleich zwischen den Gefügestrukturen in Abhängigkeit der Porengröße (Luftporen/EPS-Perlen) ist in Abbildung 69 exemplarisch für einen Luft-/EPS-Gehalt von rd. 50 Vol.-% dargestellt (20-fache Vergrößerung).

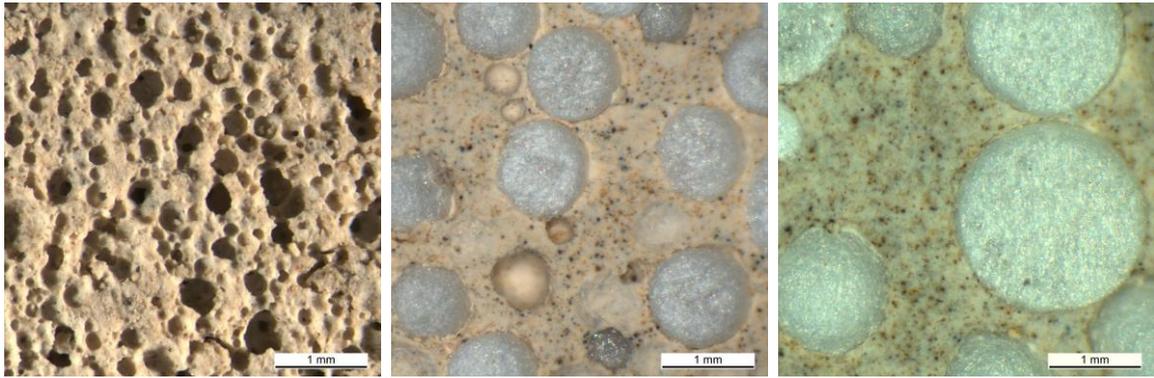


Abbildung 69: Mikroskopische Aufnahmen (20-fache Vergrößerung, Maßstab: 1 mm) von Teilbereichen der Schnittflächen der Zementleime ZL-L50 (links), ZL-EPS50_0,5/1 (Mitte) und ZL-EPS50_1/2 (rechts).

Auch wenn die einzelnen Stegdicken variierten, ist anhand dieses Vergleichs zu erkennen, dass die mittlere Stegdicke des Zementsteins mit zunehmender Porengröße tendenziell zunahm. Zur Abschätzung der mittleren Stegdicke in Abhängigkeit des Luft-/EPS-Gehaltes bzw. der Porengröße wurde eine vereinfachte zweidimensionale Modellbetrachtung angestellt. Das verwendete Modell ist in Abbildung 70 dargestellt.

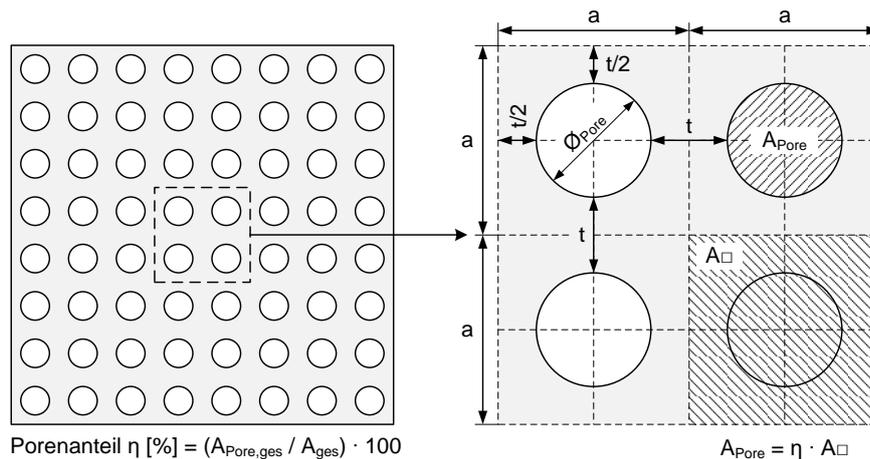


Abbildung 70: Zweidimensionales Modell zur Ermittlung der mittleren Stegdicke in Abhängigkeit des Porengehaltes (Luft-/EPS-Gehaltes) bzw. der Porengröße.

Bei der Modellbetrachtung wurden folgende Annahmen getroffen:

- Alle Poren weisen einen ideal kreisförmigen Querschnitt mit gleichem Durchmesser auf.
- Die Poren sind in einem quadratischen Raster angeordnet, d. h. benachbarte Poren weisen stets den gleichen Abstand zueinander auf.
- Der Porenanteil η im Modellquerschnitt entspricht dem Luft-/EPS-Gehalt des Zementsteins.

Damit ergibt sich die mittlere Stegdicke t im Modell zu:

$$t = \phi_{Pore} \cdot \left(0,5 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{(\eta/100)} - 1} \right) \quad (7)$$

mit:	t	(mittlere) Stegdicke	[mm]
	$\varnothing_{\text{Pore}}$	(mittlerer) Porendurchmesser	[mm]
	η	Porenanteil	[%]

Der Zusammenhang zwischen der mittleren Stegdicke und dem mittleren Porendurchmesser bzw. dem Luft-/EPS-Gehalt nach Gleichung (7) ist in Abbildung 71 grafisch dargestellt.

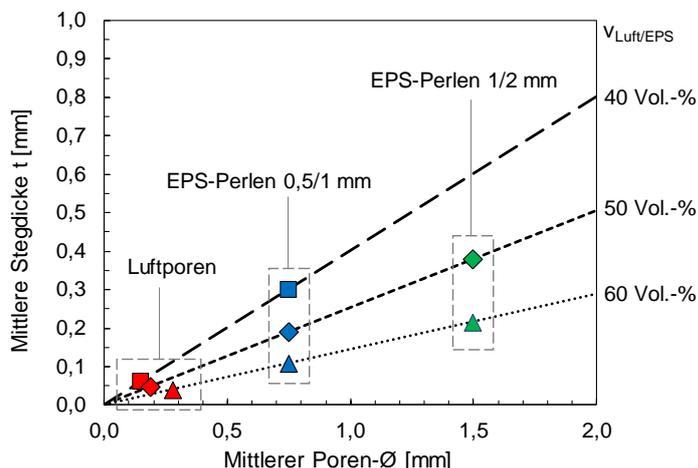


Abbildung 71: Mittlere Stegdicke in Abhängigkeit des mittleren Porendurchmessers und des Luft-/EPS-Gehaltes.

Die berechneten und in Abbildung 71 markierten mittleren Stegdicken für Luft-/EPS-Gehalte von 40, 50 und 60 Vol.-% sind in Tabelle 16 aufgeführt. Für die Luftporen wurden die mittleren Porendurchmesser nach Tabelle 15 angesetzt. Für die EPS-Perlen wurde ein mittlerer Porendurchmesser von 0,75 mm (EPS-Perlen 0,5/1 mm) bzw. 1,5 mm (EPS-Perlen 1/2 mm) angenommen.

Tabelle 16: Stegdicke in Abhängigkeit des Luft-/EPS-Gehaltes (Modellrechnung).

Luft-/EPS-Gehalt [Vol.-%]	Stegdicke [mm]		
	Luftporen	EPS-Perlen	
		0,5/1 mm	1/2 mm
40	0,06	0,30	-
50	0,05	0,19	0,38
60	0,04	0,11	0,22

Durch die vereinfachte zweidimensionale Modellrechnung konnte bestätigt werden, dass die mittlere Stegdicke zum einen mit zunehmender Porengröße zunahm und zum anderen mit zunehmendem Luft-/EPS-Gehalt abnahm. Die Abnahme der mittleren Stegdicke mit zunehmendem Luft-/EPS-Gehalt war dabei umso größer, je größer der mittlere Porendurchmesser war. Aufgrund der sehr geringen Porendurchmesser der Luftporen ($< 0,3$ mm) waren die Abweichungen zwischen den berechneten mittleren Stegdicken in Abhängigkeit des Luftgehaltes marginal. Hingegen nahmen die mittleren Stegdicken im Falle der EPS-Perlen aufgrund der deutlich größeren Porendurchmesser mit zunehmendem EPS-Gehalt signifikant ab.

Es sei darauf hingewiesen, dass die ermittelten mittleren Stegdicken (Abbildung 71 und Tabelle 16) aufgrund der vereinfachten zweidimensionalen Modellbetrachtung nicht mit den tatsächlichen Stegdicken im Zementstein übereinstimmen. Die aufgezeigten Tendenzen treffen allerdings auch für den räumlichen Fall zu.

6.4.3 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit wurde nach DIN EN 12390-3 [106] an jeweils drei Würfelproben (Kantenlänge: 150 mm) im Alter von 28 ± 2 Tagen bestimmt. Die Einzelwerte der Druckfestigkeiten sind in Tabelle A 19 (Anhang C-I) dokumentiert. Die Mittelwerte der Würfeldruckfestigkeiten $f_{cm,cube}$ sind in Tabelle 17 angegeben und in Abhängigkeit der relativen Porosität bzw. Festrohddichte in Abbildung 72 dargestellt.

Tabelle 17: Würfeldruckfestigkeiten der Zementsteine.

Bezeichnung	Druckfestigkeit $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]
ZS-0	23,1
ZS-L40	4,20
ZS-L50	2,61
ZS-L60	1,30
ZS-EPS40_0,5/1	5,18
ZS-EPS50_0,5/1	3,59
ZS-EPS60_0,5/1	2,22
ZS-EPS50_1/2	4,38
ZS-EPS60_1/2	2,88

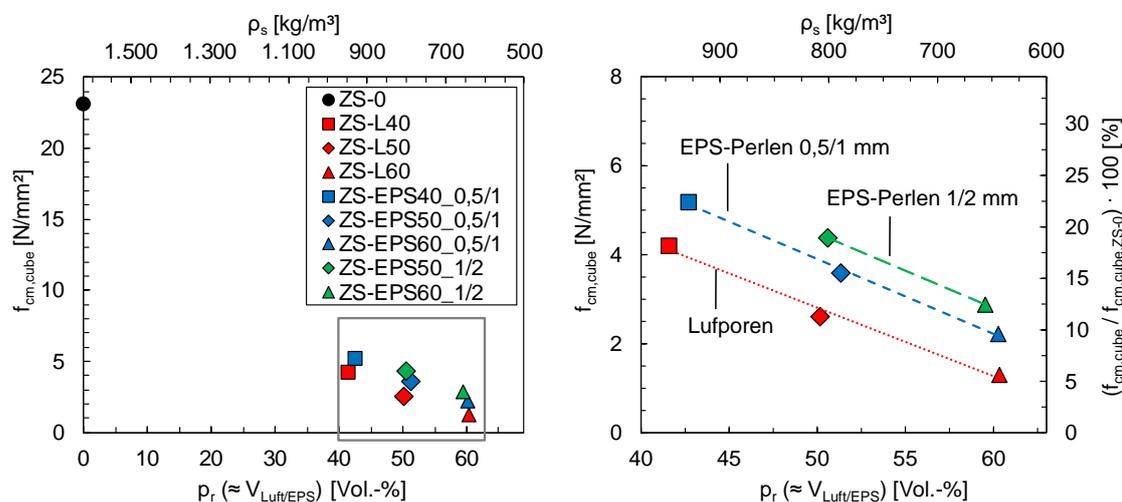


Abbildung 72: Druckfestigkeit der Zementsteine in Abhängigkeit der relativen Porosität bzw. Festrohddichte.

Die Druckfestigkeit des Basis-Zementsteins betrug 23,1 N/mm². Erwartungsgemäß führte die starke Porosierung des Zementsteins zu einer erheblichen Abminderung der Druckfestigkeit. Für die Zementsteinvarianten mit einem Luft-/EPS-Gehalt zwischen rd. 40 und 60 Vol.-% lagen die Druckfestigkeiten zwischen 1,30 und 5,18 N/mm². Verglichen mit dem Basis-Zementstein entspricht dies einem Rückgang in der Druckfestigkeit um rd. 78 bis 94 %. Innerhalb der untersuchten

Grenzen konnte sowohl für die Zementsteine mit Luftporen als auch für die mit EPS-Perlen eine nahezu lineare Abnahme der Druckfestigkeit mit zunehmender relativer Porosität (d. h. mit zunehmendem Luft-/EPS-Gehalt) bzw. abnehmender Festrohdichte festgestellt werden (vgl. Abbildung 72, rechts). Allerdings waren die Druckfestigkeiten der Zementsteine mit EPS-Perlen im Vergleich zu denen mit Luftporen bei annähernd gleicher relativer Porosität bzw. Festrohdichte um rd. $1,0 \text{ N/mm}^2$ (EPS-Perlen 0,5/1 mm) bzw. $1,5 \text{ N/mm}^2$ (EPS-Perlen 0,5/1 mm) größer. Da die EPS-Perlen unabhängig von der Korngröße keine nennenswerte Festigkeit besitzen (vgl. Tabelle 6, Abschnitt 5.2.6) lässt sich unter Einbezug der Ergebnisse der Gefügeuntersuchungen (vgl. Abschnitt 6.4.2) ableiten, dass die Zunahme der Druckfestigkeit mit zunehmendem Porendurchmesser auf die damit einhergehende Zunahme der Stegdicken des Zementsteins zurückzuführen war.

6.5 Stauchversuche

Das Stauchverhalten des Zementsteins wurde in einachsigen Druckversuchen an Würfelproben (Kantenlänge: 150 mm) mit Querdehnungsbehinderung untersucht. Der hierfür verwendete Versuchsstand ist in Abbildung 73 und Abbildung 74 dargestellt. Dieser wurde in Anlehnung an eine in [66, 68, 68-73, 91] verwendete Versuchsanordnung der *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)* entwickelt.

Den Grundkörper des Versuchsstands bildet eine steife monolithische Stahlmatrize (2). In den seitlichen Aussparungen der Stahlmatrize sind Schieber-Elemente mit vertikalen Lastplatten (3) geführt. An den Außenseiten der Stahlmatrize sind durch Schrauben (M18) vorgespannte Spannbacken (5) befestigt, in denen die vier horizontal und nach innen ausgerichteten Horizontal-Druckstempel (4) montiert sind. Diese können über Feingewinde in ihrer Achsrichtung justiert werden, sodass die Schieber-Elemente mit den vertikalen Lastplatten an den zentrisch platzierten Probekörper (1) angefahren werden können. Die vertikalen Lastplatten sind seitlich gefast (vgl. Abbildung 73), wodurch ein Kontakt zwischen den benachbarten Lastplatten vermieden wird. Die Breite der Kontaktflächen beträgt 148 mm. Der Deckel (6) schließt den Versuchsstand nach oben hin ab und dient zusätzlich als obere Führung der Schieber-Elemente.

Alle Bauteile des Versuchsstands wurden aus hochfestem Stahl gefertigt. Mittels CNC-Frästechnik konnten bei der Fertigung der Einzelbauteile Maßtoleranzen von wenigen Hundertstelmillimeter eingehalten werden. Sämtliche Kontaktflächen der Bauteile (Schieber-Element/Stahlmatrize, Messdruckstempel/Schieber-Element etc.) wurden feingeschliffen und oberflächengehärtet. Details des Versuchsstands (Abmessungen, Materialien, Flächenbearbeitung, Verbindungsmittel etc.) können den Bauteilplänen entnommen werden (Anhang E).

Vor Versuchsbeginn wurden die seitlichen Lastplatten mit einem PTFE-Spray benetzt, um potenzielle Reibungseffekte zu minimieren. Durch die Justierung der jeweils gegenüberliegenden Horizontal-Druckstempel wurden die seitlichen Lastplatten bis zum Kontaktschluss mit der zentrisch im Versuchsstand eingebauten Probe angefahren. Die Belastung wurde nahezu vollflächig über ei-

nen quadratischen Druckstempel mit einer Kantenlänge von 148 mm von oben in die Probe einge-
leitet. Die Kantenlänge der Lasteinleitungsfläche wurde gegenüber der Würfelproben um 2 mm
reduziert, um keine Reibung zwischen dem Druckstempel und den seitlichen Lastplatten zu gene-
rieren und ein potenzielles Verkanten des Druckstempels zu vermeiden. Somit lag ein umlaufendes
Spaltmaß zwischen der Außenkante des Druckstempels und den seitlichen Lastplatten von 1,0 mm
vor.

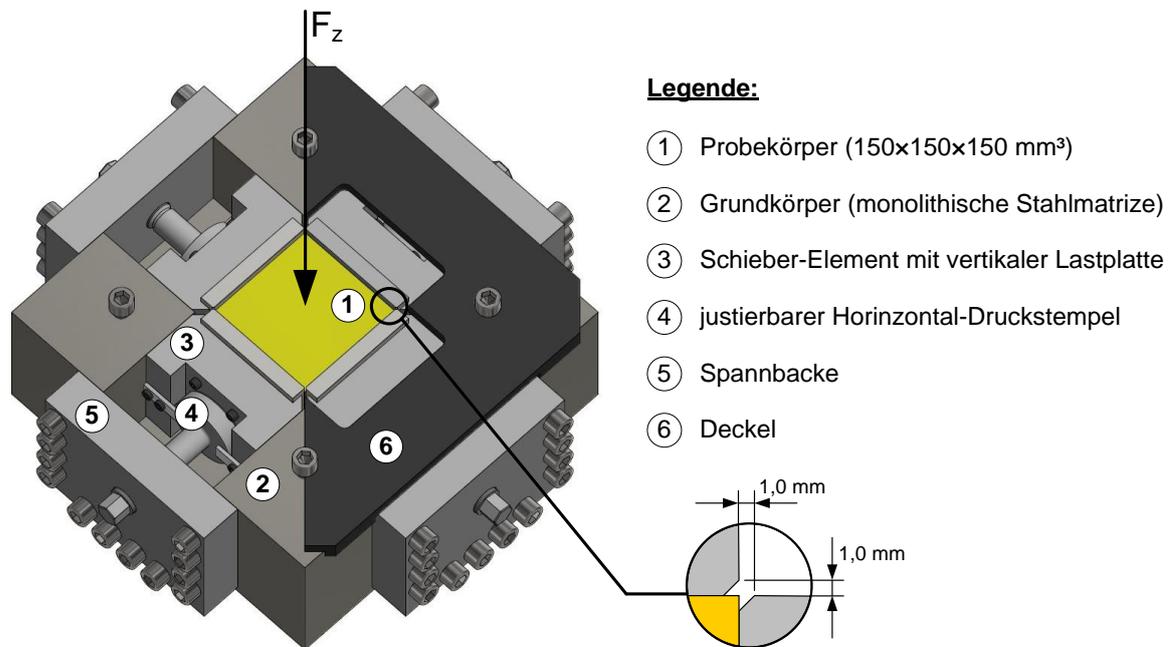


Abbildung 73: 3D-Darstellung des Versuchsstands für einachsige Druckversuche an Würfelproben mit Querdehnungsbehinderung, entwickelt in Anlehnung an [66, 68, 68-73, 91].

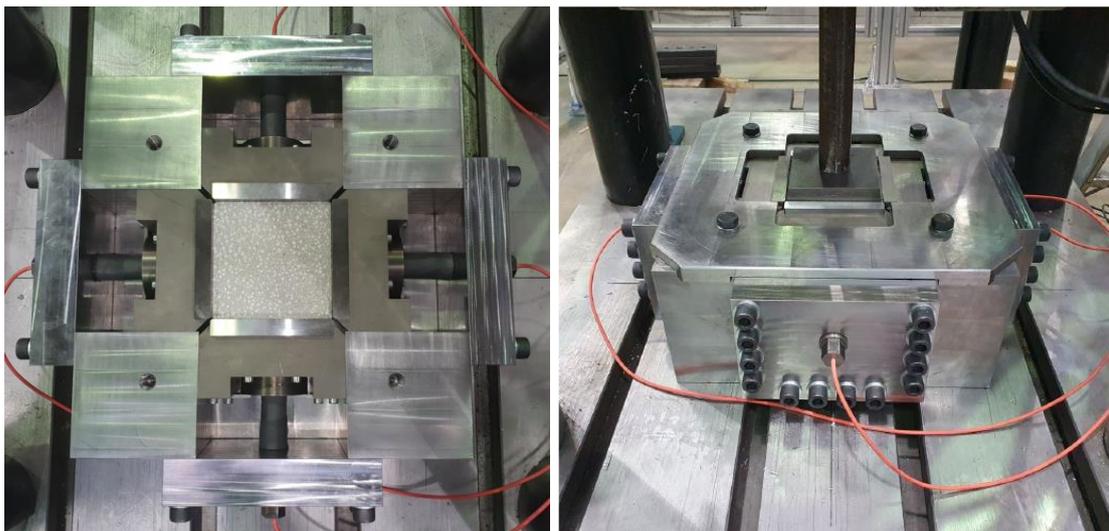


Abbildung 74: Fotos des Versuchsstands für einachsige Druckversuche an Würfelproben mit Querdehnungsbehinderung: Draufsicht ohne Deckel (links), Ansicht während eines Stauchversuchs [105] (rechts).

Die maximale Lastkapazität der verwendeten Prüfmaschine betrug 400 kN. Die Versuche wurden weggeregelt mit einer Geschwindigkeit von 20 mm/min durchgeführt. Der Weg des Druckstempels wurde zum einen über den Kolbenweg der Prüfmaschine und zum anderen über induktive Wegaufnehmer erfasst. Bei Erreichen einer Kraft von $F_{z,max} = 380 \text{ kN}$ ($\triangleq \sigma_{z,max} = 17,4 \text{ N/mm}^2$) wurden die Versuche automatisch beendet. Für jede Zementsteinvariante wurden Stauchversuche an zwei bzw. drei Proben (für ZS-L50 an sechs Proben) im Alter von 28 ± 2 Tagen durchgeführt. Für die nachfolgenden Analysen des Stauchverhaltens wurden die aus den Einzelkurven gemittelten Spannungs-Stauchungskurven herangezogen. Die ermittelten Einzelkurven sind in Anhang D-I dargestellt.

6.6 Stauchverhalten

6.6.1 Charakteristisches Spannungs-Stauchungsverhalten

Alle der hier untersuchten porosierten Zementsteinvarianten zeigten unter identischen Versuchsrandbedingungen ein qualitativ sehr ähnliches Spannungs-Stauchungsverhalten. Dieses wird nachfolgend zunächst am Beispiel des Zementsteins mit rd. 50 Vol.-% Luftporen (ZS-L50) beschrieben und dem des nicht-porosierten Basis-Zementsteins (ZS-0) gegenübergestellt. Die gemittelten Spannungs-Stauchungskurven dieser Zementsteine sind in Abbildung 75 dargestellt.

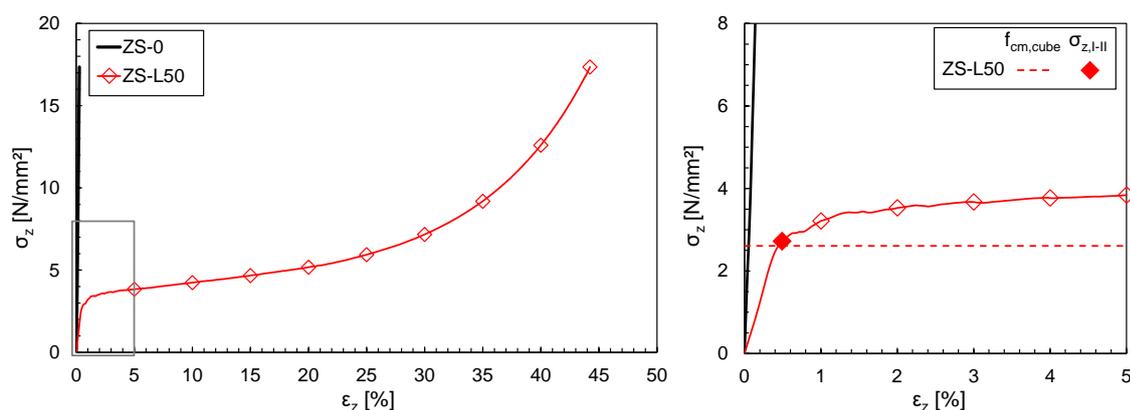


Abbildung 75: Spannungs-Stauchungskurven des Basis-Zementsteins (ZS-0) und des Zementsteins mit rd. 50 Vol.-% Luftporen (ZS-L50) im Stauchungsbereich von 0 bis 50 % (links) und 0 bis 5 % Stauchung (rechts).

Die Spannungs-Stauchungskurve des Basis-Zementsteins war erwartungsgemäß von Belastungsbeginn bis zum Versuchsende durch einen steilen, annähernd linearen Anstieg gekennzeichnet. Die Steifigkeit des Basis-Zementsteins wurde anhand der mittleren Steigung der Kurve bis zum Versuchsende bestimmt ($E_{int,ZS-0} = \sigma_{z,max}/\epsilon_{z,max}$) und betrug 6.426 N/mm^2 . Dieser Wert liegt in einer üblichen Größenordnung für den E-Modul von Zementstein mit vergleichbarer Zementart bzw. -festigkeit (CEM I 42,5 R) und einem Wasserzementwert von $w/z = 0,70$ [38].

Die maximale Spannung bei Versuchsende ($\sigma_{z,max} = 17,4 \text{ N/mm}$) lag noch deutlich unterhalb der einachsigen Druckfestigkeit von $f_{cm,cube} = 23,1 \text{ N/mm}^2$ (vgl. Tabelle 17). Bei einer weiteren Belas-

tungserhöhung wäre ein weiterer Spannungsanstieg bis zum Erreichen der Druckfestigkeit zu erwarten. Des Weiteren wäre aufgrund der Querdehnungsbehinderung durch die äußere Umschnürung der Probenhalterung, selbst bis zu einer gewissen Belastungserhöhung über die Druckfestigkeit hinaus, kein abrupter Spannungsabfall eingetreten. Da der Fokus auf dem Stauchverhalten des porosierten Zementsteins lag, wurde das Spannungs-Stauchungsverhalten des Basis-Zementsteins nicht weitergehend untersucht. Im Vergleich zur Spannungs-Stauchungskurve des porosierten Zementsteins ZS-L50 wird jedoch deutlich, dass der Basis-Zementstein im betrachteten Spannungsbereich aufgrund seines dichten Gefüges durch ein annähernd linear-elastisches Stauchungsverhalten bei gleichzeitig sehr geringem Stauchpotenzial charakterisiert war.

Die starke Porosierung des Basis-Zementsteins führte zu einem deutlich davon abweichenden Spannungs-Stauchungsverhalten. Dieses entsprach weitgehend dem für zelluläre Werkstoffe typischen Spannungs-Stauchungsverhalten unter einachsiger Druckbelastung, das durch die drei charakteristischen Bereiche (I: linear-elastischer Bereich, II: plastischer Bereich, III: Verfestigungsbereich) gekennzeichnet ist (vgl. Abbildung 25, Abschnitt 2.3.2).

Nach Belastungsbeginn zeigte die Spannungs-Stauchungskurve des Zementsteins ZS-L50 ebenfalls zunächst einen relativ steilen, annähernd linearen Spannungsanstieg (linear-elastischer Bereich). Anhand der im Vergleich zum Basis-Zementstein geringeren Steigung in diesem Bereich ist allerdings zu erkennen, dass die Porosierung mit einer deutlichen Abnahme der initialen Materialsteifigkeit einherging (vgl. Abbildung 75, rechts). Dies war maßgeblich auf den reduzierten effektiven Materialquerschnitt (d. h. Querschnittsanteil des dichten Zementsteins) zurückzuführen. Die über die mittlere Steigung der Spannungs-Stauchungskurve bis zum Erreichen der Grenzspannung $\sigma_{z,I-II}$ (Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich) ermittelte initiale Steifigkeit ($E_{int} = \sigma_{z,I-II}/\varepsilon_{z,I-II}$) betrug 547 N/mm^2 . Bezogen auf den des Basis-Zementsteins entspricht dies einem Steifigkeitsabfall von $91,5 \%$.

Die Grenzspannung $\sigma_{z,I-II}$ betrug $2,72 \text{ N/mm}^2$ und lag damit geringfügig über der einachsigen Druckfestigkeit dieser Zementsteinvariante von $f_{cm,cube} = 2,61 \text{ N/mm}^2$ ($\sigma_{z,I-II}/f_{cm,cube} = 1,04$). Die aus der Stauchung in Belastungsrichtung resultierende Querdehnung wurde durch die äußere Umschnürung der Probenhalterung vollständig behindert. Infolgedessen stellten sich dreiaxiale Spannungszustände in der Probe ein. Während solche Spannungszustände bei Normal- und Leichtbeton eine deutliche Steigerung der Festigkeit bewirken können, ist dieser Effekt für Zementstein hingegen nur sehr geringfügig ausgeprägt (vgl. Abschnitt 2.2.5 und 2.2.6). Demzufolge lag die Grenzspannung des Zementsteins ZS-L50 nur marginal über der einachsigen Druckfestigkeit. Ähnliche Ergebnisse zeigten sich auch für die anderen Zementsteinvarianten (vgl. Abschnitt 6.6.2)

Das plötzliche Abflachen der Spannungs-Stauchungskurve nach Überschreiten der Grenzspannung deutete auf erste lokale Bruchvorgänge im Gefüge des porosierten Zementsteins in Form eines Ausknickens einzelner Porenstege hin. Infolge der Querdehnungsbehinderung durch die Probenhalterung wurde eine ausgeprägte Rissbildung jedoch unterdrückt. Dadurch wurde ein Versagen der Probe verhindert und es stellte sich ein plastisches Stauchverhalten ein.

Global betrachtet war der plastische Bereich durch vergleichsweise große Stauchungen bei einem gleichzeitig mäßigen Spannungsanstieg gekennzeichnet. Bei genauerer Betrachtung war nach Überschreiten der Grenzspannung zunächst eine degressive Spannungszunahme zu erkennen (vgl. Abbildung 75, rechts), bis diese bei einer Stauchung von ca. 5 % ihr Minimum erreicht hatte. Bei einer Stauchung von $\epsilon_z = 5\%$ betrug die Spannung das rd. 1,4-fache der Grenzspannung. Der degressive Kurvenverlauf deutete auf die zunehmenden bzw. fortschreitenden Bruchvorgänge hin, die in diesem Bereich zu einer Abnahme des Widerstands gegen die aufgebrauchte Stauchung führten.

Aufgrund der Querdehnungsbehinderung kam es im plastischen Bereich neben weiteren Bruchvorgängen zu Porenquetschungen und damit zu einer Verdichtung des Materials. Bis zu einer Stauchung von ca. 20 % führten die sich überlagernden Bruch- und Verdichtungsvorgänge zu einem sehr mäßigen und annähernd linearen Spannungsanstieg. Die Spannung bei $\epsilon_z = 20\%$ war nur um das 1,3-fache größer als die Spannung bei $\epsilon_z = 5\%$.

Mit zunehmender Stauchung konnte schließlich ein Verfestigungseffekt beobachtet werden, der durch einen progressiven Spannungszuwachs bis zum Versuchsende gekennzeichnet und auf die zunehmende Materialverdichtung zurückzuführen war. Bis zum Erreichen der maximalen Spannung von $\sigma_{z,max} = 17,4\text{ N/mm}^2$ konnte eine Stauchung von $\epsilon_{z,max} = 44,2\%$ aufgebracht werden. Anhand des Kurvenverlaufs lässt sich mit weiter zunehmender Stauchung ein noch deutlich steilerer Spannungsanstieg prognostizieren.

Zur genaueren Analyse der mit der Stauchung einhergehenden Verdichtungs- und Verfestigungseffekte wurden die Struktur- und Gefügeänderungen des Zementsteins nach verschiedenen Stauchungsstufen untersucht. Die Schnittbilder und lichtmikroskopischen Gefügebildungen (20-fache Vergrößerung) von Würfelproben des Zementsteins ZS-L50 vor ($\epsilon_z = 0\%$) und nach einem Stauchversuch ($\epsilon_z = 44,2\%$) sind in Abbildung 76 dargestellt.

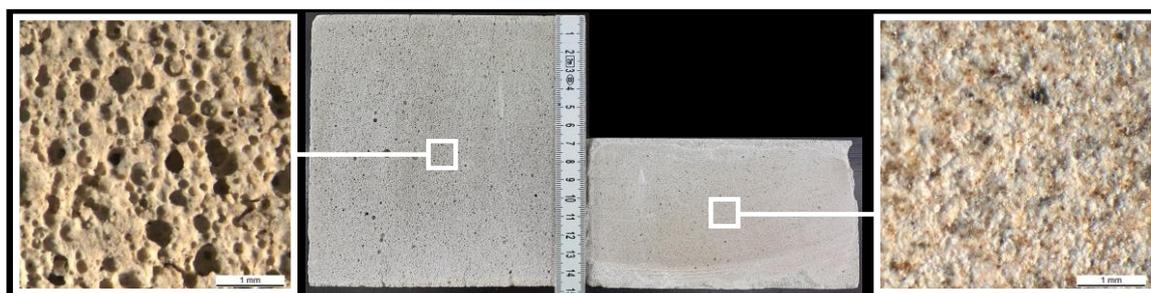


Abbildung 76: Schnittbilder und lichtmikroskopische Gefügebildungen (20-fache Vergrößerung, Maßstab 1 mm) von Würfelproben des Zementsteins ZS-L50 bei einer Stauchung von 0 % (links) einer Stauchung von rd. 44 % (rechts) [105].

Wie anhand der Schnittbilder zu erkennen ist, fand infolge der vollflächigen Belastung eine mehr oder weniger gleichmäßige Stauchung über die Höhe und Querschnittsfläche der Probe statt. Das stark porosierte Gefüge der ungestauchten Probe wird anhand der relativ gleichmäßig verteilten und mehr oder weniger kugelförmigen Luftporen mit einem mittleren Durchmesser von ca. 0,19 mm

(vgl. auch Abschnitt 6.4.2) deutlich (vgl. Abbildung 76, links). Im Vergleich dazu ist am Gefüge der bis $\varepsilon_z = 44,2\%$ gestauchten Probe zu erkennen, dass die Luftporen auf ein Bruchteil ihres Ausgangsvolumens komprimiert wurden. Diese waren bei gleicher Vergrößerung unter dem Auflichtmikroskop kaum noch erkennbar (vgl. Abbildung 76, rechts). Diese Beobachtung ließ sich auch auf die Zementsteinvarianten mit EPS-Perlen übertragen, bei denen die Poren anstatt mit Luft mit EPS gefüllt waren. Die zunehmende Stauchung führte neben einer sukzessiven Schädigung des Zementsteingefüges dementsprechend auch zu einer Reduktion des Porenvolumens (Luftporen/mit EPS gefüllte Poren). Da sich der dichte Zementstein weitgehend volumeninkompressibel verhält, nahm das Porenvolumen proportional zur aufgetragenen Stauchung ab. Die Reduktion des Porenvolumens führte ab einem gewissen Restporenvolumen zu der beobachteten Verfestigung in Form des progressiven Spannungszuwachses (vgl. Abschnitt 6.6.2).

Das ursprüngliche Gefüge des Zementsteins wurde durch die massive Stauchung so stark zerstört, dass dieser nach den Versuchen quasi keine technisch nutzbare Festigkeit mehr aufwies. Es ist daher hervorzuheben, dass unter dem Begriff „Verfestigung“ keinesfalls eine Zunahme der Materialfestigkeit oder -steifigkeit, sondern lediglich der progressive Anstieg der Spannungs-Stauchungskurve infolge der Zunahme der Materialdichte zu verstehen ist. Durch das starke Zusammenpressen der Zementsteinpartikel wiesen die Proben nach Versuchsende zwar weiterhin einen gewissen Zusammenhalt auf. Der Ausbau und die Präparation der Proben für weiterführende Untersuchungen (u. a. Gefügeuntersuchungen an Schnittbilder) gestalteten sich jedoch teilweise schwierig, da die Proben in der Regel ohne größere Krafteinwirkung zerbröselten.

6.6.2 Einfluss des Luft-/EPS-Gehaltes

Die gemittelten Spannungs-Stauchungskurven der porisierten Zementsteinvarianten mit rd. 40, 50 und 60 Vol.-% Luftporen sind in Abbildung 77 dargestellt. Analog dazu sind die Ergebnisse der Varianten mit EPS-Perlen 0,5/1 mm bzw. EPS-Perlen 1/2 mm in Abbildung 78 und Abbildung 79 dargestellt.

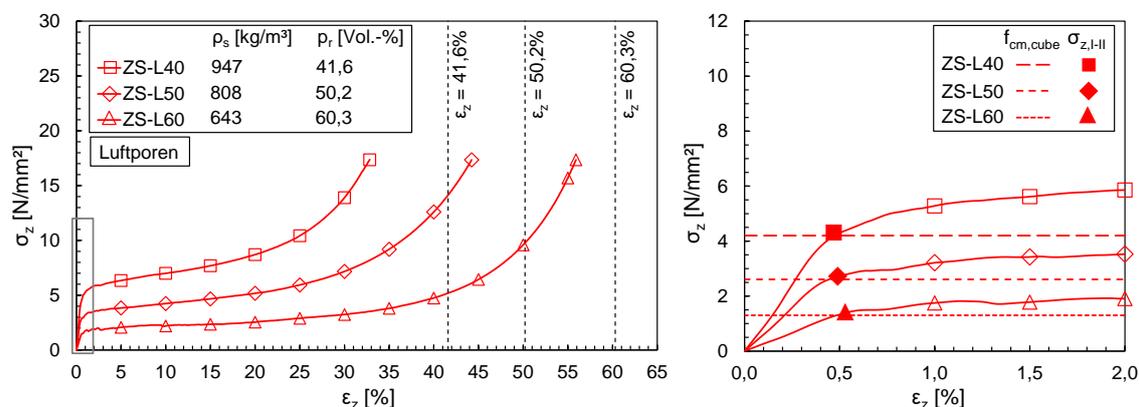


Abbildung 77: Spannungs-Stauchungskurven der Zementsteine mit Luftporen im Stauchungsbereich von 0 bis 65 % (links) bzw. 0 bis 2 % Stauchung (rechts).

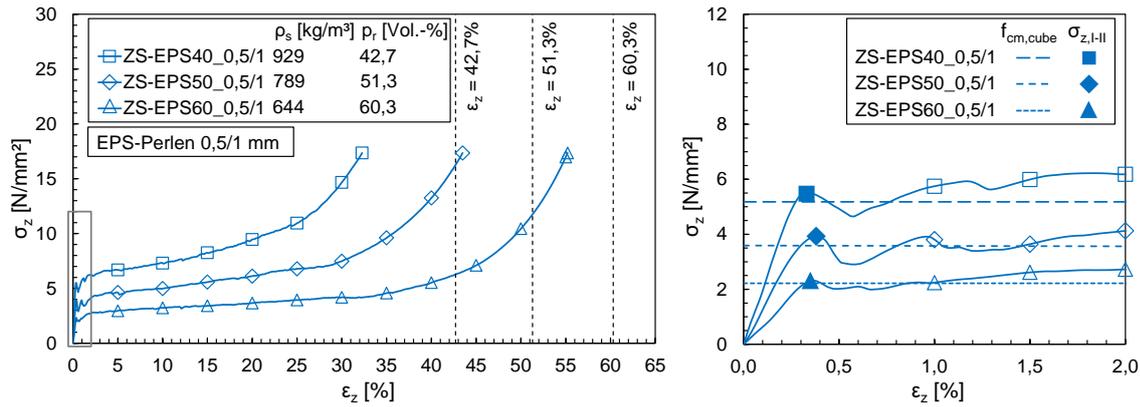


Abbildung 78: Spannungs-Stauchungskurven der Zementsteine mit EPS-Perlen 0,5/1 mm im Stauchungsbereich von 0 bis 65 % (links) bzw. 0 bis 2 % Stauchung (rechts).

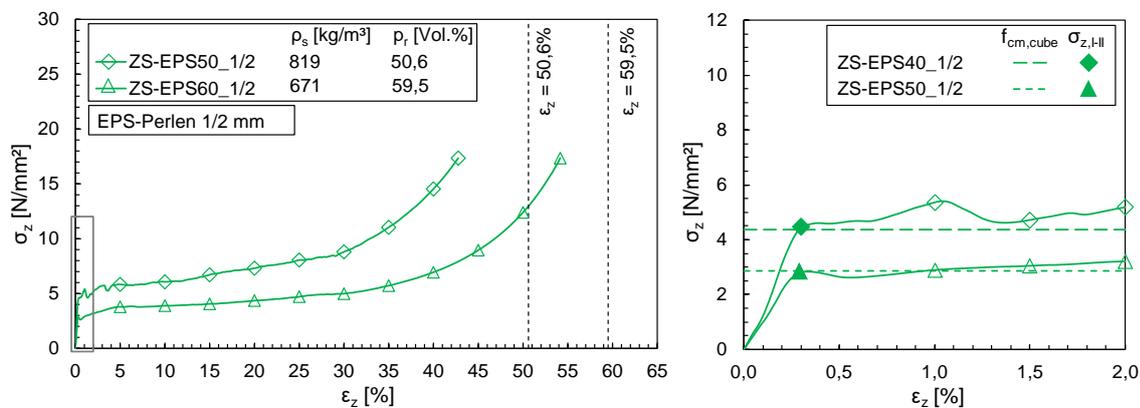


Abbildung 79: Spannungs-Stauchungskurven der Zementsteine mit EPS-Perlen 1/2 mm im Stauchungsbereich von 0 bis 65 % (links) bzw. bis 2 % Stauchung (rechts).

Anhand der Steigungen der Spannungs-Stauchungskurven im elastischen Bereich ist eine Abnahme der initialen Steifigkeit des Zementsteins mit zunehmendem Luft-/EPS-Gehalt zu erkennen (vgl. Abbildung 77 bis Abbildung 79, rechts). Bezogen auf den Basis-Zementstein betrug die Abnahme der initialen Steifigkeit zwischen 74 und 96 %. Innerhalb der untersuchten Grenzen nahm die initiale Steifigkeit mit zunehmender relativer Porosität bzw. abnehmender Festrohdichte nahezu linear ab (Abbildung 80).

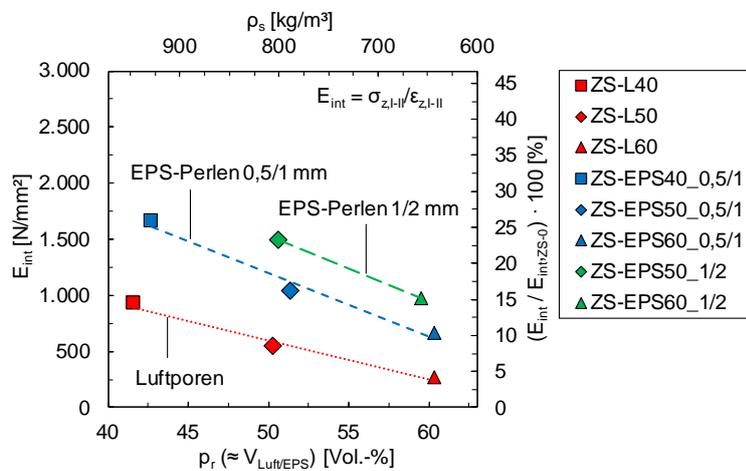


Abbildung 80: Initiale Steifigkeit in Abhängigkeit der relativen Porosität bzw. Festrohdichte.

Eine sehr ähnliche Korrelation sowie Größenordnung ergaben sich auch für die Abnahme der Druckfestigkeit (vgl. Abschnitt 6.4.3). Ebenfalls zeigte sich analog zur Druckfestigkeit, dass die initialen Steifigkeiten der Zementsteinvarianten mit EPS-Perlen 1/2 mm bei annähernd gleicher relativer Porosität bzw. Festrohdichte am größten waren, während die der Zementsteinvarianten mit Luftporen am niedrigsten waren. Der Einfluss der Porengröße wird in Abschnitt 6.6.3 genauer analysiert.

Unabhängig vom Luft-/EPS-Gehalt lagen die Grenzspannungen der Zementsteine tendenziell etwas über den jeweiligen einachsigen Druckfestigkeiten (Abbildung 81, links). Die um bis zu 9 % größeren Grenzspannungen waren auf die Umschnürung der Probenhalterung zurückzuführen (vgl. Abschnitt 6.6.1). Die im Vergleich zur Druckfestigkeit etwas niedrigere Grenzspannung der Zementsteinvariante ZS-EPS60_1/2 ($\sigma_{z,I-II}/f_{cm,cube} = 0,98$) war mit hoher Wahrscheinlichkeit auf übliche Prüfstreuungen zurückzuführen. Insgesamt lässt sich aus diesen Ergebnissen ableiten, dass die Umschnürung der Probenhalterung einen eher geringen Einfluss auf die Grenzspannung des porisierten Zementsteins hat. Dementsprechend ergab sich für die Grenzspannung eine annähernd übereinstimmende Abhängigkeit zur relativen Porosität bzw. Festrohdichte (Abbildung 81, rechts), wie sie auch für die einachsige Druckfestigkeit festgestellt wurde (vgl. Abbildung 72, Abschnitt 6.4.3).

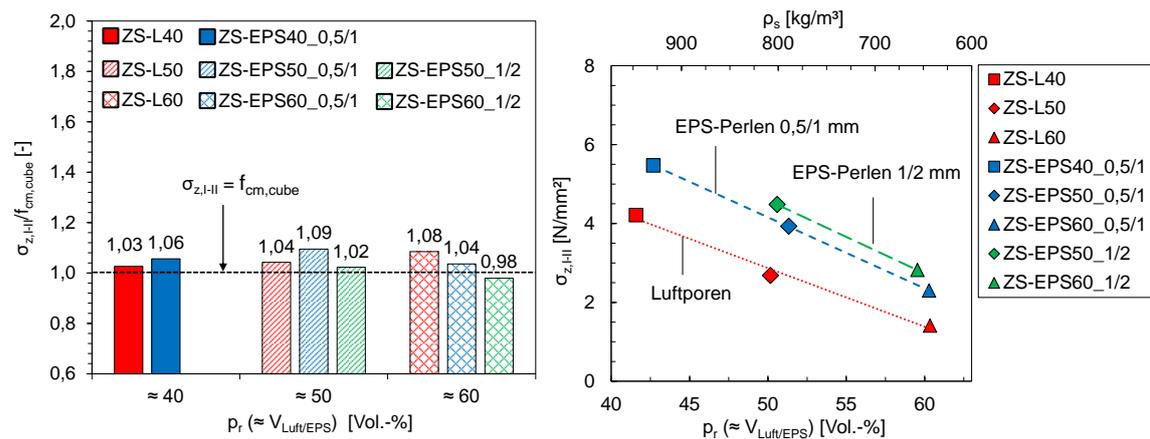


Abbildung 81: Bezogene (links) und absolute Grenzspannungen (rechts) in Abhängigkeit der relativen Porosität bzw. Festrohdichte.

Im plastischen Bereich ist zu erkennen, dass die Spannungs-Stauchungskurven der Zementsteinvarianten mit einem höheren Luft-/EPS-Gehalt zum einen auf einem niedrigeren Spannungsniveau verliefen und zum anderen einen flacheren Spannungsanstieg aufwiesen (vgl. Abbildung 77 bis Abbildung 79, links). Um diese Beobachtung zu quantifizieren, sind das Spannungsniveau bei einer Stauchung von $\varepsilon_z = 10\%$ sowie der absolute Spannungszuwachs im Stauchungsintervall von $\varepsilon_z = 5\%$ bis $\varepsilon_z = 10\%$ ($I_\varepsilon[5\%;10\%]$) in Abhängigkeit der relativen Porosität bzw. Festrohdichte in Abbildung 82 dargestellt.

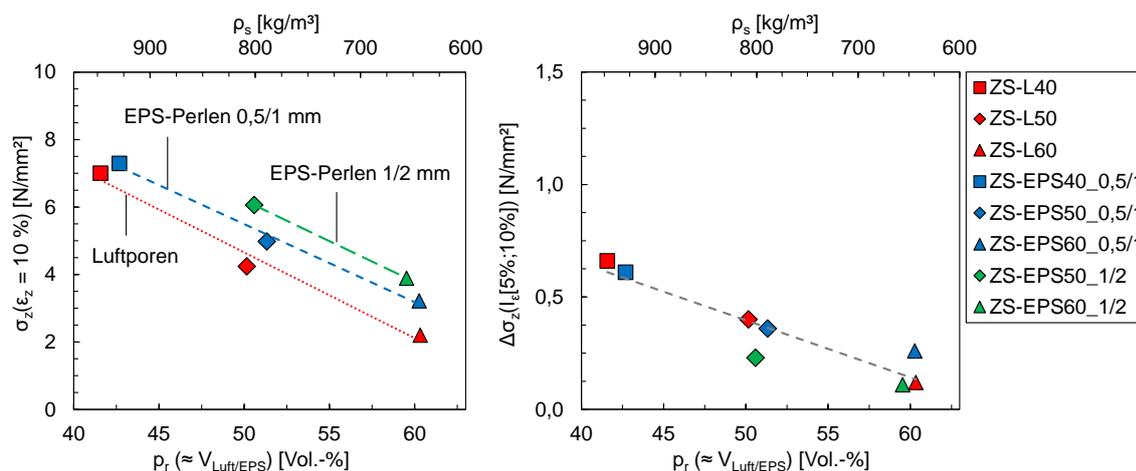


Abbildung 82: Spannungsniveau bei $\epsilon_z = 10\%$ (links) und absoluter Spannungszuwachs im Stauchungsintervall $I_\epsilon[5\%;10\%]$ (rechts) in Abhängigkeit der relativen Porosität bzw. Festrohdichte.

Sowohl für das Spannungsniveau (vgl. Abbildung 82, links) als auch für den Spannungszuwachs (vgl. Abbildung 82, rechts) konnte eine annähernd lineare Abnahme mit zunehmender relativer Porosität bzw. abnehmender Festrohdichte festgestellt werden. Während das Spannungsniveau analog zur Grenzspannung offensichtlich ebenfalls von der Porengröße beeinflusst wurde, zeigte sich für den Spannungszuwachs im dargestellten Stauchungsbereich, dass dieser weitgehend unabhängig von der Porengröße war (vgl. Abschnitt 6.6.3).

Die an den plastischen Stauchungsbereich anschließende Verfestigung setzte in Abhängigkeit des Luft-/EPS-Gehaltes ab einer Stauchung zwischen ca. 10 und 30 % ein. Auch wenn der Übergang vom plastischen Bereich in den Verfestigungsbereich aufgrund des im plastischen Bereich geringfügig aber stetig zunehmenden Spannungszuwachses nicht eindeutig lokalisierbar war, kann anhand der Spannungs-Stauchungskurven (vgl. Abbildung 77 bis Abbildung 79, links) abgeleitet werden, dass je höher der Luft-/EPS-Gehalt des Zementsteins war, desto größer war die Stauchung, ab der eine deutliche Verfestigung eintrat. Zudem war der progressive Spannungsanstieg im Verfestigungsbereich bei einem höheren Luft-/EPS-Gehalt vergleichsweise geringer ausgeprägt. Diese Beobachtungen waren auf das mit steigendem Luft-/EPS-Gehalt zunehmende stauchbare Porenvolumen zurückzuführen.

Zur genaueren Analyse der absoluten Spannungszuwächse im plastischen Bereich und Verfestigungsbereich in Abhängigkeit des Luft-/EPS-Gehaltes sind diese für das Stauchungsintervall von $\epsilon_{z,I-II}$ (Stauchung bei Erreichen der Grenzspannung $\sigma_{z,I-II}$) bis $\epsilon_z = 5\%$ ($I_\epsilon[\epsilon_{z,I-II};5\%]$) sowie die nachfolgenden Stauchungsintervalle von jeweils 5 % Stauchung ($I_\epsilon[5\%;10\%]$ bis $I_\epsilon[50\%;55\%]$) in Abbildung 83 bis Abbildung 85 dargestellt.

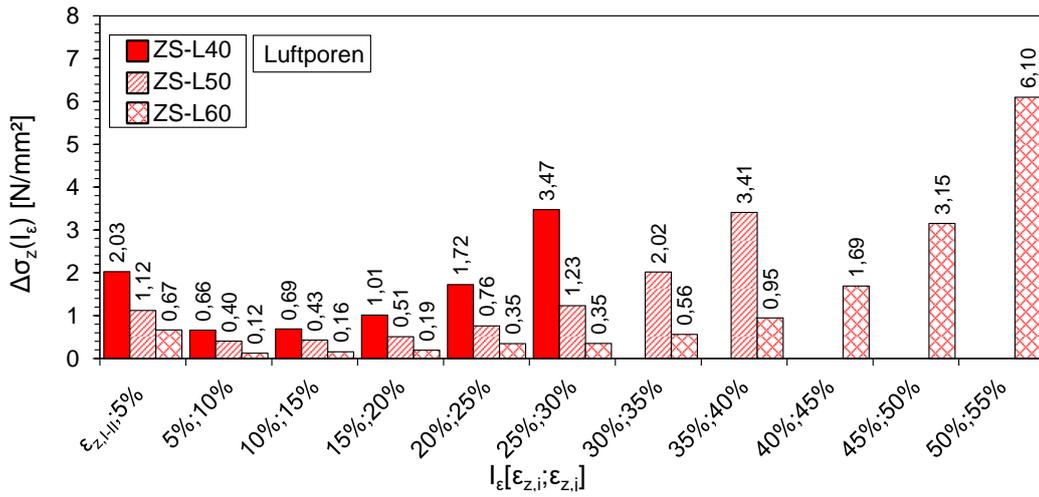


Abbildung 83: Absolute Spannungszuwächse der Zementsteine mit Luftporen in den Stauchungsintervallen $I_\epsilon[\epsilon_{z,I-II};5\%]$ bis $I_\epsilon[50\%;55\%]$.

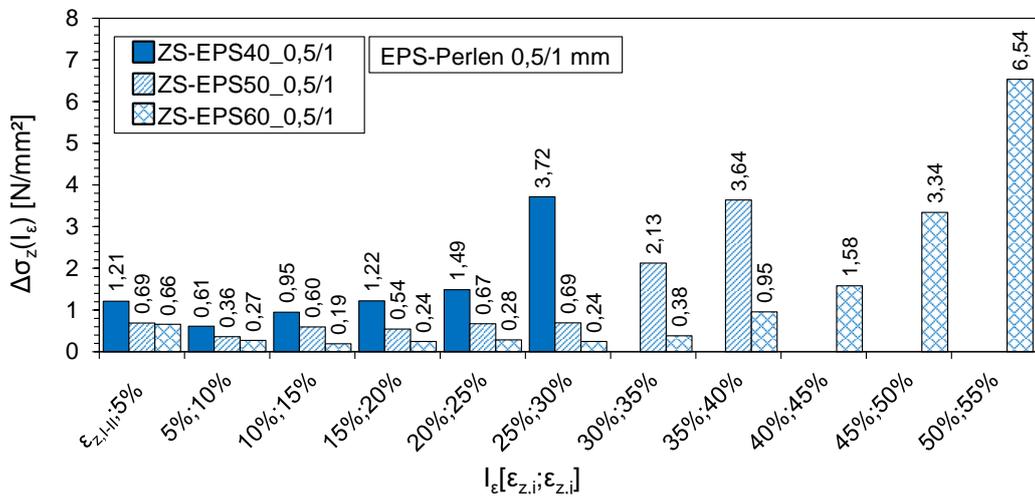


Abbildung 84: Absolute Spannungszuwächse der Zementsteine mit EPS-Perlen 0,5/1 mm in den Stauchungsintervallen $I_\epsilon[\epsilon_{z,I-II};5\%]$ bis $I_\epsilon[50\%;55\%]$.

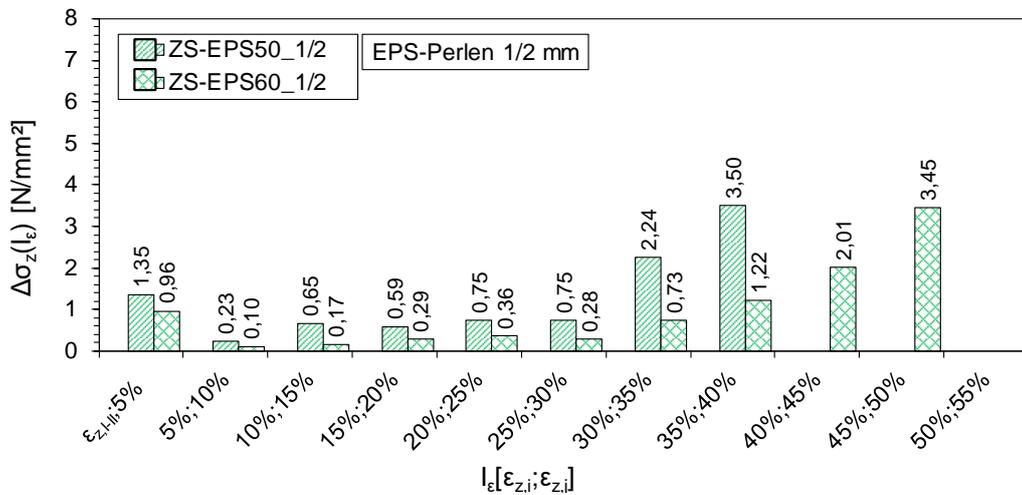


Abbildung 85: Absolute Spannungszuwächse der Zementsteine mit EPS-Perlen 1/2 mm in den Stauchungsintervallen $I_\epsilon[\epsilon_{z,I-II};5\%]$ bis $I_\epsilon[50\%;55\%]$.

In Abbildung 83 bis Abbildung 85 ist zu erkennen, dass die Differenz zwischen den Stauchungen, bei denen sich ein ungefähr gleich großer Spannungszuwachs einstellte, in etwa proportional zur Differenz zwischen den jeweiligen Luft-/EPS-Gehalten (bzw. relativen Porositäten) der Zementsteine war. Beispielhaft für die Zementsteine mit Luftporen betrug der Spannungszuwachs im Stauchungsintervall $I_{\varepsilon}[25\%;30\%]$ bei einem Luftgehalt von rd. 40 Vol.-% (ZL-L40) 3,47 N/mm². Ein ähnlich großer Spannungszuwachs ergab sich bei einem Luftgehalt von rd. 50 Vol.-% (ZL-L50) im Stauchungsintervall $I_{\varepsilon}[35\%;40\%]$ bzw. bei einem Luftgehalt von rd. 60 Vol.-% (ZL-L60) im Stauchungsintervall $I_{\varepsilon}[45\%;50\%]$ (vgl. Abbildung 83).

Auf Grundlage dieser Beobachtung wird im Folgenden gezeigt, dass für den hier untersuchten porositierten Zementstein unter den vorliegenden Versuchsrandbedingungen ein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen dem Spannungszuwachs (im plastischen Bereich und Verfestigungsbereich) und dem stauchungsabhängigen Restporenvolumen, d. h. der residualen relativen Porosität, vorlag. Da das Porenvolumen (Luftporen/mit EPS gefüllte Poren) infolge der Volumenkompression der Probe direkt proportional zur aufgetragenen Stauchung abnimmt (eine Stauchungszunahme von 1,0 % entspricht einer Abnahme des Porenvolumens um 1,0 Vol.-%), ergibt sich für die residuale relative Porosität $p_{r,res}$ in Abhängigkeit der aufgetragenen Stauchung der folgende Zusammenhang:

$$p_{r,res}(\varepsilon_z) = p_r - \varepsilon_z \cdot 1,0 [\text{Vol.}\%] \quad (8)$$

mit:	$p_{r,res}(\varepsilon_z)$	residuale relative Porosität in Abhängigkeit der Stauchung	[Vol.-%]
	p_r	initiale relative Porosität (vor Versuchsbeginn: $\varepsilon_z = 0$ %) (p_r nach Tabelle 14)	[Vol.-%]
	ε_z	Stauchung	[%]

Die absoluten Spannungszuwächse in den Stauchungsintervallen $I_{\varepsilon}[5\%;10\%]$ bis $I_{\varepsilon}[50\%;55\%]$ (vgl. Abbildung 83 bis Abbildung 85) sind in Abhängigkeit der residualen relativen Porosität in Abbildung 86 dargestellt. Bei der Berechnung der residualen relativen Porosität nach Gleichung (8) wurde für ε_z die mittlere Stauchung des jeweiligen Stauchungsintervalls eingesetzt (z. B.: $\varepsilon_z(I_{\varepsilon}[5\%;10\%]) = 7,5$ %).

Anhand der mehr oder weniger übereinanderliegenden Graphen in Abbildung 86 wird offenkundig, dass unabhängig vom Luft-/EPS-Gehalt bzw. von der initialen relativen Porosität des Zementsteins ein annähernd übereinstimmender Zusammenhang zwischen dem Spannungszuwachs und der residualen relativen Porosität bestand. Daraus kann abgeleitet werden, dass der Spannungszuwachs nach Überschreiten des elastischen Bereiches maßgeblich durch das von der Stauchung abhängige Restporenvolumen bestimmt wurde. Wie aus Abbildung 86 ebenfalls deutlich wird, setzte die Verfestigung in Form des progressiven Spannungszuwachses für alle Zementsteinvarianten ungefähr ab einer residualen relativen Porosität von 30 Vol.-% ein.

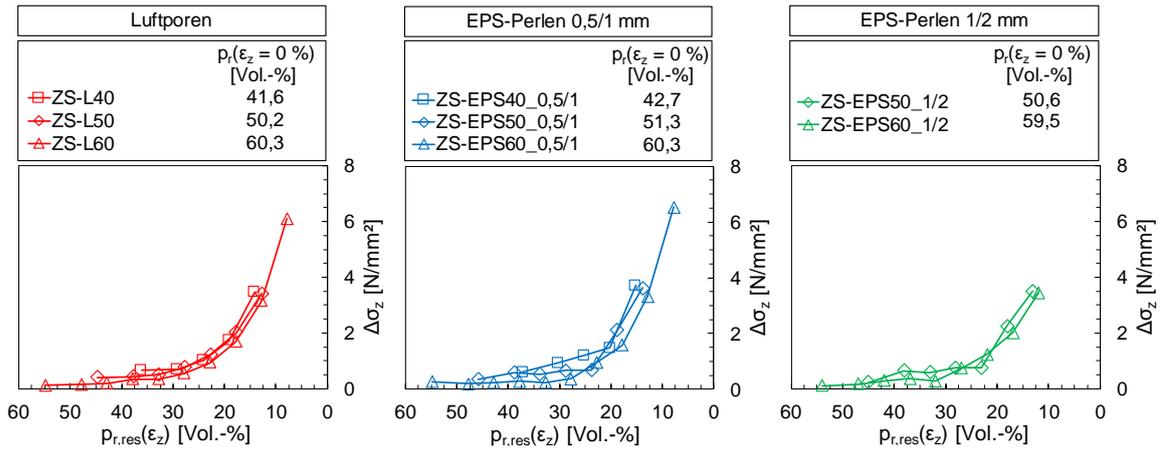


Abbildung 86: Absoluter Spannungszuwachs in Abhängigkeit der residualen relativen Porosität: Vergleich zwischen Zementsteinen mit Luftporen (links), EPS-Perlen 0,5/1 mm (Mitte) und EPS-Perlen 1/2 mm (rechts).

Die maximalen Stauchungen der verschiedenen Zementsteinvarianten betragen zwischen rd. 33 und 56 %. Diese sind in Abhängigkeit der relativen Porosität in Abbildung 87 dargestellt. Wie eindeutig zu erkennen ist, nahm das Stauchvermögen des porositätem Zementsteins bis zum Versuchsende in etwa proportional zur relativen Porosität bzw. zum Luft-/EPS-Gehalt zu.

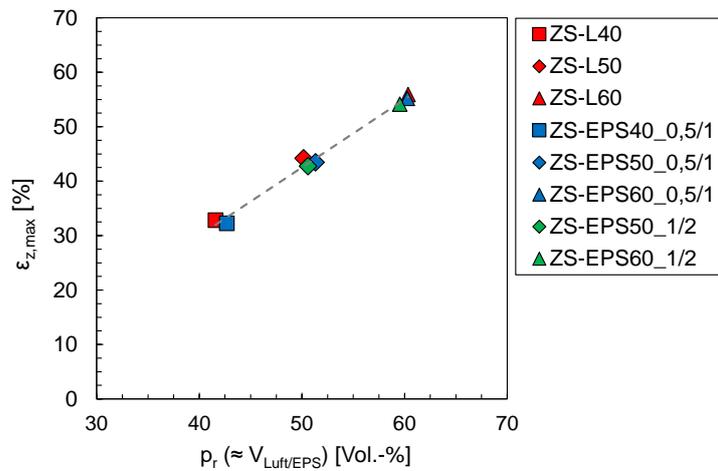


Abbildung 87: Maximale Stauchung bei Versuchsende in Abhängigkeit der relativen Porosität.

Aus den Verläufen der Spannungs-Stauchungskurven bis zum Versuchsende kann darüber hinaus auf das absolute Gesamtstauchvermögen des porositätem Zementsteins geschlossen werden. Bei der gedanklichen Verlängerung der Kurven über die maximale Spannung hinaus, nähern sich diese asymptotisch an eine vertikale Gerade, die die x-Achse bei einer Stauchung schneidet, die direkt proportional zur relativen Porosität (und damit auch zum Luft-/EPS-Gehalt) des jeweiligen Zementsteins ist (vgl. Abbildung 77 bis Abbildung 79, links). Bei einer starken Annäherung an diese Stauchung würde das stauchbare Restporenvolumen gegen Null und die Spannungszunahme damit theoretisch gegen ∞ tendieren. Daraus kann geschlossen werden, dass das absolute Gesamtstauchvermögen des porositätem Zementsteins unter den hier vorliegenden Versuchsrandbedingungen durch den Luft-/EPS-Gehalt bzw. durch die relative Porosität begrenzt wird.

6.6.3 Einfluss der Porengröße

Die gemittelten Spannungs-Stauchungskurven der Zementsteinvarianten mit Luftporen sind denen der Varianten mit EPS-Perlen 0,5/1 mm bzw. EPS-Perlen 1/2 mm in Abbildung 88 bis Abbildung 90 gegenübergestellt.

Anhand der Steigungen der Spannungs-Stauchungskurven im elastischen Bereich (vgl. Abbildung 88 bis Abbildung 90, rechts) ist zu erkennen, dass die initialen Steifigkeiten der Zementsteinvarianten mit EPS-Perlen 1/2 mm bei annähernd gleichen Luft-/EPS-Gehalten am größten waren, während die der Zementsteine mit Luftporen am niedrigsten waren (vgl. auch Abbildung 80). Dieser Trend traf ebenso für die Grenzspannungen zu (vgl. auch Abbildung 81, rechts).

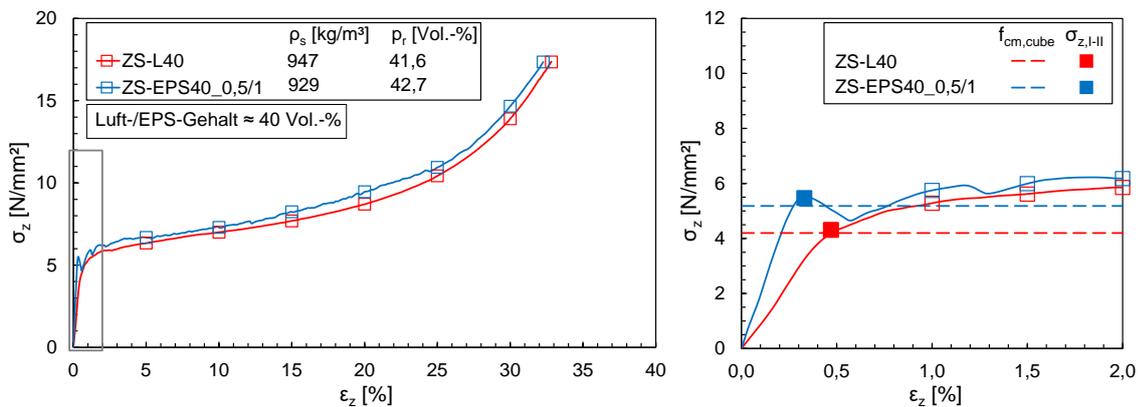


Abbildung 88: Spannungs-Stauchungskurven der Zementsteine mit einem Luft-/EPS-Gehalt von rd. 40 Vol.-% im Stauchungsbereich von 0 bis 65 % (links) bzw. 0 bis 2 % Stauchung (rechts).

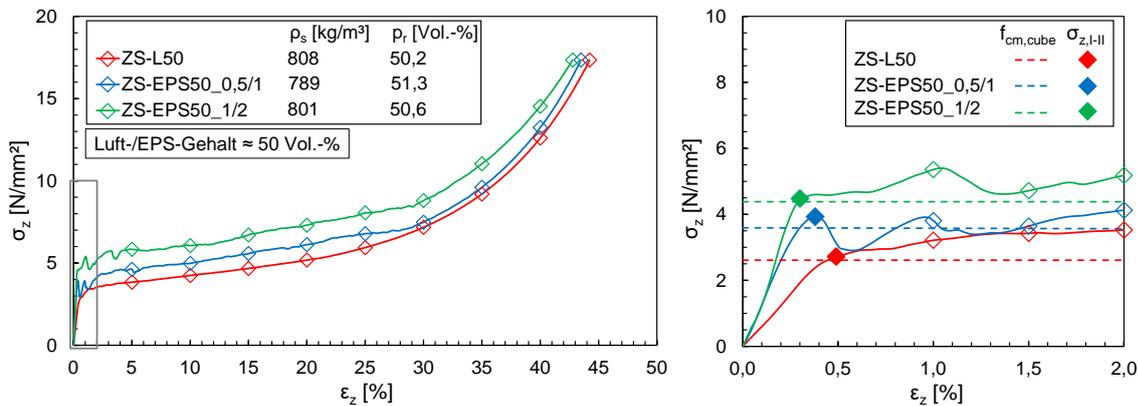


Abbildung 89: Spannungs-Stauchungskurven der Zementsteine mit einem Luft-/EPS-Gehalt von rd. 50 Vol.-% im Stauchungsbereich von 0 bis 65 % (links) bzw. 0 bis 2 % Stauchung (rechts).

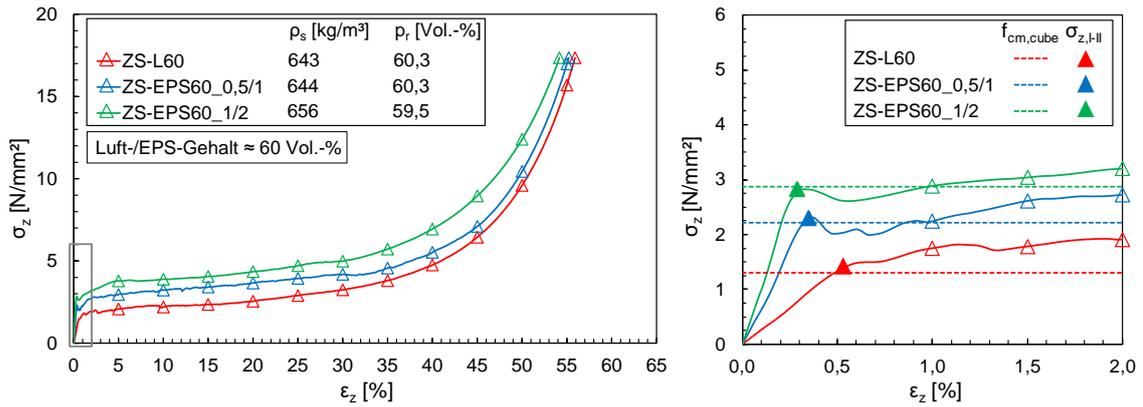


Abbildung 90: Spannungs-Stauchungskurven der Zementsteine mit einem Luft-/EPS-Gehalt von rd. 60 Vol.-% im Stauchungsbereich von 0 bis 65 % (links) bzw. 0 bis 2 % Stauchung (rechts).

Sowohl die initiale Steifigkeit als auch die Grenzspannung nahmen in etwa linear mit zunehmendem mittleren Porendurchmesser zu (Abbildung 91). Aufgrund ihrer hochporösen Struktur sowie der gegen Null tendierenden Festigkeit und Steifigkeit verhalten sich die EPS-Perlen im Zementstein in mechanischer Hinsicht ähnlich wie Luftporen gleichen Durchmessers. Daraus ist abzuleiten, dass die Abweichungen zwischen den initialen Steifigkeiten bzw. Grenzspannungen bei annähernd gleichem Luft-/EPS-Gehalt aus den mit der Porengröße zusammenhängenden Unterschieden in der Struktur des Zementsteingefüges (vgl. Abschnitt 6.4.2) resultierten. Die Zunahme der initialen Steifigkeit bzw. Grenzspannung mit zunehmender Porengröße war demnach auf die damit einhergehende Zunahme der Stegdicken zurückzuführen.

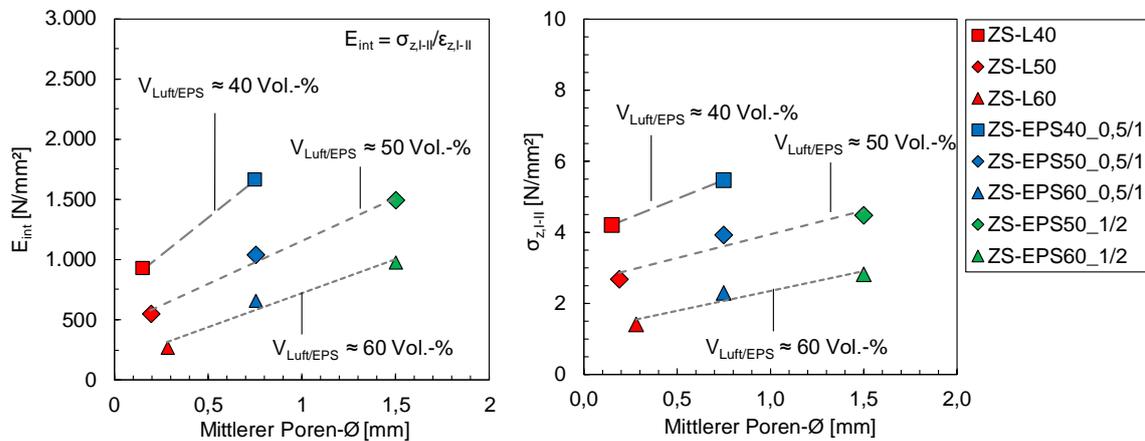


Abbildung 91: Initiale Steifigkeit (links) und Grenzspannung (rechts) der porositärem Zementsteine in Abhängigkeit des mittleren Porendurchmessers.

Für das Spannungsniveau im plastischen Bereich ist in Abbildung 88 bis Abbildung 90 (links) zu erkennen, dass dieses analog zur Grenzspannung mit zunehmendem Porendurchmesser anstieg (vgl. auch Abbildung 82, links). Dieser Anstieg war ebenfalls auf die Zunahme der Stegdicken zurückzuführen, zumal das Stauchverhalten der EPS-Perlen selber unabhängig von deren Korngröße war (vgl. Abschnitt 5.4). Wie beispielhaft für eine Stauchung von $\epsilon_z = 10\%$ in Abbildung 92 dargestellt ist, stieg das Spannungsniveau im plastischen Bereich nahezu linear mit zunehmendem

mittleren Porendurchmesser an. Allerdings war der Einfluss der Porengröße bei einem Luft-/EPS-Gehalt von rd. 40 Vol.-% tendenziell etwas geringer als bei höheren Luft-/EPS-Gehalten.

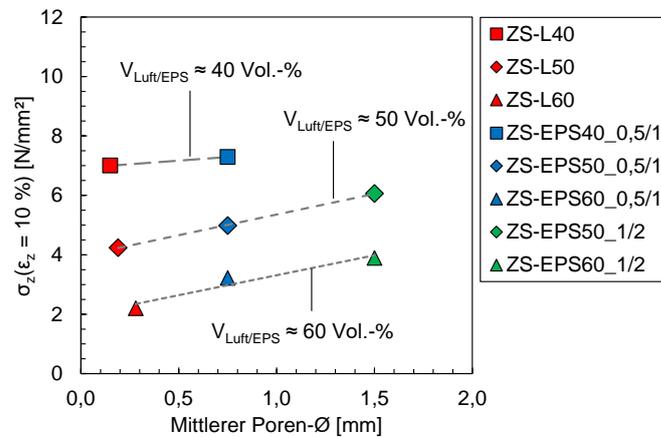


Abbildung 92: Spannungs-niveau der porositierem Zementsteine bei $\varepsilon_z = 10\%$ in Abhängigkeit des mittleren Porendurchmessers.

Ein Einfluss der Porengröße, wie er für das Spannungs-niveau im plastischen Bereich festgestellt wurde, konnte für den Spannungszuwachs in diesem Bereich ausgeschlossen werden, da dieser bei gleichem Luft-/EPS-Gehalt für alle Zementsteinvarianten in etwa gleich groß war (vgl. auch Abbildung 83 bis Abbildung 85 sowie Abbildung 82, links). Daraus ist abzuleiten, dass der Spannungszuwachs ausschließlich vom stauchbaren Porenvolumen und damit vom Luft-/EPS-Gehalt bzw. von der relativen Porosität abhängig war. Diese Erkenntnis wird zusätzlich durch die Darstellung des absoluten Spannungszuwachses in Abhängigkeit der residualen relativen Porosität verdeutlicht (Abbildung 93). Bei einer annähernd gleichgroßen residualen relativen Porosität war der Spannungszuwachs der Zementsteinvarianten sowohl im plastischen Bereich als auch im Verfestigungsbereich nahezu identisch und somit unabhängig von der Porengröße.

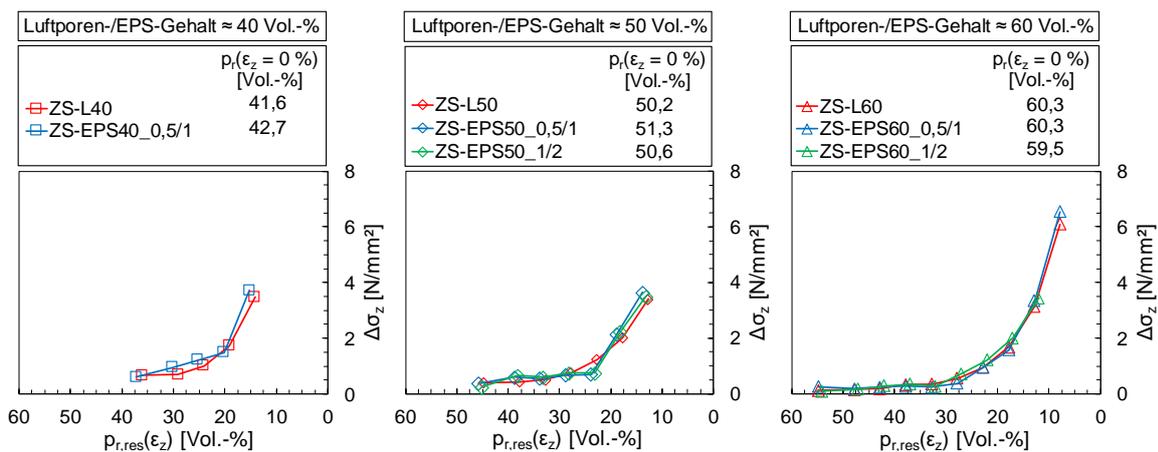


Abbildung 93: Absoluter Spannungszuwachs in Abhängigkeit der residualen relativen Porosität: Vergleich zwischen Zementsteinen mit einem Luft-/EPS-Gehalt von rd. 40 Vol.-% (links), 50 Vol.-% (Mitte) und 60 Vol.-% (rechts).

Im Verfestigungsbereich näherten sich die Spannungs-Stauchungskurven mit zunehmender Stauchung einander an (vgl. Abbildung 88 bis Abbildung 90, links). Dies zeigt zum einen, dass die Unterschiede in der Porengröße im Hinblick auf das Stauchverhalten mit zunehmender Verfestigung an Einfluss verlieren. Zum anderen wird dadurch bestätigt, dass das Gesamtstauchvermögen allein vom Luft-/EPS-Gehalt bzw. von der relativen Porosität des Zementsteins abhängig war (vgl. Abschnitt 6.6.2).

6.6.4 Reproduzierbarkeit der Stauchversuche

Die Reproduzierbarkeit der Stauchversuche wurde exemplarisch für den Zementstein mit rd. 50 Vol.-% Luftporen (ZS-L50) untersucht. Hierfür wurden Stauchversuche an insgesamt sechs Würfelproben durchgeführt. Die Einzelkurven der sechs Proben sowie die daraus gemittelte Spannungs-Stauchungskurve sind in Abbildung 94 dargestellt.

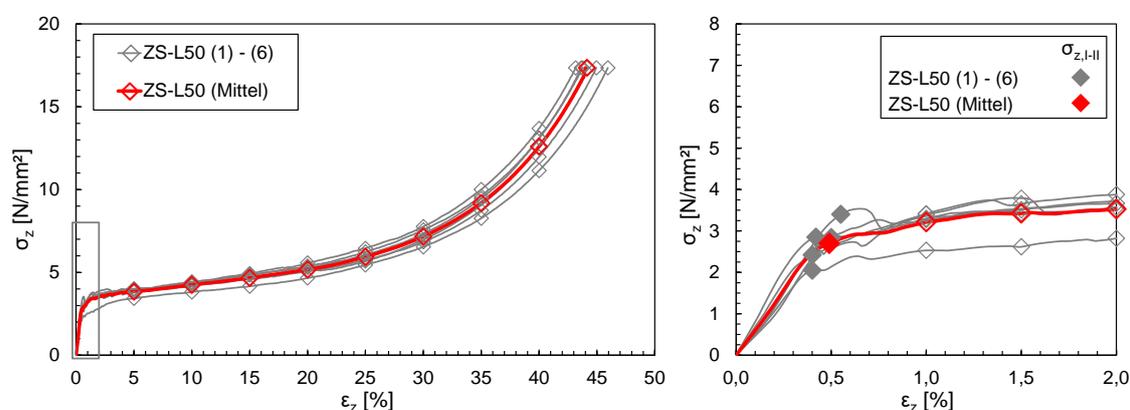


Abbildung 94: Spannungs-Stauchungskurven von sechs Proben des Zementsteins ZS-L50 im Stauchungsbereich von 0 bis 50 % (links) und 0 bis 2 % Stauchung (rechts).

Für jede Einzelkurve wurden die Grenzspannung $\sigma_{z,I-II}$, die Spannungen $\sigma_z(\epsilon_z)$ in Schritten von 5 % Stauchung ($\epsilon_z = 5\%$ bis $\epsilon_z = 40\%$) sowie die Stauchung bei Erreichen der maximalen Spannung von $\epsilon_{z,max} = 17,4\%$ ermittelt. Die Maximal- und Minimalwerte (max, min), die Differenzen zwischen den Maximal- und Minimalwerten ($\Delta(\max - \min)$), die Mittelwerte (M) sowie die daraus resultierenden Standardabweichungen (SD) und Variationskoeffizienten (CV) sind in Tabelle 18 dokumentiert.

Die Grenzspannungen der Einzelkurven lagen zwischen $2,05 \text{ N/mm}^2$ und $3,40 \text{ N/mm}^2$. Der Mittelwert betrug $2,70 \text{ N/mm}^2$. Damit ergab sich für die Grenzspannung eine Standardabweichung von $0,46 \text{ N/mm}^2$ und ein Variationskoeffizient von $16,9\%$ (Tabelle 18). Im plastischen Bereich war die Streuung der Spannungen im Vergleich zur Grenzspannung zunächst noch deutlich geringer. Bei $\epsilon_z = 5\%$ betrug die Differenz zwischen der maximalen und minimalen Spannung $0,58 \text{ N/mm}^2$, die Standardabweichung $0,19 \text{ N/mm}^2$ und der Variationskoeffizient $5,0\%$. Mit zunehmender Stauchung war dann eine leichte Zunahme der Streuung zwischen den Einzelkurven zu erkennen. Bis $\epsilon_z = 40\%$ stieg die Differenz zwischen der maximalen und minimalen Spannung auf $2,54 \text{ N/mm}^2$

an. Die Standardabweichung betrug 0,83 N/mm². Da der Mittelwert der Spannungen mit zunehmender Stauchung ebenfalls anstieg, war für den Variationskoeffizienten jedoch eine nur geringfügige Zunahme zu verzeichnen. Bei $\varepsilon_z = 40\%$ betrug der Variationskoeffizient 6,6 %.

Bei Versuchsende ($\sigma_{z,\max} = 17,4$ N/mm²) lag die maximale Stauchung der Proben zwischen 43,2 % und 46,0 %. Die Standardabweichung betrug 1,0 % und der Variationskoeffizient 2,2 %.

Tabelle 18: Auswertung der Spannungs-Stauchungskurven von sechs Proben des Zementsteins ZS-L50.

	max [N/mm ²]	min [N/mm ²]	$\Delta(\max - \min)$ [N/mm ²]	M [N/mm ²]	SD [N/mm ²]	CV [%]
$\sigma_{z,I-II}$	3,40	2,05	1,35	2,70	0,46	16,9
$\sigma_z(\varepsilon_z = 5\%)$	4,01	3,43	0,58	3,84	0,19	5,0
$\sigma_z(\varepsilon_z = 10\%)$	4,44	3,81	0,62	4,24	0,20	4,8
$\sigma_z(\varepsilon_z = 15\%)$	4,93	4,17	0,76	4,67	0,25	5,5
$\sigma_z(\varepsilon_z = 20\%)$	5,57	4,66	0,91	5,18	0,29	5,6
$\sigma_z(\varepsilon_z = 25\%)$	6,45	5,44	1,01	5,94	0,34	5,8
$\sigma_z(\varepsilon_z = 30\%)$	7,77	6,54	1,23	7,17	0,43	5,9
$\sigma_z(\varepsilon_z = 35\%)$	10,0	8,26	1,74	9,19	0,57	6,2
$\sigma_z(\varepsilon_z = 40\%)$	13,7	11,2	2,54	12,6	0,83	6,6
	max [%]	min [%]	$\Delta(\max - \min)$ [%]	M [%]	SD [%]	CV [%]
$\varepsilon_z(\sigma_{z,\max} = 17,4 \text{ N/mm}^2)$	46,0	43,2	2,8	44,2	1,01	2,3

Aufgrund der insgesamt geringen Streuungen zwischen den Einzelkurven (vgl. Abbildung 94 und Tabelle 18) sind die Stauchversuche als gut reproduzierbar zu werten. Die Abweichungen zwischen den Einzelkurven der anderen Zementsteinvarianten sind ebenfalls als gering zu beurteilen (vgl. Anhang D-I). Eine statistische Auswertung der Streuungen zwischen den Einzelkurven wurde für diese Varianten aufgrund der geringen Probenanzahl ($n = 2$ bzw. 3) jedoch nicht durchgeführt.

7 Untersuchungen an porosittem Beton

7.1 Variationen

Aufbauend auf den Untersuchungen der Einzelkomponenten (poröse Zuschlagstoffe, porosierter Zementstein, vgl. Abschnitte 5 und 6) wurde das Stauchverhalten von Beton mit einem matrix- und kornporigen Gefüge untersucht. In die Untersuchungen wurden Variationen der Art und Korngröße der porösen Zuschlagstoffe (Blähton 0/8 mm, Blähglas 0,5/8 mm bzw. 0,5/2 mm, Vermiculite 0,5/8 mm, EPS-Perlen 0,5/5 mm bzw. 0,5/1 mm) sowie des Wasserzementwertes ($w/z = 0,70; 1,00; 1,40$) einbezogen. Des Weiteren wurde das Stauchverhalten unter Variation des Lastflächenverhältnisses ($A/A_s = 1,0; 2,25; 9,0$) untersucht, um anwendungsbezogene Randbedingungen hinsichtlich voll- bzw. teilflächigen Stauchungen abzudecken.

7.2 Zusammensetzung

7.2.1 Basiszusammensetzung

Die Basiszusammensetzung der untersuchten Betone ist in Tabelle 19 angegeben. Die Volumenanteile der Einzelkomponenten sind in Abbildung 95 grafisch dargestellt.

Tabelle 19: Basiszusammensetzung der porositren Betone.

Komponenten	Rohdichte [kg/dm ³]	Einwaage [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]
Zement (Z) (CEM I 42,5 R)	3,1	220,0	71,0
Wasser effektiv (W)	1,0	154,0	154,0
			$\Sigma(Z+W) = 225,0$
w/z-Wert	0,70		
Luftporen (LP)	-	-	300,0
			$\Sigma(Z+W+ LP) = 525,0$
Zuschlagstoffe	ρ_a nach Tabelle 2	$\rho_a \cdot 474,0$	474,0
Schaumbildner	1,1	0,9 – 1,4 (0,4 – 0,6 M.-% v. Z.)	0,8 – 1,3
			$\Sigma \approx 1000$

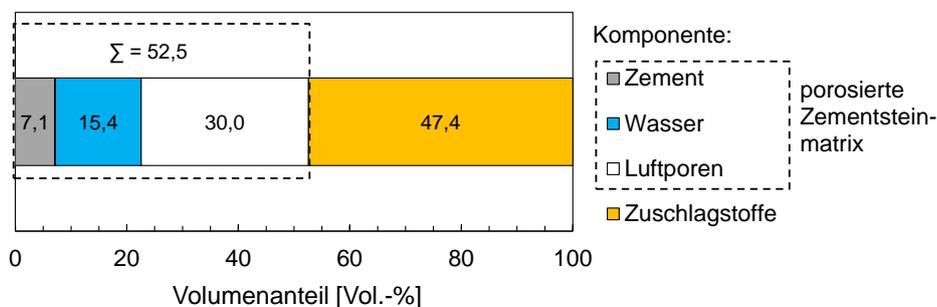


Abbildung 95: Volumenanteile der Basiszusammensetzung der porositren Betone.

Als Bindemittel kam ein Portlandzement CEM I 42,5 R zum Einsatz, der auch bei den Untersuchungen des porosierten Zementsteins verwendet wurde (vgl. Abschnitt 6). Die wesentlichen Kenn-
daten des Zements können Tabelle A 1 (Anhang A) entnommen werden. Der effektive Wasserze-
mentwert betrug $w/z = 0,70$. Die Gesamtwasserzugabemenge wurde für jede Mischungsvariante
unter Berücksichtigung der Wasseraufnahme (Saugwassermenge) der verwendeten Zuschlagstoffe
(vgl. Tabelle 5, Abschnitt 5.2.5) ermittelt. Der Volumenanteil der Zuschlagstoffe betrug insgesamt
rd. 47 Vol.-%. Die entsprechenden Einwaage-Massen der trockenen Zuschlagstoffe wurden aus den
jeweiligen Kornrohdichten ρ_a (vgl. Tabelle 2, Abschnitt 5.2.2) bestimmt.

Zur Einführung von Luftporen während des Mischvorgangs wurde ein Schaumbildner auf Basis
eines organischen Tensids verwendet, der auch bei der Herstellung des porosierten Zementsteins
zum Einsatz kam (vgl. Abschnitt 6). Die wesentlichen Kenn-
daten des Schaumbildners können Ta-
belle A 3 (Anhang A) entnommen werden. Ausschließlich auf das Volumen der porosierten Ze-
mentsteinmatrix bezogen wurde ein Luftporengehalt von rd. 57 Vol.-% eingestellt. Der Gesamt-
luftporengehalt im Beton (exklusive der in den porösen Zuschlagstoffen eingeschlossenen Luft-
poren) betrug somit rd. 30 Vol.-%.

Für den porosierten Zementstein wurde in Abschnitt 6.2 dargelegt, dass der während des Misch-
vorgangs erzeugte Luftporengehalt zum einen von der Dosierung des Schaumbildners, zum anderen
von der Mischzeit bzw. von der eingetragenen Mischenergie abhängig war. In Vorversuchen zum
Aufschäumverhalten der hier untersuchten Betone zeigte sich, dass ebenfalls die Art und die Korn-
größe der verwendeten Zuschlagstoffe sowie die Reihenfolge bei der Zugabe der Ausgangsstoffe
einen Einfluss auf den Luftgehalt hatten. Ähnliche Beobachtungen wurden auch in [8] dokumen-
tiert. Die in den Vorversuchen ermittelten Dosiermengen des Schaumbildners, die unter Anwen-
dung des festgelegten Mischregimes (vgl. Abbildung 96, Abschnitt 7.3) zur Erzielung des ange-
strebten Luftgehaltes erforderlichen waren, betragen zwischen 0,9 und 1,4 kg/m³ ($\cong 0,4 - 0,6$ M.-%
bezogen auf den Zementgehalt der Basiszusammensetzung). Die genauen Dosiermengen für die
nachfolgend aufgeführten Mischungsvarianten können den jeweiligen Mischungszusammenset-
zungen entnommen werden (siehe Anhang B-II).

7.2.2 Variation der Zuschlagstoffe

Als poröse Zuschlagstoffe kamen verschiedene leichte Gesteinskörnungen und EPS-Perlen (vgl.
Tabelle 1, Abschnitt 5.2.1) zum Einsatz:

- Blähton-Leichtsand (0/2 mm)
- Blähton (2/8 mm)
- Blähglas (0,5/1 mm, 1/2 mm, 2/4 mm, 4/8 mm)
- Vermiculite (0,5/1 mm, 1/2 mm, 2/8 mm)
- EPS-Perlen (0, 5/1 mm, 1/2 mm, 2/5 mm)

Die charakteristischen Eigenschaften der porösen Zuschlagstoffe können Abschnitt 5.2 entnommen
werden.

Insgesamt wurden sechs verschiedene Zuschlagstoffvarianten in die Untersuchungen einbezogen. Die Volumenanteile der für die jeweilige Variante verwendeten Korngruppen (bezogen auf das Gesamtvolumen der Zuschlagstoffe) sind in Tabelle 20 angegeben.

Tabelle 20: Variation der verwendeten Zuschlagstoffe.

Zuschlagstoff	Blähton-Leichtsand		Blähton				Blähglas			Vermiculite			EPS-Perlen			Σ
	0/2 mm	2/8 mm	0,5/1 mm	1/2 mm	2/4 mm	4/8 mm	0,5/1 mm	1/2 mm	2/8 mm	0,5/1 mm	1/2 mm	2/5 mm				
Bezeichnung	Volumenanteil [Vol.-%]															
Bt_0/8	30	70													100	
Bg_0,5/8 (B-Bg)*			25	25	20	30									100	
Bg_0,5/2			50	50											100	
Ver_0,5/8							30	20	50						100	
EPS_0,5/5 (B-EPS)*											45	25	30		100	
EPS_0,5/1											100				100	

*) Basis für weitere Mischungsvarianten

Für die Mischungsvariante Bt_0/8 wurden ein Blähton 2/8 mm und ein Blähton-Leichtsand 0/2 mm verwendet, für alle anderen Mischungsvarianten Zuschlagstoffe mit einer Korngröße $\geq 0,5$ mm. Die stetigen Gesamtsieblinien der aus den verschiedenen Korngruppen zusammengesetzten Zuschlagstoffvarianten sind in Tabelle A 18 (Anhang B-II) dargestellt. Die Einwaage-Massen der trockenen Zuschlagstoffe sowie die entsprechenden Saugwassermengen können den jeweiligen Mischungszusammensetzungen entnommen werden (Anhang B-II).

In Abweichung zur üblichen Abgrenzung zwischen Mörteln und Betonen in Abhängigkeit des Größtkorns ($D_{\max} > 4$ mm: Beton, $D_{\max} \leq 4$ mm: Mörtel) werden alle Mischungsvarianten als „Beton“ bezeichnet.

Für die weiteren Mischungsvarianten (Variation des Wasserzementwertes) wurden die Betone mit Blähglas 0,5/8 mm (B-Bg) und EPS-Perlen 0,5/5 mm (B-EPS) verwendet.

7.2.3 Variation des Wasserzementwertes

Um den Einfluss der Kapillarporosität der Zementsteinmatrix auf das Stauchverhalten der porositären Betone zu erfassen, wurde der Wasserzementwert variiert ($w/z = 0,70; 1,00; 1,40$; vgl. Tabelle 21). Dazu wurde der Zement anteilig durch inertes Quarzmehl substituiert, um die Volumenanteile der porositären Zementsteinmatrix und der porösen Zuschlagstoffe konstant zu halten. Eine Charakterisierung mit den wesentlichen Kenndaten des eingesetzten Quarzmehls kann Tabelle A 2 (Anhang A) entnommen werden.

Die genauen Mischungszusammensetzungen der Betone sind in Anhang B-II dokumentiert.

Tabelle 21: Variation des Wasserzementwertes.

Bezeichnung		wz0,7_Bg (B-Bg)* wz0,7_EPS (B-EPS)*	wz1,0_Bg wz1,0_EPS	wz1,4_Bg wz1,4_EPS	
Komponenten	Rohdichte [kg/dm ³]	Einwaage [kg/m ³]			Volumen [dm ³ /m ³]
Zement (Z) (CEM I 42,5 R)	3,1	220,0	154,0	110,0	∑(Z+QM) = 71,0
Quarzmehl (QM)	2,65	-	56,5	94,0	
Wasser effektiv (W)	1,0	154,0	154,0	154,0	154,0
					∑(Z+QM+W) = 225,0
w/z-Wert		0,7	1,0	1,4	

*) Basiszusammensetzung nach Tabelle 19

7.3 Herstellung und Probekörper

Die Herstellung der Betone erfolgte in einem 100-Liter-Zwangsmischer nach dem in Abbildung 96 dargestellten Mischregime.

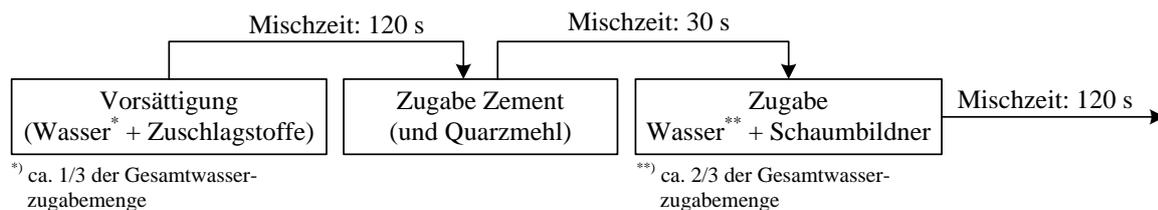


Abbildung 96: Mischregime zur Herstellung der porositierem Betone.

Zur Vorsättigung der trockenen Zuschlagsstoffe (leichte Gesteinskörnungen) wurden diese zunächst mit ca. 1/3 der Gesamtwasserzugabemenge (effektives Wasser + Saugwasser) für 120 Sekunden bei langsam drehender Mischtrommel vorgemischt. Anschließend wurden der Zement (und das Quarzmehl) hinzugeben. Nach einer Mischzeit von 30 Sekunden erfolgte die Zugabe des restlichen Wassers (ca. 2/3 der Gesamtwasserzugabemenge) zusammen mit dem Schaumbildner. Alle Komponenten wurden dann für weitere 120 Sekunden gemischt. Für die Mischungsvarianten mit EPS-Perlen konnte das Vormischen bzw. die Vorsättigung entfallen, da die EPS-Perlen im Gegensatz zu den verwendeten leichten Gesteinskörnungen kein Wasser aufsaugen (vgl. Tabelle 5, Abschnitt 5.2.5).

Zur Ermittlung der Festbetoneigenschaften und zur Untersuchung des Stauchverhaltens wurden von jeder Betonvariante Zylinderproben ($h_0/D = 300 \text{ mm}/150 \text{ mm}$) hergestellt. Aufgrund der sehr weichen bis fließfähigen Konsistenz (vgl. Abschnitt 7.4) erfolgte die Verdichtung der Frischbetone durch leichtes Stochern und Klopfen. Nach dem Verdichten wurden die Oberflächen glatt abgezogen und mit Folie abgedeckt. Die Proben wurden nach 24 Stunden ausgeschalt und anschließend bei einer Temperatur von 20 °C luftdicht in Folie gelagert. Die nicht geschalteten Stirnflächen der Proben (Einfüllseite) wurden im Alter von 21 Tagen planparallel geschliffen, um eine gleichmäßige

Lasteinleitung bei den Druckfestigkeitsprüfungen und Stauchversuchen zu gewährleisten. Die weitere Lagerung bis zur Durchführung der Versuche (im Alter von 28 ± 2 Tagen) erfolgte ohne Folie bei einer Temperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von 65 %.

7.4 Frischbetoneigenschaften

Zur Charakterisierung der Frischbetone wurden die Konsistenz, die Frischbetonrohddichte und der Luftporengehalt unmittelbar nach der Herstellung bestimmt.

Die Beurteilung der Frischbetonkonsistenz erfolgte durch die Ermittlung des Ausbreitmaßes a nach DIN EN 12350-5 [107] und eine Einteilung in die Konsistenzklassen nach DIN 1045-2 [108] bzw. DIN EN 206 [14]. Die Frischbetonrohddichte ρ_f wurde nach DIN EN 12350-6 [103] bestimmt. Der Luftporengehalt v_{Luft} (exklusive der in den porösen Zuschlagstoffen eingeschlossenen Luftporen) wurde analog zu Abschnitt 6.3.3 rechnerisch über die Frischbetonrohddichte ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 22 dokumentiert. Zusätzlich sind in Tabelle 22 die Soll-Werte des Luftporengehaltes und der Frischbetonrohddichte aufgeführt. Letztere ergeben sich aus den jeweiligen Mischungsberechnungen (vgl. Anhang B-II).

Tabelle 22: Frischbetonkennwerte (Konsistenz, Frischbetonrohddichte, rechnerischer Luftporengehalt).

Bezeichnung	Ausbreitmaß a [cm] (Konsistenzklasse)	Frischbetonrohddichte ρ_f [kg/m ³]		rechn. LP-Gehalt v_{Luft} [Vol.-%]	
		Soll	Ist	Soll	Ist
<i>Basiszusammensetzung (Tabelle 19), Blähglas 0,5/8 mm bzw. EPS 0,5/5 mm (Tabelle 20)</i>					
B-Bg $\hat{=}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{Bg}_{0,5/8} \\ \text{wz}_{0,7_Bg} \end{array} \right.$	60 (F5)	601	610	30,0	29,0
B-EPS $\hat{=}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{EPS}_{0,5/5} \\ \text{wz}_{0,7_EPS} \end{array} \right.$	58 (F5)	386	402		27,1
<i>Variation der Zuschlagstoffe (Tabelle 20), ansonsten wie Basiszusammensetzung (Tabelle 19)</i>					
Bt_0/8	51 (F4)	915	952	30,0	27,2
Bg_0,5/2	58 (F5)	649	660		28,8
Ver_0,5/8	56 (F5)	671	666		30,5
EPS_0,5/1	57 (F5)	385	396		28,0
<i>Variation des Wasserzementwertes (Tabelle 21), Blähglas 0,5/8 mm bzw. EPS 0,5/5 mm (Tabelle 20)</i>					
wz1,0_Bg	61 (F5)	592	588	30,0	30,5
wz1,0_EPS	61 (F5)	376	384		28,5
wz1,4_Bg	58 (F5)	585	591		29,3
wz1,4_EPS	60 (F5)	370	376		28,9

Die Frischbetone wiesen eine „schaumige“ und gleichzeitig sehr weiche bis fließfähige Konsistenz auf ($51 \text{ cm} \leq a \leq 61 \text{ cm}$, Konsistenzklasse F4 bis F5). Bei den Betonen mit Blähglas bzw. EPS-Perlen und einem Wasserzementwert von $w/z = 0,70$ variierte die Konsistenz unabhängig von der Korngröße der Zuschlagstoffe in sehr engen Grenzen ($57 \text{ cm} \leq a \leq 60 \text{ cm}$, Konsistenzklasse F5). Die Konsistenz des Betons mit Vermiculiten lag mit einem Ausbreitmaß von 56 cm (Konsistenzklasse F5) ebenfalls in der gleichen Größenordnung. Der Beton mit Blähton wies ein Ausbreitmaß von 51 cm auf (Konsistenzklasse F4). Die vergleichsweise etwas steifere Konsistenz dieses Betons

war auf den höheren Feinkornanteil des Blähton-Leichtsandes und die damit verbundene höhere spezifische Kornoberfläche zurückzuführen. Die Variation des Wasserzementwertes (Substitution des Zements durch Quarzmehl) führte bei ansonsten gleicher Zusammensetzung zu keinen nennenswerten Unterschieden in der Frischbetonkonsistenz.

Die ermittelten Frischbetonrohddichten lagen zwischen 952 kg/m^3 (Bt_0/8) und 376 kg/m^3 (wz1,4_EPS) und wichen nur geringfügig von den Soll-Frischrohddichten ab ($|\Delta\rho_f| \leq 37 \text{ kg/m}^3$).

Die Differenz zwischen dem rechnerisch ermittelten Luftporengehalt und dem Soll-Luftporengehalt war für alle Mischungsvarianten mit $|\Delta v_{\text{Luft}}| \leq 2,9 \text{ Vol.-%}$ ebenfalls sehr gering. Diesbezüglich ist jedoch anzumerken, dass übliche Schwankungen in der Kornrohddichte und Wasseraufnahme der porösen Zuschlagstoffe zu einer gewissen Ungenauigkeit bei der rechnerischen Ermittlung des Luftporengehaltes führen können. Entsprechende Abweichungen zwischen dem rechnerischen und tatsächlichen Luftporengehalt sind daher nicht auszuschließen.

7.5 Festbetoneigenschaften

Die Festbetone wurden anhand ihrer Festbetonrohddichte und Druckfestigkeit charakterisiert. Des Weiteren wurde das Betongefüge an Schnittbildern einzelner Proben hinsichtlich einer gleichmäßigen Verteilung der porösen Zuschlagstoffe untersucht.

Die Druckfestigkeit wurde nach DIN EN 12390-3 [106] im Alter von 28 ± 2 Tagen an jeweils drei Zylinderproben ($h_0/D = 300 \text{ mm}/150 \text{ mm}$) ermittelt. Die Festbetonrohddichte wurde nach DIN EN 12390-7 [104] unmittelbar vor der Druckfestigkeitsprüfung bestimmt. Die Einzelwerte der Festbetonrohddichte und Druckfestigkeit sind in Tabelle A 23 (Anhang C-II) dokumentiert. Die Mittelwerte der Festbetonrohddichten ρ_s und Druckfestigkeiten $f_{\text{cm,cyl}}$ sind in Tabelle 23 aufgeführt.

Tabelle 23: Festbetonkennwerte (Festbetonrohddichte, Druckfestigkeit).

Bezeichnung	Festbetonrohddichte ρ_s [kg/m ³]	Druckfestigkeit $f_{\text{cm,cyl}}$ [N/mm ²]
<i>Basiszusammensetzung (Tabelle 19), Blähglas 0,5/8 mm bzw. EPS 0,5/5 mm (Tabelle 20)</i>		
B-Bg \triangleq $\left\{ \begin{array}{l} \text{Bg}_{0,5/8} \\ \text{wz0,7_Bg} \end{array} \right.$	584	3,18
B-EPS \triangleq $\left\{ \begin{array}{l} \text{EPS}_{0,5/5} \\ \text{wz0,7_EPS} \end{array} \right.$	365	0,79
<i>Variation der Zuschlagstoffe (Tabelle 20), ansonsten wie Basiszusammensetzung (Tabelle 19)</i>		
Bt_0/8	927	6,13
Bg_0,5/2	624	3,57
Ver_0,5/8	569	0,85
EPS_0,5/1	382	0,76
<i>Variation des Wasserzementwertes (Tabelle 21), Blähglas 0,5/8 mm bzw. EPS 0,5/5 mm (Tabelle 20)</i>		
wz1,0_Bg	564	1,85
wz1,0_EPS	351	0,46
wz1,4_Bg	576	1,05
wz1,4_EPS	344	0,27

Die Festbetonrohddichte betrug zwischen 927 kg/m^3 (Bt_0/8) und 344 kg/m^3 (wz1,4_EPS). Infolge der Austrocknung der Proben während der siebentägigen Luftlagerung bis zum Prüfzeitpunkt war eine leichte Abnahme der Festbetonrohddichte im Vergleich zur Frischbetonrohddichte festzustellen.

Die Druckfestigkeiten der Betone mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,70$ lagen zwischen $6,13 \text{ N/mm}^2$ (Bt_0/8) und $0,76 \text{ N/mm}^2$ (EPS_0,5/1). Diese sind in Abhängigkeit der Festbetonrohddichte in Abbildung 97 (links) dargestellt. Der Einfluss des Wasserzementwertes auf die Druckfestigkeit der Betone mit Blähglas $0,5/8 \text{ mm}$ bzw. EPS-Perlen $0,5/5 \text{ mm}$ ist in Abbildung 97 (rechts) dargestellt.

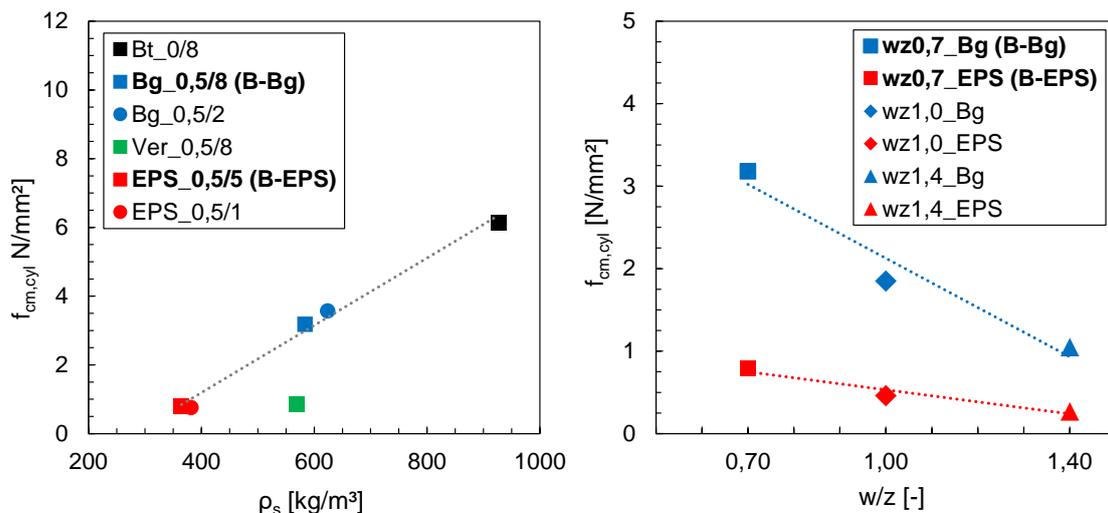


Abbildung 97: Druckfestigkeit der Betone mit $w/z = 0,70$ in Abhängigkeit der Festbetonrohddichte, Variation der porösen Zuschlagstoffe (links), Einfluss des Wasserzementwertes auf die Druckfestigkeit der Betone mit Blähglas $0,5/8 \text{ mm}$ bzw. EPS-Perlen $0,5/5 \text{ mm}$ (rechts).

Da die Druckfestigkeiten der Einzelkomponenten gut mit der Kornrohddichte (poröse Zuschlagstoffe) bzw. Festrohddichte (porosierter Zementstein) korrelieren (vgl. Abschnitt 5.2.6 und Abschnitt 6.4.3), ergab sich bei gleichem Luftgehalt ($v_{Luft} \approx 30 \text{ Vol.-%}$) und gleichem Wasserzementwert ($w/z = 0,70$) erwartungsgemäß eine deutliche Abhängigkeit zwischen der Betondruckfestigkeit und der Festbetonrohddichte (vgl. Abbildung 97, links).

Bei den Betonen mit Blähon, Blähglas und EPS-Perlen war ein nahezu linearer Anstieg der Druckfestigkeit mit zunehmender Festbetonrohddichte festzustellen. Dieser lineare Zusammenhang ließ sich jedoch nicht auf den Beton mit Vermiculiten übertragen. Die Festbetonrohddichte dieses Betons lag mit 569 kg/m^3 in der Größenordnung der Betone mit Blähglas und war damit deutlich größer als die Festbetonrohddichten der Betone mit EPS-Perlen. Dennoch war die Druckfestigkeit mit $0,85 \text{ N/mm}^2$ in etwa genauso gering wie die der Betone mit EPS-Perlen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass Vermiculite im Vergleich zu EPS-Perlen eine deutlich höhere Kornrohddichte aufweisen und somit zu einer vergleichsweise höheren Festbetonrohddichte führen. Gleichzeitig weisen

Vermiculite aufgrund ihrer charakteristischen Kornstruktur jedoch ebenfalls keine nennenswerte Korndruckfestigkeit auf (vgl. Abschnitt 5.2.6).

Bei den Betonen mit EPS-Perlen war die Abweichung in der Druckfestigkeit in Abhängigkeit der EPS-Korngröße marginal. Hingegen war bei den Betonen mit Blähglas ein leichter Anstieg der Druckfestigkeit mit abnehmender Korngröße festzustellen. Dieser war maßgeblich auf die mit abnehmender Korngröße zunehmende Korndruckfestigkeit des Blähglases zurückzuführen. Die Korrelation zwischen der Kornrohichte und -druckfestigkeit in Abhängigkeit der Korngröße des Blähglases (vgl. Abbildung 54, Abschnitt 5.2.6) spiegelte sich dabei in der annähernd linearen Beziehung zwischen der Betondruckfestigkeit und Festbetonrohichte wider (vgl. Abbildung 97, links).

Erwartungsgemäß führte die Erhöhung des Wasserzementwertes aufgrund der damit einhergehenden Zunahme der Kapillarporosität bzw. Abnahme der Zementsteinfestigkeit zu einer Reduktion der Betondruckfestigkeit. Der Zusammenhang zwischen dem Wasserzementwert und der Druckfestigkeit war dabei nahezu linear. Prozentual betrachtet war die Abnahme der Druckfestigkeit bei den Betonen mit Blähglas und denen mit EPS-Perlen in etwa gleich groß. Ausgehend von einem Wasserzementwert von $w/z = 0,70$ betrug diese rd. 42 % ($w/z = 1,00$) bzw. 66 % ($w/z = 1,40$).

Exemplarisch für die untersuchten Betone zeigt Abbildung 98 Schnittbilder von Zylinderproben der Betone mit Blähglas 0,5/8 mm (B-Bg) bzw. EPS-Perlen 0,5/5 mm (B-EPS). Augenscheinlich war eine homogene Verteilung der porösen Zuschlagstoffe zu erkennen. Anzeichen, die auf ein Aufschwimmen oder eine Sedimentation der Zuschlagstoffe hindeuten, wurden nicht festgestellt. Diese Beobachtung konnte auch für die anderen Betone bestätigt werden.



Abbildung 98: Schnittbilder von Zylinderproben ($h_0/D = 300 \text{ mm}/150 \text{ mm}$) des Betons mit Blähglas 0,5/8 mm (links) bzw. EPS-Perlen 0,5/5 mm (rechts).

7.6 Stauchversuche

Das Stauchverhalten des porosittem Betons wurde in einachsigen Druckversuchen an Zylinderproben ($h_0/D = 300 \text{ mm}/150 \text{ mm}$) mit Querdehnungsbehinderung in einer vollumschließenden Probenhalterung untersucht. Der verwendete Versuchsaufbau ist in Abbildung 99 dargestellt.

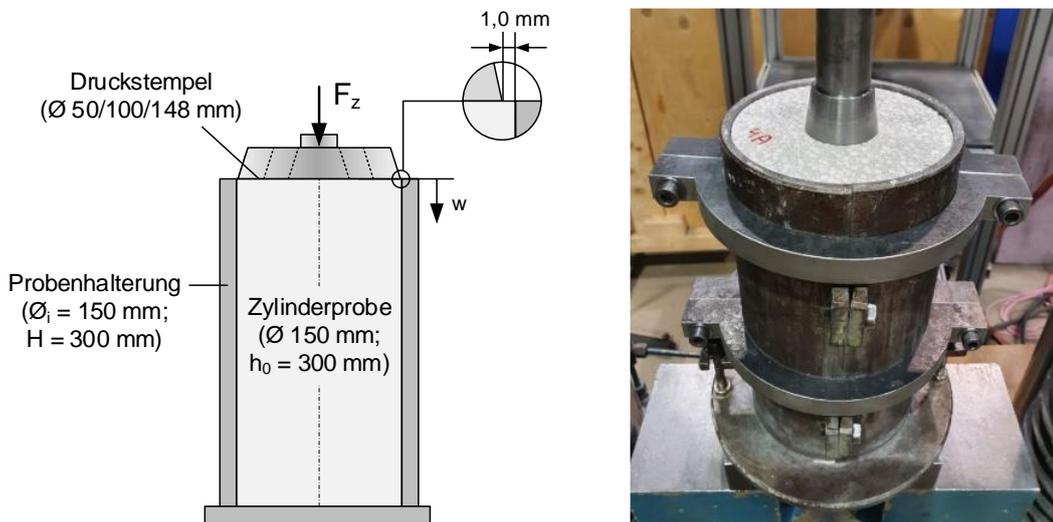


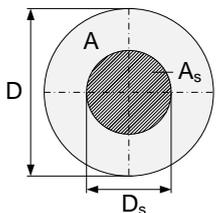
Abbildung 99: Einachsige Druckversuche an Zylinderproben: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (links), Foto des Versuchsaufbaus bei teilflächiger Druckbelastung [88, 109] (rechts).

Als Probenhalterung kam eine zylindrische, einseitig geschlitzte Stahlschale mit einem Innendurchmesser von 150 mm , einer Manteldicke von 8 mm und einer Höhe von 300 mm zum Einsatz. Die passgenauen Zylinderproben wurden formschlüssig in die Probenhalterung eingebaut. Um potenzielle Reibungseffekte zwischen der Mantelfläche der Probe und der Innenwandung der Probenhalterung zu reduzieren, wurde Letztere mit einem PTFE-Spray benetzt. Zur Minimierung der Querdehnung der Proben während der Versuche wurde die geschlossene Probenhalterung zusätzlich zu der vorhandenen Verschlussvorrichtung (Verschraubung über angeschweißte Laschen) durch zwei massive Stahlschellen umschnürt (vgl. Abbildung 99, rechts).

Die Kraft wurde über Druckstempel zentrisch von oben in die Proben eingeleitet. Um verschiedene anwendungsbezogene Randbedingungen hinsichtlich teil- bzw. vollflächiger Stauchungen zu simulieren, wurde der Durchmesser des Druckstempels variiert ($D_s = 50, 100, 148 \text{ mm}$). Die resultierenden Lastflächenverhältnisse sind in Tabelle 24 aufgeführt. Um bei vollflächigen Stauchversuchen keine Reibung zwischen dem Druckstempel und der Probenhalterung zu generieren und ein potenzielles Verkanten des Druckstempels zu vermeiden, wurde der Durchmesser des Druckstempels gegenüber dem der Probe um 2 mm reduziert ($D_s = 148 \text{ mm}$, $A/A_s \approx 1,0$), sodass ein umlaufendes Spaltmaß zwischen der Außenkante des Druckstempels und der Innenwandung der Probenhalterung von $1,0 \text{ mm}$ vorlag. Durch die seitliche Abschrägung der Druckstempel (vgl. Abbildung 99) wurden auch Reibungseffekte minimiert, die unter Teilflächenbelastung beim Eindringen der Druckstempel in die Probe auftraten.

Tabelle 24: Abmessungen der Lastflächen und resultierende Lastflächenverhältnisse bei teil- bzw. vollflächigen Stauchversuchen.

D [mm]	A [cm ²]	D _s [mm]	A _s [cm ²]	A/A _s [-]
150	176,7	50	19,6	9,0
		100	78,5	2,25
		148	172	≈ 1,0



Die maximale Lastkapazität der verwendeten Prüfmaschine betrug 250 kN. Die Versuche wurden weggeregelt mit einer Geschwindigkeit von 20 mm/min durchgeführt. Der Weg des Druckstempels wurde zum einen über den Kolbenweg der Prüfmaschine und zum anderen über induktive Wegaufnehmer erfasst. Die Versuche wurden bei einer Stauchung von $\varepsilon_{z,\max} = 75\%$ bzw. einer Kraft von $F_{z,\max} = 240$ kN automatisch beendet.

Der Einfluss der Materialvariationen (Art und Korngröße der Zuschlagstoffe, Wasserzementwert) wurde unter Teilflächenbelastung mit einem konstanten Lastflächenverhältnis von $A/A_s = 2,25$ untersucht. Die Stauchversuche unter Variation des Lastflächenverhältnisses wurden exemplarisch am Beton mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,70$ und Blähglas 0,5/8 mm (B-Bg) durchgeführt. Eine Übersicht der Versuchsmatrix mit der Anzahl der für die jeweilige Variation durchgeführten Stauchversuche ist in Tabelle 25 gegeben. Das Alter der Betone zum Zeitpunkt der Stauchversuche betrug 28 ± 2 Tage.

Tabelle 25: Versuchsmatrix und Anzahl der Stauchversuche.

Betonvariante	Lastflächenverhältnis A/A _s [-]		
	≈ 1,0	2,25	9,0
	Anzahl der Stauchversuche		
B-Bg \triangleq { Bg_0,5/8 wz0,7_Bg	3	6	3
B-EPS \triangleq { EPS_0,5/5 wz0,7_EPS	-	6	-
Bt_0/8	-	3	-
Bg_0,5/2	-	3	-
Ver_0,5/8	-	3	-
EPS_0,5/1	-	3	-
wz1,0_Bg	-	3	-
wz1,0_EPS	-	3	-
wz1,4_Bg	-	3	-
wz1,4_EPS	-	3	-

Das Stauchverhalten wird im Folgenden anhand der gemittelten Spannungs-Stauchungskurven analysiert. Die Einzelkurven sind in Anhang D-II und D-III dokumentiert.

7.7 Stauchverhalten

7.7.1 Charakteristisches Spannungs-Stauchungsverhalten unter Teilflächenbelastung

Qualitativ zeigten alle der hier untersuchten Betone unter Teilflächenbelastung ($A/A_s = 2,25$) und sonst identischen Versuchsrandbedingungen ein sehr ähnliches Spannungs-Stauchungsverhalten, dessen wesentlichen Charakteristika im Folgenden zunächst am Beispiel des Betons mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,70$ und Blähglas 0,5/8 mm (B-Bg) beschrieben werden. Die gemittelte Spannungs-Stauchungskurve dieses Betons ist in Abbildung 100 dargestellt.

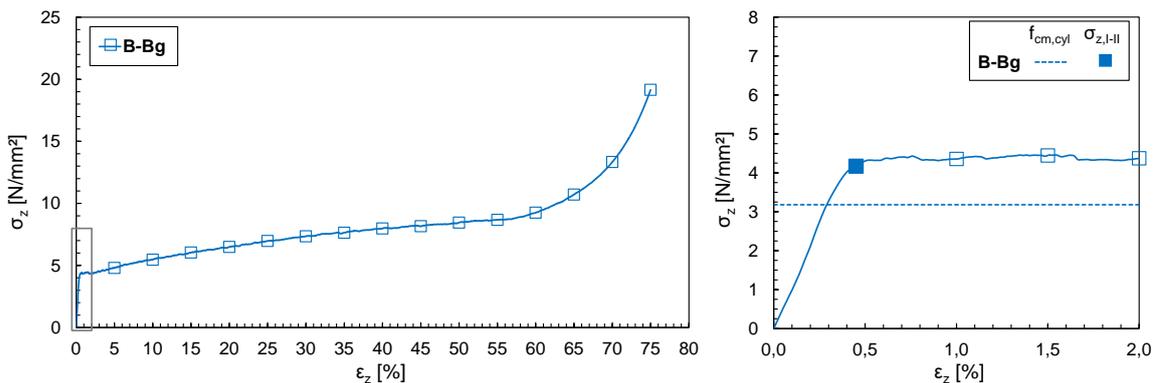


Abbildung 100: Spannungs-Stauchungskurve des Betons mit Blähglas 0,5/8 mm (B-Bg) im Stauchungsbereich 0 bis 75 % (links) und 0 bis 2 % Stauchung (rechts).

Analog zum porosierten Zementsteins (vgl. Abschnitt 6.6.1) lässt sich das Spannungs-Stauchungsverhalten prinzipiell in die drei für zelluläre Werkstoffe charakteristischen Bereiche (I: linear-elastischer Bereich, II: plastischer Bereich, III: Verfestigungsbereich) unterteilen (vgl. Abschnitt 2.3.2).

Nach Belastungsbeginn zeigte die Spannungs-Stauchungskurve zunächst einen steilen, annähernd linearen Anstieg (linear-elastischer Bereich). Die Grenzspannung $\sigma_{z,I-II}$ (Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich) der teilflächig belasteten, umschnürten Probe betrug 4,17 N/mm² und lag damit 31 % über der einachsigen Druckfestigkeit dieses Betons von $f_{cm,cyl} = 3,18$ N/mm² ($\sigma_{z,I-II}/f_{cm,cyl} = 1,31$).

Unter den vorliegenden Versuchsrandbedingungen kam es zu zwei sich überlagernden Umschnüreffekten. Zum einen lag eine äußere Umschnürung durch die Probenhalterung vor, zum anderen ergab sich aufgrund der teilflächigen Lasteinleitung eine innere Umschnürung durch den umgebenden, unbelasteten Betonteil. Infolge dieser Umschnürungen konnte sich die aus der Stauchung resultierende Querdehnung unter der Lastfläche nicht unbehindert einstellen, sodass es zu einer dreiachsigen Spannungsentwicklung innerhalb der Probe kam. Die im Vergleich zur einachsigen Druckfestigkeit höhere Grenzspannung ist auf festigkeitssteigernde Effekte zurückzuführen, die bekanntermaßen aus den dreiachsigen Spannungszuständen resultierten (vgl. Abschnitt 2.2.5 bis Abschnitt 2.2.7).

Ähnlich wie beim porosierten Zementstein (vgl. Abschnitt 6.6.1) ließ das abrupte Abflachen der Spannungs-Stauchungskurve nach Überschreiten der Grenzspannung auf erste lokale Bruchvorgänge innerhalb des Betongefüges schließen. Die dabei stattfindenden Bruchmechanismen wurden zunächst von einem lokalen Stabilitätsversagen einzelner Porenstege dominiert. Aus der für Teilflächenbelastung charakteristischen Spannungsverteilung (vgl. Abschnitt 2.2.7) lässt sich ableiten, dass die initialen Bruchvorgänge im Bereich unmittelbar unterhalb der Lastfläche eingeleitet wurden, da dort die maximalen Druckspannungen herrschten. Eine ausgeprägte Rissbildung wurde aufgrund der Querdehnungsbehinderung durch die Umschnürungen jedoch unterdrückt, sodass ein Versagen der Probe verhindert wurde und sich ein plastisches Stauchverhalten einstellen konnte.

Nach Überschreiten der Grenzspannung führte die Stauchung neben weiteren Bruchvorgängen zu einer Verdichtung des Betons unterhalb der Lastfläche. Des Weiteren kam es zu einem Eindringen des Druckstempels in die Probe. Dabei fand ein Abscheren entlang des Stempelumfangs (d.h. zwischen dem belasteten und dem unbelasteten Betonteil) statt. Die sich überlagernden Bruch-, Abscher- und Verdichtungsvorgänge führten bis zu einer Stauchung von ca. 55 % zu einem mäßigen und leicht degressiven Spannungsanstieg. Die Spannung bei $\varepsilon_z = 55 \%$ betrug ungefähr das Doppelte der Grenzspannung. Aus dem degressiven Kurvenverlauf lässt sich ableiten, dass die zunehmende innere Gefügezerstörung im plastischen Bereich, trotz der sich damit überlagernden Verdichtungseffekte, zu einer Abnahme des Widerstands gegen die Stauchung führte.

Mit zunehmender Stauchung machte sich die Verdichtung dann deutlich bemerkbar. Diese leitete den Übergang in den Verfestigungsbereich ein, der durch einen progressiven Spannungsanstieg bis zum Versuchsende gekennzeichnet war. Die Spannung bei Versuchsende ($\varepsilon_{z,max} = 75 \%$) war um das rd. 2,2-fache größer als die Spannung bei $\varepsilon_z = 55 \%$. Der Kurvenverlauf bis zum Versuchsende lässt darauf deuten, dass der Spannungszuwachs bei Stauchungen $> 75 \%$ noch weiter zugenommen hätte.

Die Verdichtungs- und damit einhergehenden Verfestigungseffekte wurden anhand der Struktur- und Gefügeänderungen nach verschiedenen Stauchungsstufen genauer untersucht. Die Schnittflächen (entlang der Längsachse) von Proben des Betons mit Blähglas 0,5/8 mm (B-Bg) bei Stauchungen von 0, 50 und 75 % sind in Abbildung 101 dargestellt.

Die gestauchten Proben waren durch deutliche Gefügeunterschiede innerhalb der Schnittflächen charakterisiert (vgl. Abbildung 101). Diese spiegelten die lokal stark variierenden Spannungsverteilungen wider, die sich unter den vorliegenden Randbedingungen während der Stauchversuche einstellten. In den unbelasteten Randbereichen oberhalb der eingedrückten Teilfläche wurden keine wesentlichen Unterschiede zum Gefüge der unbelasteten Probe (vgl. Abbildung 101, oben) detektiert. Lediglich nahe der Abscherkante waren leichte Gefügauflockerungen infolge der Penetration des Druckstempels festzustellen. Hingegen waren die Teilbereiche unterhalb der eingedrückten Teilfläche, in denen konzentrierte Druckspannungen auftraten, durch ein stark komprimiertes Gefüge gekennzeichnet (vgl. Abbildung 101, oben Mitte und rechts).

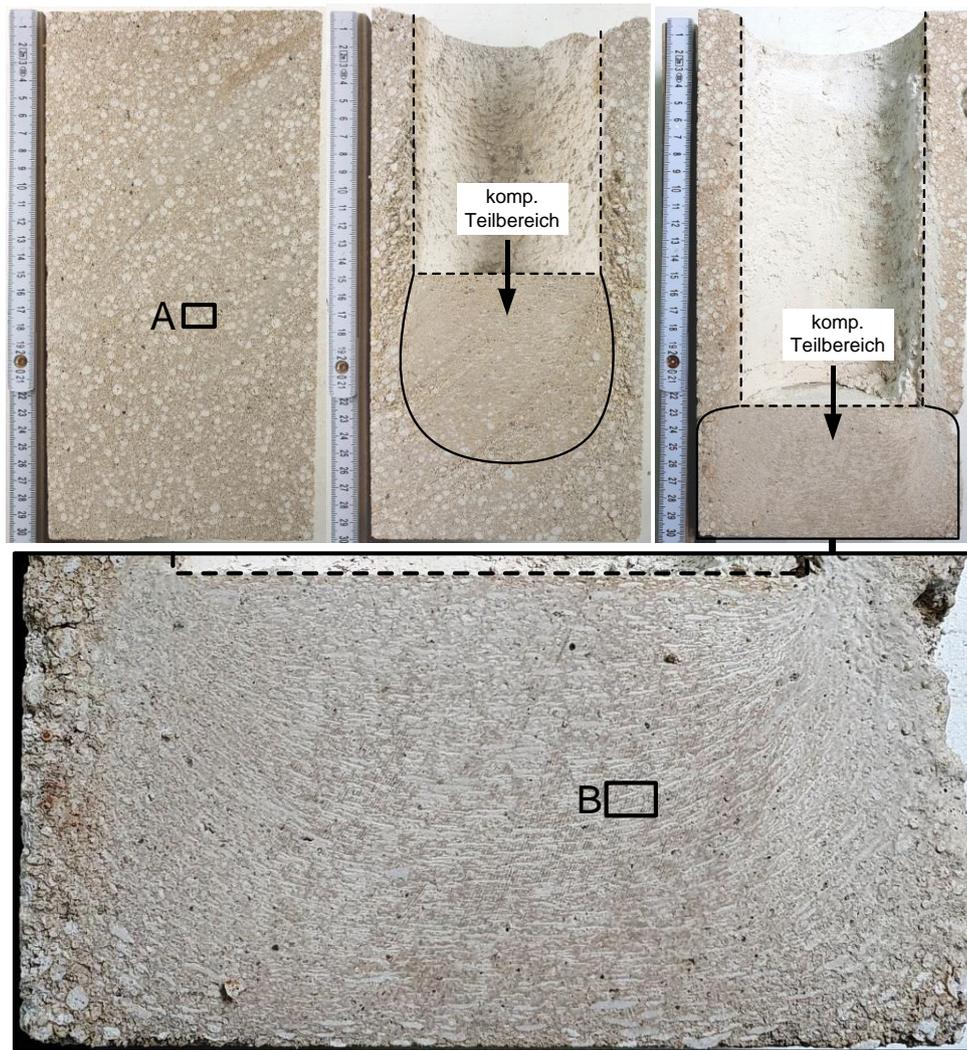


Abbildung 101: Oben: Schnittbilder von Zylinderproben des Betons mit Blähglas 0,5/8 mm (B-Bg) bei Stauchungen von $\varepsilon_z = 0\%$ (links), $\varepsilon_z = 50\%$ (Mitte) und $\varepsilon_z = 75\%$ (rechts), unten: Detailaufnahme des gestauchten Bereichs unterhalb der eingedrückten Lastfläche bei $\varepsilon_z = 75\%$ [109].

Exemplarisch für Bereiche mit ungestörtem bzw. komprimiertem Gefüge zeigt Abbildung 102 lichtmikroskopische Gefügebildungen (12-fache Vergrößerung) innerhalb der Teilbereiche A und B (vgl. Abbildung 101). Im Bereich A der ungestauchten Probe war das Gefüge durch die stark porosierte Zementsteinmatrix sowie die mehr oder weniger kreisförmigen Querschnittsflächen der eingebetteten porösen Blähglaskörner charakterisiert (Abbildung 102, links). Im Vergleich dazu waren im Bereich B der bis $\varepsilon_z = 75\%$ gestauchten Probe quasi keine Poren mehr innerhalb der Zementsteinmatrix zu erkennen (Abbildung 102, rechts). Des Weiteren wurde die starke Kompression in diesem Bereich anhand der veränderten Geometrie der Blähglaskörner deutlich. Die vorher annähernd runden Körner mit Durchmessern im Millimeterbereich wurden in eine flache, plattige Form mit wenigen Zehntelmillimetern Höhe gepresst. Dies zeigt, dass die mit der Stauchung einhergehende Verdichtung unterhalb der Lastfläche zu einer Reduktion des Porenvolumens führte, und zwar sowohl in Bezug auf die künstlich eingeführten Luftporen innerhalb der Zementsteinmatrix als auch in Bezug auf die Poren innerhalb der Zuschlagstoffe (hier: Blähglas).

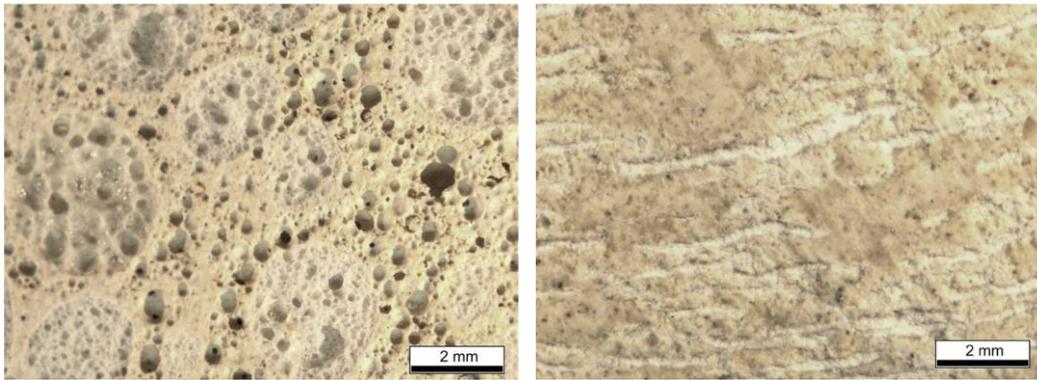


Abbildung 102: Lichtmikroskopische Gefügeaufnahme (12-fache Vergrößerung, Maßstab 2 mm) der in Abbildung 101 markierten Teilbereiche A (links) und B (rechts) innerhalb der Schnittflächen [85, 88, 109].

Insbesondere in Abbildung 101 (unten) ist darüber hinaus zu erkennen, dass die Ausrichtung der zusammengesetzten Blähglaskörner innerhalb der komprimierten Teilbereiche variierte. Während die zusammengesetzten Blähglaskörner mit ihrer plattigen Form in der Nähe der vertikalen Mittelachse der Probe annähernd senkrecht zur Belastungsrichtung ausgerichtet waren, zeigte sich mit zunehmendem Abstand zur Mittelachse eine zunehmend schräge Ausrichtung. Diese stromlinienförmige Ausrichtung der Blähglaskörner lässt darauf schließen, dass sich die Stauchung des Gefüges senkrecht zu den Druckspannungstrajektorien einstellte, die entsprechend der aus den Versuchsrandbedingungen resultierenden dreiachsigen Spannungszustände verliefen.

Bei der bis $\varepsilon_z = 50\%$ gestauchten Probe (vgl. Abbildung 101, oben Mitte) erstreckte sich der Teilbereich, indem ein komprimiertes Gefüge erkennbar war, von der Unterkante der Lastfläche bis in eine Tiefe von ca. 11 cm unterhalb der Lastfläche. Unterhalb dieses Teilbereichs lagen keine Anzeichen eines komprimierten Gefüges mehr vor, woran die Abnahme der Druckspannungen mit zunehmendem Abstand zur Lastfläche infolge der Spannungsausbreitung erkenntlich wurde. Auch senkrecht zur Belastungsrichtung waren Unterschiede hinsichtlich der Gefügekompression festzustellen. Auf Höhe der eingedrückten Lastfläche entsprach die Breite des komprimierten Teilbereichs ungefähr dem Durchmesser der Lastfläche. Bis zu einer Tiefe von ca. 5 cm unterhalb der Lastfläche zeigte sich eine leichte Verbreiterung des komprimierten Teilbereichs, welche ebenfalls auf die Ausbreitung der Druckspannungen zurückgeführt werden kann. Dementsprechend war der komprimierte Teilbereich sowohl nach außen (quer zur Belastungsrichtung) als auch nach unten (in Belastungsrichtung) von noch nicht komprimiertem Material umgeben. Gleichzeitig zeigte die Spannungs-Stauchungskurve bei dieser Stauchung ($\varepsilon_z = 50\%$) noch keine Anzeichen einer wesentlichen Verfestigung (vgl. Abbildung 100).

Im Gegensatz dazu erstreckte sich der komprimierte Teilbereich bei der bis $\varepsilon_z = 75\%$ gestauchten Probe (Abbildung 101, oben rechts und unten) zum einen über die gesamte Resthöhe (d. h. von der eingedrückten Lastfläche bis zur Unterkante der Probe). Zum anderen hatte dieser sich auch quer zur Belastungsrichtung über annähernd die gesamte Breite (d. h. bis in die äußersten Randbereiche außerhalb des direkt belasteten Teilbereichs der Probe) ausgebreitet. Bei dieser Stauchung war die

Verfestigung in Form des progressiven Spannungsanstiegs bereits deutlich fortgeschritten (vgl. Abbildung 100). Daraus kann abgeleitet werden, dass die Verfestigung infolge der Verdichtung des Betons ab einer Stauchung einsetzte, bei der sich der komprimierte Teilbereich unterhalb der Lastfläche annähernd über die gesamte Breite und Resthöhe der Probe erstreckte.

In Bezug auf das plastische Stauchvermögen, das letztlich durch die zunehmende Verfestigung begrenzt wird, kann daraus geschlossen werden, dass dieses unter den vorliegenden Randbedingungen – anders als bei den vollflächigen Stauchversuchen am porositäten Zementstein – nicht allein vom stauchbaren Porenvolumen des Betons, sondern ebenfalls maßgeblich von der Ausbreitung des komprimierten Teilbereichs unterhalb der Lastfläche im Verhältnis zum umgebenden, noch nicht komprimierten Teilbereich abhängig ist. Folglich ist davon auszugehen, dass das plastische Stauchvermögen durch die Versuchsrandbedingungen (u. a. Lastflächenverhältnis) sowie die daraus resultierenden Spannungsverteilungen innerhalb der Probe beeinflusst wird (vgl. Abschnitt 7.7.3).

7.7.2 Materialeinflüsse

7.7.2.1 *Art der Zuschlagstoffe*

Die gemittelten Spannungs-Stauchungskurven der Betone mit Blähton 0/8 mm, Blähglas 0,5/8 mm, Vermiculiten 0,5/8 mm und EPS-Perlen 0,5/5 mm sind in Abbildung 103 dargestellt. Wie zu erkennen ist, variierte das Spannungs-Stauchungsverhalten der Betone in Abhängigkeit der verwendeten Zuschlagstoffe deutlich.

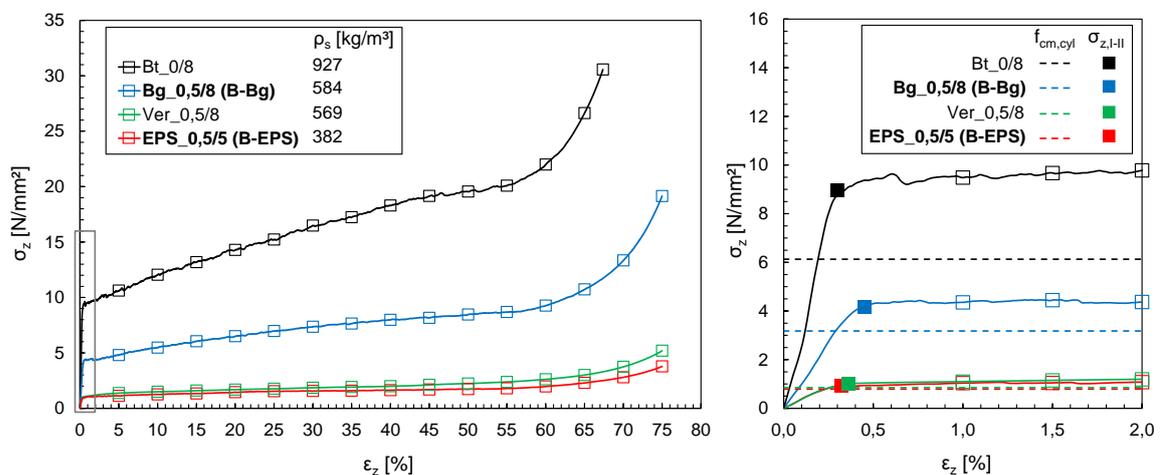


Abbildung 103: Spannungs-Stauchungskurven der Betone mit Blähton 0/8 mm, Blähglas 0,5/8 mm, Vermiculiten 0,5/8 mm und EPS-Perlen 0,5/5 mm im Stauchungsbereich von 0 bis 75 % (links) bzw. 0 bis 2 % Stauchung (rechts).

Im elastischen Bereich war bei den Betonen mit Blähton, Blähglas und EPS-Perlen festzustellen, dass die initiale Steifigkeit sowie Grenzspannung mit zunehmender Festbetonrohdenichte zunahm (vgl. Abbildung 103, rechts). Bei einer um 545 kg/m^3 höheren Festbetonrohdenichte des Betons mit Blähton im Vergleich zu dem mit EPS-Perlen waren die initiale Steifigkeit um das rd. 7,6-fache

und die Grenzspannung um das rd. 10,4-fache größer. Dies war indirekt auf die variierenden Kornrohdichten der Zuschlagstoffe zurückzuführen. Je höher die Kornrohdichte war, desto höher waren die Steifigkeit und Festigkeit der porösen Zuschlagstoffe (vgl. Abschnitt 5.2.6 und 5.4). Gleichzeitig nahm die Festbetonrohdichte (bei ansonsten gleicher Zusammensetzung) mit zunehmender Kornrohdichte zu. Für die zuvor genannten Betone lässt sich der Einfluss der Zuschlagstoffe im elastischen Bereich daher sehr präzise über die Korrelationen zur Festbetonrohdichte abbilden (Abbildung 104). Mit zunehmender Festbetonrohdichte stiegen die initiale Steifigkeit und Grenzspannung annähernd linear an.

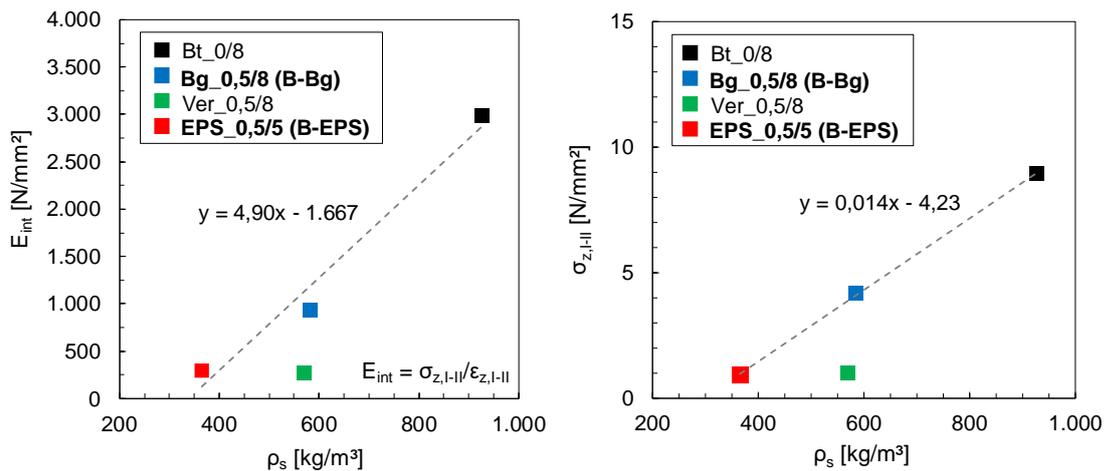


Abbildung 104: Initiale Steifigkeit (links) und Grenzspannung (rechts) in Abhängigkeit der Festbetonrohdichte (Variation der Zuschlagstoffe).

Wie auch in Bezug auf die Betondruckfestigkeit (vgl. Abschnitt 7.5) traf dieser lineare Zusammenhang jedoch nicht für den Beton mit Vermiculiten zu. Trotz der deutlich höheren Kornrohdichten im Vergleich zu den EPS-Perlen, weisen Vermiculite aufgrund ihrer charakteristischen Kornstruktur ebenfalls keine nennenswerte Steifigkeit sowie Festigkeit auf (vgl. Abschnitt 5.2.6 und 5.4). Dementsprechend war die Festbetonrohdichte des Betons mit Vermiculiten im Vergleich zu dem mit EPS-Perlen zwar deutlich größer, jedoch lagen die initialen Steifigkeiten bzw. Grenzspannungen dieser Betone auf einem ähnlich geringen Niveau (vgl. Abbildung 104).

Verglichen mit den einachsigen Druckfestigkeiten waren die Grenzspannungen der Betone um 16 % (EPS_0,5/5) bis 46 % (Bt_0,5/8) größer. Dies war auf die sich überlagernden Umschnürungseffekte zurückzuführen (vgl. Abschnitt 6.6.1). Tendenziell nahm die auf die einachsige Druckfestigkeit bezogene Grenzspannung mit zunehmender Festbetonrohdichte geringfügig zu (Abbildung 105). Diese Tendenz ist auch für die Steigerung der aufnehmbaren Spannungen von Leichtbeton unter Teilflächenbelastung (bzw. unter dem Einfluss einer Umschnürung) bekannt und ist maßgeblich auf die mit zunehmender Kornrohdichte zunehmende Steifigkeit der Gesteinskörnung (hier: poröse Zuschlagstoffe) zurückzuführen (vgl. Abschnitt 2.2.6 und 2.2.7). Aus den oben genannten Gründen in Zusammenhang mit der charakteristischen Kornstruktur der Vermiculite lag auch die bezogene Grenzspannung des Betons mit Vermiculiten, trotz der höheren Festbetonrohdichte, in einer ähnlichen Größenordnung wie die des Betons mit EPS-Perlen (vgl. Abbildung 105).

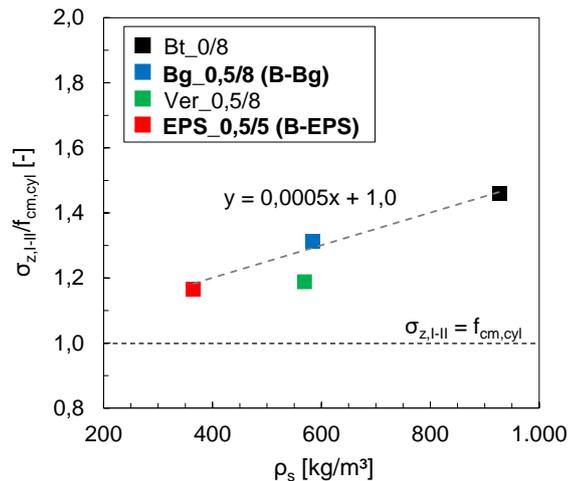


Abbildung 105: Bezogene Grenzspannung in Abhängigkeit der Festbetonrohddichte (Variation der Zuschlagstoffe).

Der Übergang vom plastischen Bereich in den Verfestigungsbereich fand unabhängig von der Art der porösen Zuschlagstoffe bei einer Stauchung zwischen ca. 55 und 60 % statt (vgl. Abbildung 103, links). Ein nennenswerter Einfluss der Zuschlagstoffe auf das plastische Stauchvermögen konnte somit ausgeschlossen werden. Dies war darauf zurückzuführen, dass der Verfestigungsbeginn infolge der Verdichtung des Betons maßgeblich von der lokalen Ausbreitung des komprimierten Teilbereichs unterhalb der Lastfläche im Verhältnis zum umgebenden, noch nicht komprimierten Teilbereich bestimmt wurde (vgl. Abschnitt 6.6.1). Die Ausbreitung des komprimierten Teilbereichs war wiederum von den Spannungsverteilungen innerhalb der Probe und somit von den Versuchsrandbedingungen abhängig. Unter den hier vorliegenden identischen Randbedingungen ergaben sich daher keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf das plastische Stauchvermögen der Betone. Diese Erkenntnis konnte auch für die anderen Materialvariationen (Korngröße der Zuschlagstoffe, Wasserzementwert) bestätigt werden (vgl. Abschnitt 7.7.2.2 und 7.7.2.3).

Für die nachfolgenden Analysen des Stauchverhaltens nach Überschreiten des elastischen Bereichs wurden die spezifischen Spannungszuwächse der Betone ($\Delta\sigma_{z,sp-B}$) im plastischen Bereich (Stauchungsintervall $I_\varepsilon[\varepsilon_{z,I-II}; 55\%]$) und Verfestigungsbereich (Stauchungsintervall $I_\varepsilon[55\%; \varepsilon_{z,max}]$) ermittelt. Diese geben den absoluten Spannungszuwachs im jeweiligen Stauchungsintervall bezogen auf die zugehörige relative Stauchung an.

Die spezifischen Spannungszuwächse der Betone wurden mit denen der Zuschlagstoffe ($\Delta\sigma_{z,sp-Z}$) verglichen (Abbildung 106). Letztere wurden aus den spezifischen Spannungszuwächsen der einzelnen Korngruppen (vgl. Tabelle 7, Abschnitt 5.4.2) unter Berücksichtigung ihrer Volumenanteile (vgl. Tabelle 20) berechnet.

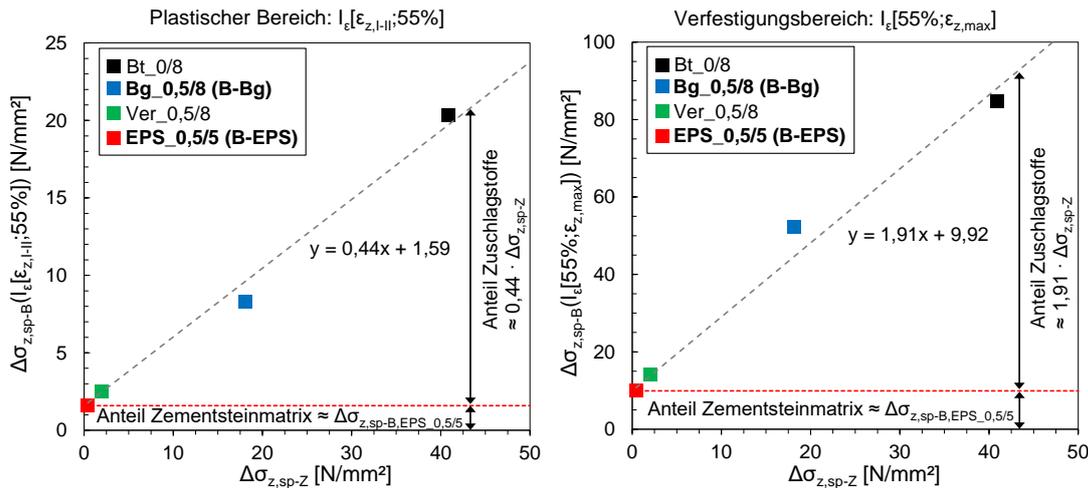


Abbildung 106: Spezifischer Spannungszuwachs der Betone im plastischen Bereich (links) und im Verfestigungsbereich (rechts) in Abhängigkeit des spezifischen Spannungszuwachses der Zuschlagstoffe (abweichende Skalierung der y-Achsen).

Der Spannungszuwachs der Betone setzt sich aus zwei Anteilen zusammen. Der eine resultiert aus dem Widerstand der Zementsteinmatrix, der andere aus dem der Zuschlagstoffe. Wie in Abschnitt 6.6 dargelegt wurde, war der Spannungszuwachs des porisierten Zementsteins nach Überschreiten des elastischen Bereichs unabhängig davon, ob die Poren im Zementstein als Luftporen oder EPS-Perlen vorlagen. Dies war darauf zurückzuführen, dass die EPS-Perlen aufgrund ihrer hochporösen Struktur sowie der vernachlässigbar geringen Festigkeit und Steifigkeit keinen nennenswerten Widerstand gegen die Stauchung aufweisen (vgl. Abschnitt 5.4) und sich in Bezug auf den Spannungszuwachs somit wie Luftporen gleichen Volumens verhalten. Beim Beton mit EPS-Perlen (EPS_0,5/5) resultierte der Spannungszuwachs demnach allein aus dem Widerstand der Zementsteinmatrix. Daraus lässt sich für die anderen Betone ableiten, dass der absolute Anteil der Zementsteinmatrix am spezifischen Gesamtspannungszuwachs in etwa dem spezifischen Spannungszuwachs des Betons mit EPS-Perlen ($\Delta\sigma_{z,sp-B,EPS_{0,5/5}}$) entsprach. Dieser betrug 1,59 N/mm² im plastischen Bereich bzw. 9,92 N/mm² im Verfestigungsbereich. Wie Abbildung 106 zu entnehmen ist, ergibt sich für den absoluten Anteil der Zuschlagstoffe in etwa eine Proportionalität zu $0,44 \cdot \Delta\sigma_{z,sp-Z}$ (plastischer Bereich) bzw. $1,91 \cdot \Delta\sigma_{z,sp-Z}$ (Verfestigungsbereich).

Ein Vergleich zwischen den prozentualen Anteilen der Zuschlagstoffe am spezifischen Spannungszuwachs der Betone im plastischen Bereich und denen im Verfestigungsbereich zeigt, dass diese in etwa gleich groß waren (Abbildung 107). Folglich trifft dies auch für die prozentualen Anteile der Zementsteinmatrix zu. Des Weiteren ist in Abbildung 107 zu erkennen, dass der Spannungszuwachs bei den Betonen mit Blähglas bzw. Blätton hauptsächlich aus dem Widerstand der Zuschlagstoffe resultierte. Bei diesen Betonen betrug der Anteil der Zuschlagstoffe am spezifischen Spannungszuwachs in etwa 80 % (Bg_0,5/8) bzw. 90 % (Bt_0/8). Die Vermiculite lieferten einen vergleichsweise geringen Beitrag zum Spannungszuwachs. Der Anteil der Vermiculite betrug in etwa ein Drittel. Die EPS-Perlen hatten, wie zuvor bereits erläutert, keinen Anteil am Spannungszuwachs.

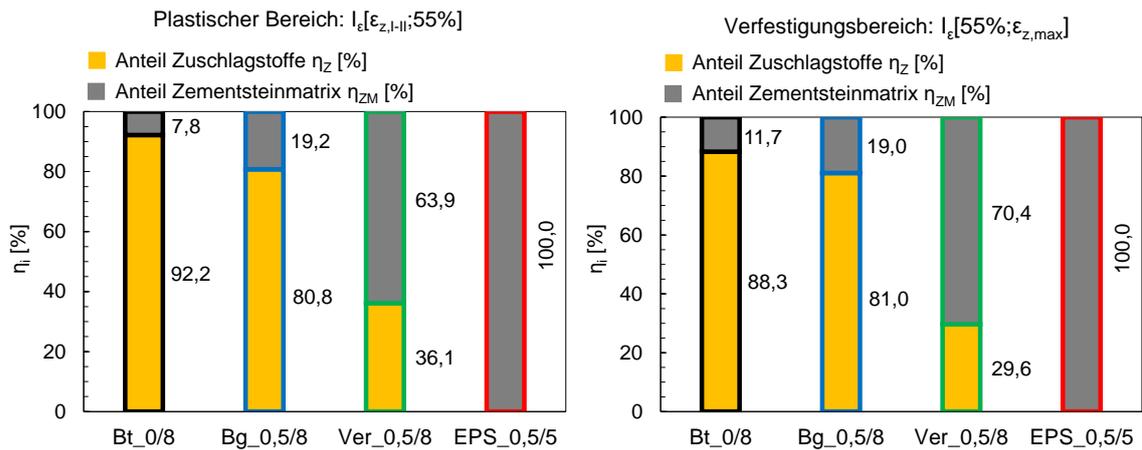


Abbildung 107: Prozentuale Anteile der Zuschlagstoffe bzw. Zementsteinmatrix am spezifischen Spannungszuwachs der Betone im plastischen Bereich (links) und im Verfestigungsbereich (rechts).

Da der spezifische Spannungszuwachs der Zuschlagstoffe maßgeblich von der Kornrohddichte abhängig war (vgl. Abbildung 61, Abschnitt 5.4.3), korreliert der spezifische Spannungszuwachs der Betone gut mit der Festbetonrohddichte (Abbildung 108).

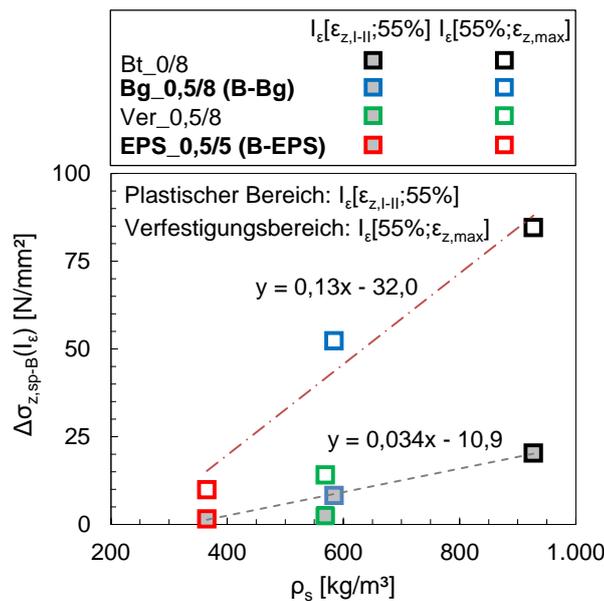


Abbildung 108: Spezifischer Spannungszuwachs im plastischen Bereich und im Verfestigungsbereich in Abhängigkeit der Festbetonrohddichte (Variation der Zuschlagstoffe).

Bei den Betonen mit Blähton, Blähglas und EPS-Perlen stieg der spezifische Spannungszuwachs sowohl im plastischen Bereich als auch im Verfestigungsbereich mit zunehmender Festbetonrohddichte annähernd linear an. Der Anstieg im Verfestigungsbereich war dabei rd. 3,8-mal größer als im plastischen Bereich. Folglich war der Einfluss der Zuschlagstoffe auf den Spannungszuwachs im Verfestigungsbereich deutlich ausgeprägter. Daraus lässt sich schließen, dass die Unterschiede in der Porosität bzw. Kornrohddichte der Zuschlagstoffe eine umso größere Rolle in Bezug auf den Spannungszuwachs spielten, je fortgeschrittener die Verdichtung des Betons war.

Die für die anderen Betone anhand der Regressionsgeraden dargestellten Beziehungen führen beim Beton mit Vermiculiten zu einer deutlichen Überschätzung des spezifischen Spannungszuwachses. Die Ursache dafür lag auch hier in der charakteristischen Kornstruktur der Vermiculite, die im Vergleich zu den anderen Zuschlagstoffen mit einem in Bezug auf ihre Kornrohddichte verhältnismäßig geringen Widerstand gegen die Stauchung einhergeht (vgl. Abschnitt 5.4).

Aus den linearen Korrelationen zwischen der Festbetonrohddichte und der Grenzspannung (vgl. Abbildung 104, rechts) bzw. den spezifischen Spannungszuwächsen (vgl. Abbildung 108) lassen sich die nachfolgend aufgeführten Beziehungen ableiten, mit denen die absoluten Spannungen im plastischen Bereich und im Verfestigungsbereich näherungsweise bestimmt werden können.

- Plastischer Bereich ($\varepsilon_{z,I-II} \leq \varepsilon_z \leq 55\%$):

$$\sigma_z(\rho_s, \varepsilon_z) = (0,034 \cdot \rho_s - 10,9) \cdot \frac{\varepsilon_z}{100} + 0,014 \cdot \rho_s - 4,23 \quad (9)$$

- Verfestigungsbereich ($55\% \leq \varepsilon_z \leq \varepsilon_{z,max}$):

$$\sigma_z(\rho_s, \varepsilon_z) = (0,13 \cdot \rho_s - 32,0) \cdot \frac{\varepsilon_z}{100} - 0,039 \cdot \rho_s + 7,37 \quad (10)$$

mit:	ρ_s	Festbetonrohddichte	[kg/m ³]
	ε_z	Stauchung	[%]

Für die Betone mit Blähton, Blähglas und EPS-Perlen zeigt Abbildung 109 einen Vergleich zwischen den experimentell und rechnerisch nach Gleichung (9) bzw. (10) ermittelten Spannungen. Während im plastischen Bereich eine gute Übereinstimmung zu erkennen ist, ergeben sich im Verfestigungsbereich nicht unerhebliche Abweichungen, da der in Wirklichkeit progressive Spannungszuwachs in diesem Bereich über die Beziehung nach Gleichung (10) vereinfachend linear abgebildet wird.

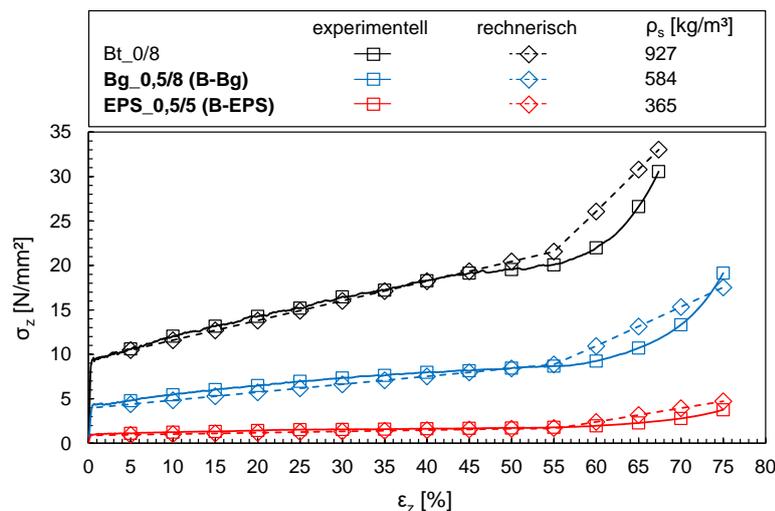


Abbildung 109: Vergleich zwischen den experimentell und rechnerisch ermittelten Spannungen der Betone mit Blähton, Blähglas und EPS-Perlen.

7.7.2.2 *Korngröße der Zuschlagstoffe*

Der Einfluss der Korngröße auf das Stauchverhalten der Betone mit EPS-Perlen bzw. Blähglas ist in Abbildung 110 und Abbildung 111 dargestellt.

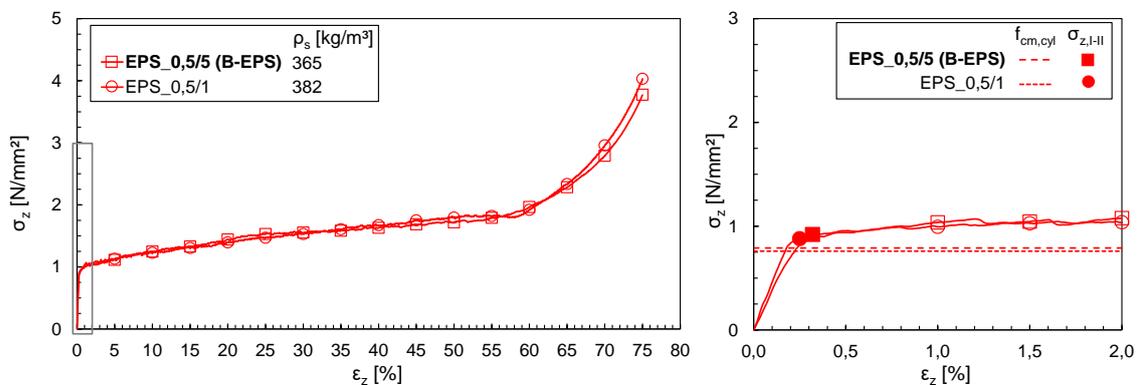


Abbildung 110: Spannungs-Stauchungskurven der Betone mit EPS-Perlen 0,5/5 mm bzw. 0,5/1 mm im Stauchungsbereich von 0 bis 75 % (links) und 0 bis 2 % Stauchung (rechts).

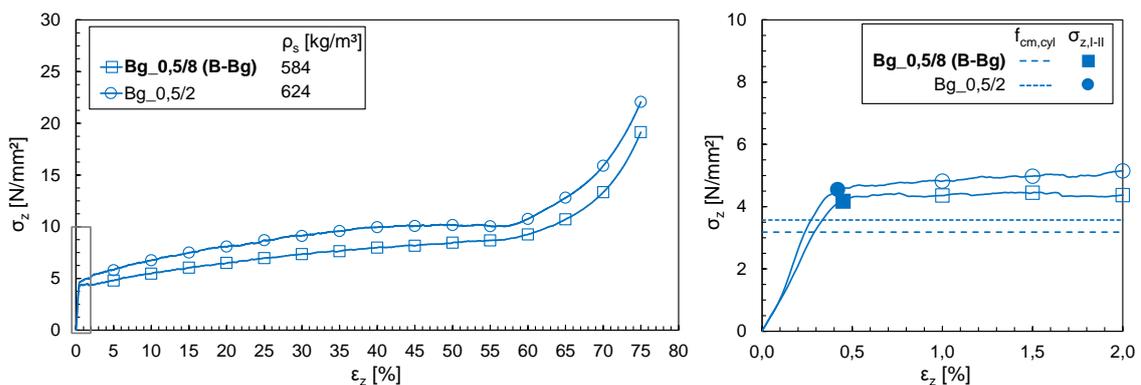


Abbildung 111: Spannungs-Stauchungskurven der Betone mit Blähglas 0,5/8 mm bzw. 0,5/2 mm im Stauchungsbereich von 0 bis 75 % (links) und 0 bis 2 % Stauchung (rechts).

Die Spannungs-Stauchungskurven der Betone mit EPS-Perlen 0,5/5 mm bzw. 0,5/1 mm zeigten von Versuchsbeginn bis -ende einen annähernd identischen Verlauf (vgl. Abbildung 110). Ein nennenswerter Einfluss der EPS-Korngröße auf das Stauchverhalten der Betone konnte somit ausgeschlossen werden. Dieses Ergebnis war nicht unbedingt zu erwarten, da bei den Stauchversuchen am porositärem Zementstein deutliche Unterschiede in Abhängigkeit der EPS-Korngröße festgestellt wurden (vgl. Abschnitt 6.6.3). Diese waren maßgeblich auf die mit der Porengröße variierenden Stegdicken des Zementsteins zurückzuführen. Allerdings lagen die Poren im Zementstein entweder als feine Luftporen oder in Form der größeren EPS-Perlen mit einer jeweils relativ eng begrenzten Poren- bzw. Korngrößenverteilung vor. Hingegen wurden die hier untersuchten Betone sowohl mit Luftporen als auch EPS-Perlen hergestellt. Dementsprechend war bei den Betonen von einer verschmierten bzw. vergleichsweise breiteren Porengrößen- und damit auch Stegdickenverteilung auszugehen. Für das Stauchverhalten der Betone mit EPS-Perlen waren offenbar die auf die wesentlich feineren Luftporen bezogenen Stegdicken maßgebend, sodass das Stauchverhalten

durch die Unterschiede in der Gefüge- bzw. Porenstruktur, die sich in Abhängigkeit der EPS-Korngrößen im Bereich von Porendurchmessern $\geq 0,5$ mm ergaben, unbeeinflusst blieb.

Im Gegensatz zu den Betonen mit EPS-Perlen konnte bei denen mit Blähglas ein geringer Einfluss der Korngröße auf das Stauchverhalten festgestellt werden (vgl. Abbildung 111). Dieser war im Vergleich zum Einfluss durch die verschiedenen Zuschlagstoffarten jedoch von untergeordneter Bedeutung.

Im elastischen Bereich wies der Beton Bg_0,5/2 eine um 17 % höhere initiale Steifigkeit sowie eine um 9 % höhere Grenzspannung im Vergleich zum Beton Bg_0,5/8 auf (vgl. Abbildung 111, rechts). Dies auf war auf die mit abnehmender Korngröße zunehmende Festigkeit und Steifigkeit des Blähglases zurückzuführen. Die damit einhergehende Zunahme in Kornrohddichte spiegelte sich in der höheren Festbetonrohddichte des Betons Bg_0,5/2 wider, sodass der Einfluss der Korngröße auf die initiale Steifigkeit bzw. Grenzspannung ebenfalls zuverlässig über die Änderung der Festbetonrohddichte abgebildet werden kann (Abbildung 112).

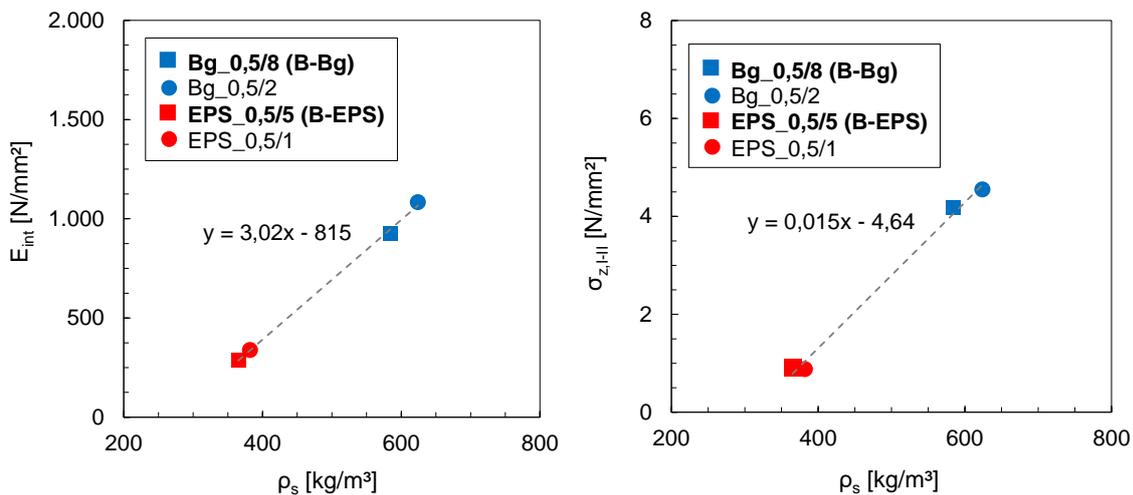


Abbildung 112: Initiale Steifigkeit (links) und Grenzspannung (rechts) in Abhängigkeit der Festbetonrohddichte (Variation der Korngröße).

Die aus den Umschnürungseffekten resultierende Steigerung der Grenzspannung im Vergleich zur einachsigen Druckfestigkeit lag mit 31 % (Bg_0,5/8) bzw. 33 % (Bg_0,5/2) in der gleichen Größenordnung. Die Korngröße des Blähglases hatte somit keinen nennenswerten Einfluss auf die bezogene Grenzspannung. Gemäß dem in Abbildung 105 dargestellten Zusammenhang zwischen der Festbetonrohddichte und der bezogenen Grenzspannung (vgl. Abschnitt 7.7.2.1) waren bei einer Differenz in der Festbetonrohddichte von nur 40 kg/m³ auch keine signifikanten Abweichungen in Abhängigkeit der Korngröße zu erwarten.

Nach Überschreiten des elastischen Bereichs spiegelte sich der mit abnehmender Korngröße zunehmende Spannungszuwachs des Blähglases (vgl. Abbildung 61, Abschnitt 5.4.3) in den geringfügig unterschiedlichen Spannungszuwächsen der Betone wider. Im Vergleich zum Beton Bg_0,5/8 war der spezifische Spannungszuwachs des Betons Bg_0,5/2 im plastischen Bereich ($I_\varepsilon[\varepsilon_{z,I-II};55\%]$)

um rd. 21 % und im Verfestigungsbereich ($I_{\epsilon}[55\%;75\%]$) um rd. 15 % größer. Aufgrund des Zusammenhangs zwischen dem spezifischen Spannungszuwachs des Blähglases und der von der Korngröße abhängigen Kornrohndichte (vgl. Abbildung 61, Abschnitt 5.4.3), lässt sich auch der Einfluss der Korngröße auf den spezifischen Spannungszuwachs der Betone gut über die Korrelationen zur Festbetonrohndichte darstellen (Abbildung 113). Wie anhand der Regressionsgeraden in Abbildung 113 zu erkennen ist, ergeben sich unter Einbezug der verschiedenen Korngrößen ähnliche lineare Beziehungen zwischen den spezifischen Spannungszuwächsen und der Festbetonrohndichte, wie sie auch in Abhängigkeit der verschiedenen Zuschlagstoffarten festgestellt wurden (vgl. Abbildung 108, Abschnitt 7.7.2.1).

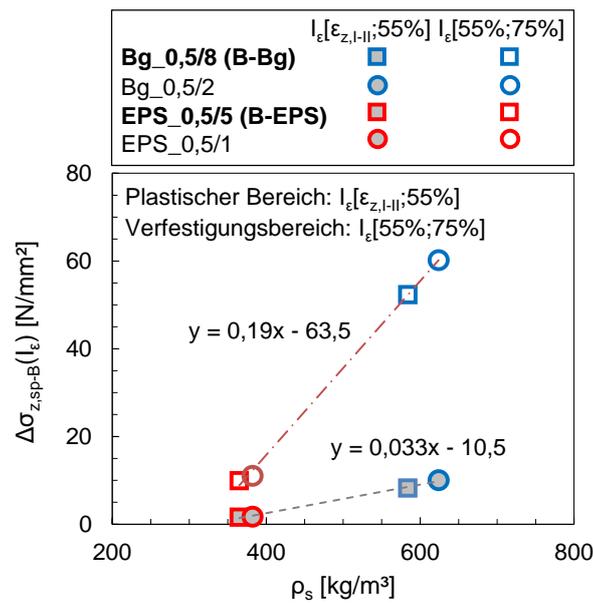


Abbildung 113: Spezifischer Spannungszuwachs im plastischen Bereich bzw. Verfestigungsbereich in Abhängigkeit der Festbetonrohndichte (Variation der Korngröße).

7.7.2.3 Wasserzementwert

Der Einfluss des Wasserzementwertes ($w/z = 0,70; 1,00; 1,40$) auf das Spannungs-Stauchungsverhalten der Betone mit EPS-Perlen 0,5/5 mm bzw. Blähglas 0,5/8 mm ist in Abbildung 114 und Abbildung 115 dargestellt.

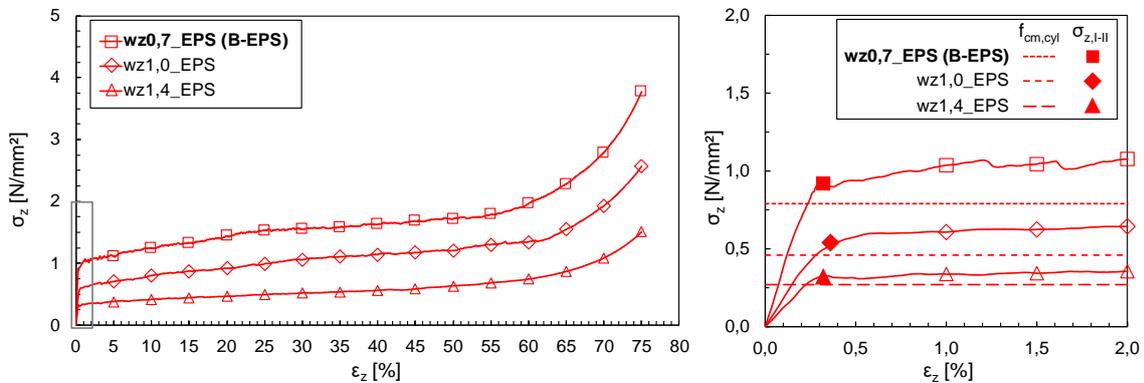


Abbildung 114: Spannungs-Stauchungskurven der Betone mit EPS-Perlen 0,5/5 mm unter Variation des Wasserzementwertes im Stauchungsbereich von 0 bis 75 % (links) bzw. 0 bis 2 % Stauchung (rechts).

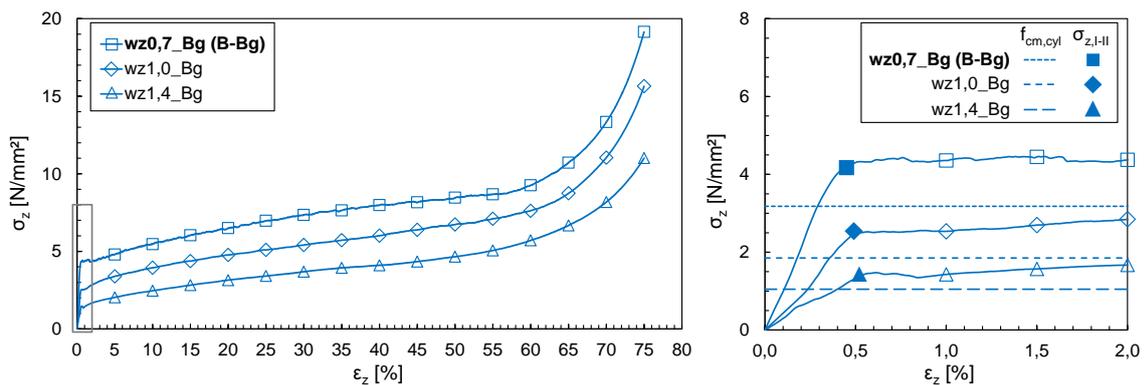


Abbildung 115: Spannungs-Stauchungskurven der Betone mit Blähglas 0,5/8 mm unter Variation des Wasserzementwertes im Stauchungsbereich von 0 bis 75 % (links) bzw. 0 bis 2 % Stauchung (rechts).

Erwartungsgemäß waren die initiale Steifigkeit sowie Grenzspannung umso niedriger, je höher der Wasserzementwert war (vgl. Abbildung 115 und Abbildung 114, rechts). Dies war auf die mit zunehmendem Wasserzementwert steigende Kapillarporosität bzw. auf die damit abnehmende Steifigkeit und Festigkeit der Zementsteinmatrix zurückzuführen. Wie in Abbildung 116 dargestellt ist, nahmen die initiale Steifigkeit sowie die Grenzspannung mit zunehmendem Wasserzementwert annähernd linear ab. Die prozentuale Abnahme der initialen Steifigkeit und der Grenzspannung waren bei den Betonen mit Blähglas bzw. EPS-Perlen jeweils in etwa gleich groß. Im Vergleich zu den Betonen mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,70$ betrug die Abnahme der initialen Steifigkeit rd. 46 % ($w/z = 1,00$) bzw. 67 % ($w/z = 1,40$). Der Rückgang in der Grenzspannung lag in einer ähnlichen Größenordnung und betrug rd. 40 % ($w/z = 1,00$) bzw. 65 % ($w/z = 1,40$).

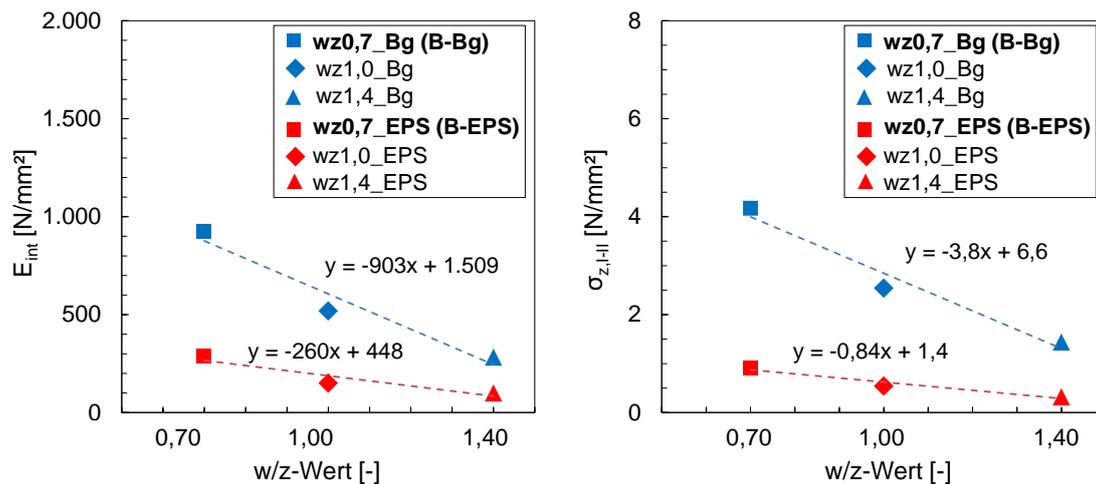


Abbildung 116: Initiale Steifigkeit (links) und Grenzspannungen (rechts) der Betone mit Blähglas bzw. EPS-Perlen in Abhängigkeit des Wasserzementwertes.

Die Steigerung der Grenzspannung im Vergleich zur einachsigen Druckfestigkeit, die aus den sich überlagernden Umschnürungseffekten resultierte (vgl. Abschnitt 7.7.1), ist in Abhängigkeit des Wasserzementwertes in Abbildung 117 dargestellt. Wie zu erkennen ist, war diese bei den Betonen mit Blähglas bzw. EPS-Perlen jeweils annähernd konstant. Ein nennenswerter Einfluss des Wasserzementwertes auf die bezogene Grenzspannung konnte innerhalb der hier untersuchten Variationsgrenzen somit nicht festgestellt werden. Die Abweichungen zwischen den bezogenen Grenzspannungen in Abhängigkeit der Zuschlagstoffe wurden in Abschnitt 7.7.2.1 diskutiert.

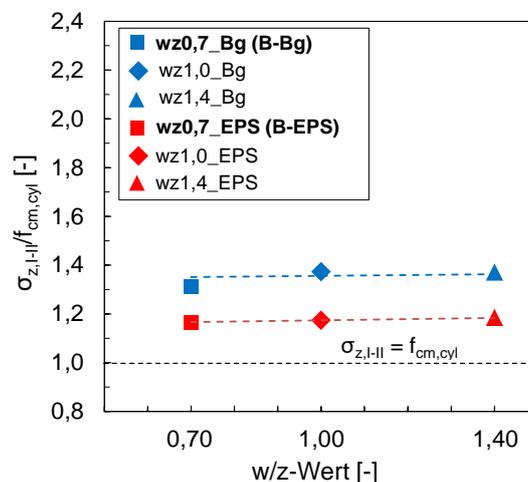


Abbildung 117: Bezogene Grenzspannungen der Betone mit Blähglas bzw. EPS-Perlen in Abhängigkeit des Wasserzementwertes.

Der Übergang vom plastischen Bereich in den Verfestigungsbereich fand unabhängig vom Wasserzementwert und analog zu den anderen Betonvarianten bei einer Stauchung zwischen ca. 55 und 60 % statt (vgl. Abbildung 114 und Abbildung 115, links). In Bezug auf das plastische Stauchvermögen des Betons unter den vorliegenden Versuchsrandbedingungen konnte damit bestätigt werden, dass die materialtechnischen Einflussparameter innerhalb der hier untersuchten Grenzen nicht signifikant waren (vgl. auch Abschnitt 7.7.2.1).

Die spezifischen Spannungszuwächse im plastischen Bereich ($I_{\varepsilon}[\varepsilon_{z,I-II};55\%]$) und im Verfestigungsbereich ($I_{\varepsilon}[55\%;75\%]$) sind in Abhängigkeit des Wasserzementwertes in Abbildung 118 dargestellt.

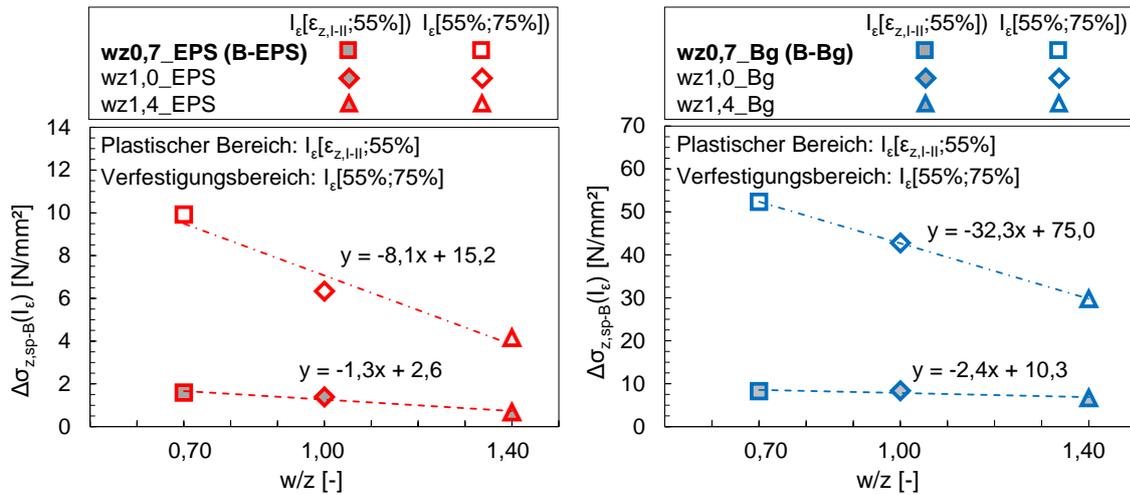


Abbildung 118: Spezifischer Spannungszuwachs der Betone mit EPS-Perlen (links) bzw. Blähglas (rechts) im plastischen Bereich und im Verfestigungsbereich in Abhängigkeit des Wasserzementwertes (abweichende Skalierung der y-Achsen).

Mit zunehmendem Wasserzementwert nahm der spezifische Spannungszuwachs im plastischen Bereich nur unwesentlich ab, was auch anhand der in diesem Bereich annähernd parallel verlaufenden Spannungs-Stauchungskurven zu erkennen ist (vgl. Abbildung 114 und Abbildung 115, links). Daraus ist abzuleiten, dass der Wasserzementwert bzw. die damit zusammenhängende Kapillarporosität der Zementsteinmatrix in Bezug auf den Spannungszuwachs im plastischen Bereich eine untergeordnete Rolle spielten.

Im Verfestigungsbereich war hingegen ein deutlicher Einfluss des Wasserzementwertes auf den spezifischen Spannungszuwachs festzustellen. Aufgrund der stark fortgeschrittenen Verdichtung in diesem Bereich waren die Luftporen innerhalb des Gefüges bereits weitgehend komprimiert (vgl. Abbildung 101 und Abbildung 102, Abschnitt 7.7.1). Daraus ist zu schließen, dass es mit zunehmender Stauchung auch zu einer Kompression der Kapillarporen innerhalb der Zementsteinmatrix kam. Folglich nahm der Widerstand gegen die Stauchung und damit der Spannungszuwachs mit steigender Kapillarporosität, d.h. mit zunehmenden Wasserzementwert, ab. Wie in Abbildung 118 zu erkennen ist, ergab sich ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen dem Wasserzementwert und dem spezifischen Spannungszuwachs im Verfestigungsbereich. Beim Beton mit EPS-Perlen führte eine Erhöhung des Wasserzementwertes von $w/z = 0,70$ auf $1,40$ zu einer Abnahme des spezifischen Spannungszuwachses um rd. 58 %. Beim Beton mit Blähglas war die prozentuale Abnahme mit rd. 43 % geringer.

7.7.3 Einfluss des Lastflächenverhältnisses (Voll-/Teilflächenbelastung)

Der Einfluss des Lastflächenverhältnisses (Vollflächenbelastung: $A/A_s \approx 1,0$; Teilflächenbelastung: $A/A_s = 2,25; 9,0$) auf das Spannungs-Stauchungsverhalten des Betons mit Blähglas 0,5/8 mm (B-Bg) ist in Abbildung 119 dargestellt. Die Spannungs-Stauchungskurve mit $A/A_s = 2,25$ ($D_s = 100$ mm) entspricht jener in Abbildung 100 und wurde bereits in Abschnitt 7.7.1 beschrieben. Wie Abbildung 119 zu entnehmen ist, führte die Variation des Lastflächenverhältnisses zu deutlich abweichenden Kurvenverläufen.

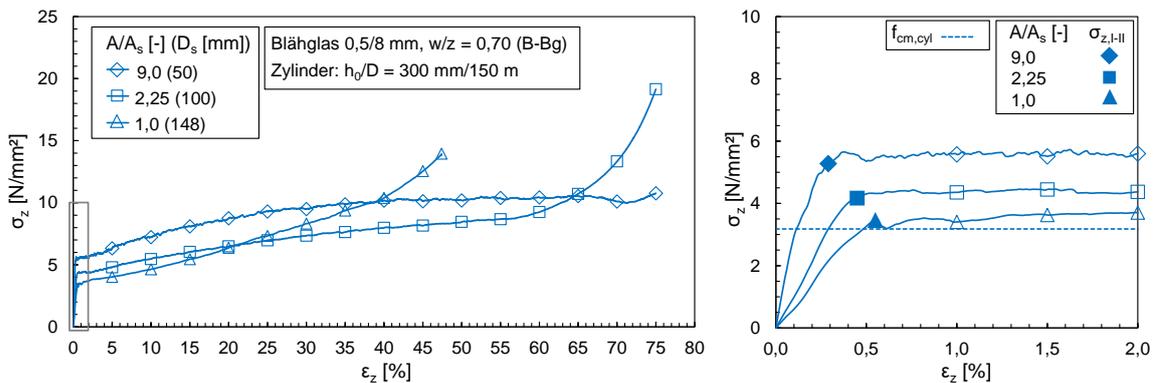


Abbildung 119: Spannungs-Stauchungskurven des Betons mit Blähglas 0,5/8 mm (B-Bg) unter Variation des Lastflächenverhältnisses im Stauchungsbereich von 0 bis 75 % (links) bzw. 0 bis 2 % Stauchung (rechts).

Im elastischen Bereich wurde mit zunehmendem Lastflächenverhältnis zum einen eine Zunahme der initialen Steifigkeit, zum anderen ein Anstieg der Grenzspannung detektiert (vgl. Abbildung 119, rechts). Dies war hauptsächlich auf die mit zunehmendem Lastflächenverhältnis zunehmende Umschnürungswirkung durch den umgebenden, unbelasteten Betonteil zurückzuführen.

Die auf die einachsige Druckfestigkeit bezogene Grenzspannung ist in Abhängigkeit des Lastflächenverhältnisses in Abbildung 120 dargestellt. Darin ist eine unterproportionale Zunahme der bezogenen Grenzspannung mit zunehmendem Lastflächenverhältnis zu erkennen.

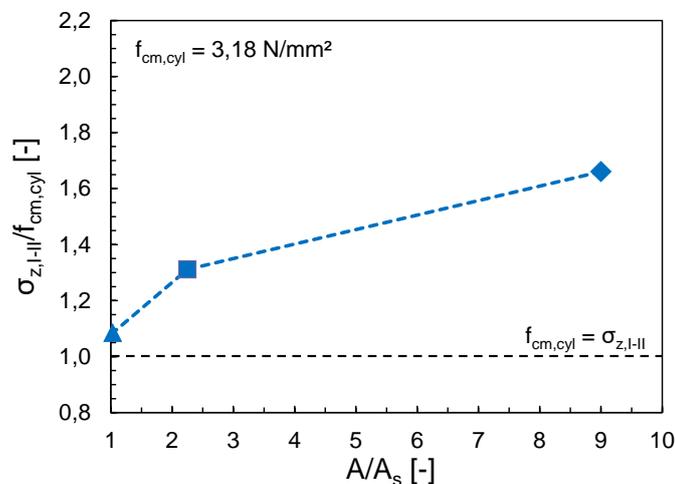


Abbildung 120: Bezogene Grenzspannung in Abhängigkeit des Lastflächenverhältnisses.

Unter Teilflächenbelastung war die Grenzspannung um 31 % ($A/A_s = 2,25$) bzw. 66 % ($A/A_s = 9,0$) größer als die einachsige Druckfestigkeit dieses Betons. Damit ergab sich eine ähnliche Abhängigkeit zum Lastflächenverhältnis, wie sie auch für die aufnehmbare Spannung von Leichtbeton unter Teilflächenbelastung bekannt ist (vgl. Abschnitt 2.2.7). Da die Grenzspannung unter Vollflächenbelastung hingegen nur geringfügig über der einachsigen Druckfestigkeit lag ($\sigma_{z,I-II}/f_{cm,cyl} = 1,08$), wird gleichzeitig deutlich, dass die äußere Umschnürung durch die Probenhalterung einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Grenzspannung hatte.

Auch nach Überschreiten des elastischen Bereichs zeigten sich in Abhängigkeit des Lastflächenverhältnisses deutliche Unterschiede zwischen den Spannungs-Stauchungskurven. Die absoluten Spannungszuwächse im Stauchungsintervall von $\varepsilon_{z,I-II}$ bis $\varepsilon_z = 10\%$ ($I_\varepsilon[\varepsilon_{z,I-II};10\%]$) sowie in den weiteren Stauchungsintervallen von jeweils 10 % Stauchung ($I_\varepsilon[10\%;20\%]$ bis $I_\varepsilon[60\%;70\%]$) sind in Abbildung 121 dargestellt.

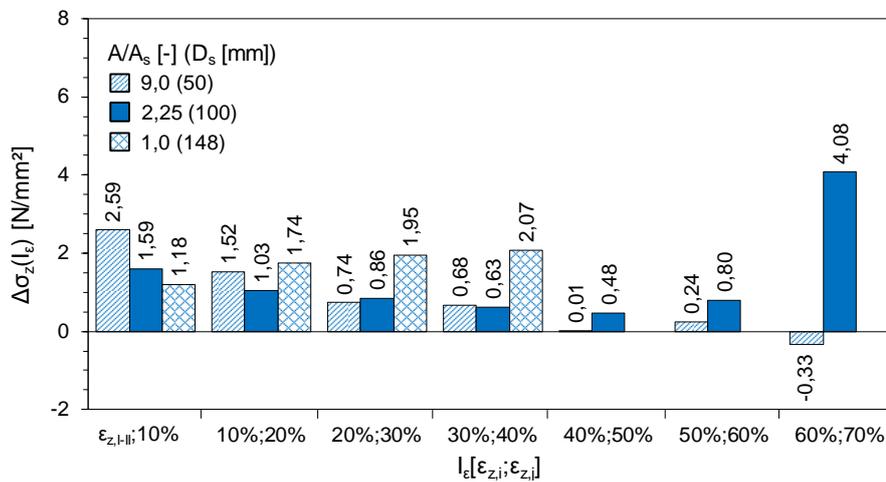


Abbildung 121: Spannungszuwächse in den Stauchungsintervallen $I_\varepsilon[\varepsilon_{z,I-II};10\%]$ bis $I_\varepsilon[60\%;70\%]$ unter Variation des Lastflächenverhältnisses.

Nach Überschreiten der Grenzspannung war der Spannungszuwachs unter Teilflächenbelastung zunächst größer als unter Vollflächenbelastung. Dieser Effekt war maßgeblich auf die unter Teilflächenbelastung zusätzlich aufzubringende Scherkraft bzw. den zu überwindenden Scherwiderstand zurückzuführen, der nach Überschreiten der Grenzspannung durch das Eindringen des Druckstempels in die Probe aktiviert wurde (vgl. Abschnitt 7.7.1). Des Weiteren war unter Teilflächenbelastung eine Zunahme des Spannungszuwachses mit zunehmendem Lastflächenverhältnis festzustellen. Im Stauchungsintervall $I_\varepsilon[\varepsilon_{z,I-II};10\%]$ betrug der absolute Spannungszuwachs unter Teilflächenbelastung das rd. 1,3-fache ($A/A_s = 2,25$) bzw. 2,2-fache ($A/A_s = 9,0$) im Vergleich zur Vollflächenbelastung.

Die beim Eindringen des Druckstempels generierte Scherkraft F_τ ist anteilig in der gemessenen axialen Gesamtkraft F_z enthalten. Da das Abscheren entlang des Stempelumfangs erfolgte, ist anzunehmen, dass sich die Scherkraft F_τ proportional zum Stempel- bzw. Lastflächenumfang U_s

(Länge der Abscherkante) verhält. Damit ergibt sich die Scherkraft in Abhängigkeit des Lastflächenumfangs zu:

$$F_{\tau} = f_{\tau,1} \cdot U_s \quad (11)$$

mit:	F_{τ}	Scherkraft	[N]
	$f_{\tau,1}$	Scherkraft je 1 Millimeter Lastflächenumfang	[N/mm]
	U_s	Lastflächenumfang	[mm]
		$= \pi \cdot D_s$	

Bei der Betrachtung der aus der Gesamtkraft F_z ermittelten Gesamtspannung σ_z wird die darin anteilig enthaltene Scherkraft F_{τ} jedoch über die Lastfläche A_s verschmiert:

$$\sigma_{\tau} = \frac{F_{\tau}}{A_s} \quad (12)$$

mit:	σ_{τ}	Scherspannung: Scherkraft F_{τ} bezogen auf A_s	[N/mm ²]
	F_{τ}	Scherkraft nach Gl. (11)	[N]
	A_s	Lastfläche	[mm ²]
		$= \pi \cdot (D_s/2)^2$	

Aufgrund der quadratischen Abhängigkeit zwischen dem Durchmesser D_s und der Fläche A_s ergibt sich für die auf die Lastfläche bezogene Scherspannung σ_{τ} der folgende Zusammenhang:

$$\sigma_{\tau} = f_{\tau,1} \cdot \frac{4}{D_s} \quad (13)$$

Gleichung (13) ist zu entnehmen, dass sich für das Verhältnis zwischen der Scherkraft $f_{\tau,1}$ und der auf die Lastfläche bezogenen Scherspannung σ_{τ} eine Proportionalität von $4/D_s$ ergibt. Unabhängig von der tatsächlichen Größe der Scherkraft $F_{\tau,1}$, die letztlich von der materialspezifischen Scherfestigkeit abhängig ist, ist daraus abzuleiten, dass mit zunehmendem Lastflächendurchmesser die Scherkraft F_{τ} einerseits linear ansteigt, die resultierende Scherspannung σ_{τ} und damit der Scherwiderstand hingegen um den Faktor $4/D_s$ abnehmen (Abbildung 122). Dies bedeutet, dass die zusätzliche Spannung, die unter Teilflächenbelastung aufgebracht werden musste, um den Scherwiderstand des Materials zu überwinden, mit abnehmendem Lastflächendurchmesser überproportional anstieg. Anders ausgedrückt, nahm der Einfluss des Abschereffektes auf die Gesamtspannung infolge der Penetration des Stempels in die Probe mit abnehmendem Lastflächenverhältnis ab.

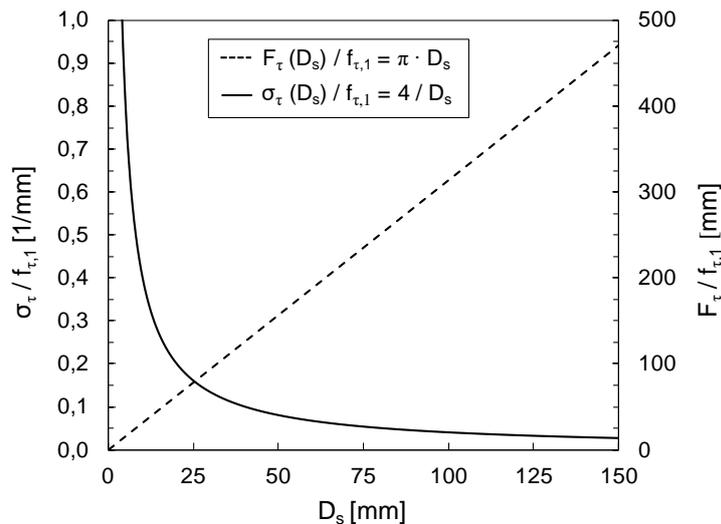


Abbildung 122: Zusammenhang zwischen der Scherkraft bzw. Scherspannung und dem Lastflächendurchmesser.

Da bei den Stauchversuchen stets die axiale Gesamtkraft F_z bzw. -spannung σ_z ermittelt wird, ist eine differenzierte und absolute Bestimmung der Scherspannungen bei den hier durchgeführten Stauchversuchen nicht möglich. Auch wenn im Rahmen dieser Arbeit keine separaten Scherversuche durchgeführt wurden, lässt sich aus den dargelegten theoretischen Überlegungen ableiten, dass die unter Teilflächenbelastung beobachtete Zunahme des Spannungszuwachses mit zunehmendem Lastflächenverhältnis am Anfang des plastischen Bereichs maßgeblich auf den Zusammenhang zwischen der Scherspannung und dem Lastflächendurchmesser zurückzuführen war.

Unter Teilflächenbelastung waren die Spannungs-Stauchungskurven nach Überschreiten der Grenzspannung über einen großen Stauchungsbereich durch einen degressiven Verlauf gekennzeichnet, d. h. der Spannungszuwachs nahm mit zunehmender Stauchung ab (vgl. Abbildung 121). Dies war auf die zunehmende innere Gefügezerstörung zurückzuführen, die in diesem Bereich zu einer Reduktion des Materialwiderstands gegen die Stauchung führte (vgl. Abschnitt 7.7.1). Die sich überlagernden Verdichtungseffekte machten sich unter Teilflächenbelastung erst ab einer Stauchung von ca. 55 % ($A/A_s = 2,25$) bzw. kurz vor Versuchsende bei $\varepsilon_z > 70$ % ($A/A_s = 9,0$) anhand des dann zunehmenden Spannungszuwachses bemerkbar. Hingegen führte die Verdichtung des Betons unter Vollflächenbelastung bereits kurz nach Überschreiten des elastischen Bereichs zu einer Zunahme des Spannungszuwachses. Aus diesen Beobachtungen ist abzuleiten, dass die Stauchung, ab der die Verfestigung infolge der Verdichtung des Betons einsetzt, mit zunehmendem Lastflächenverhältnis zunimmt. Da das Stauchvermögen letztlich durch die zunehmende Verfestigung begrenzt wird, nahm dieses ebenfalls mit zunehmendem Lastflächenverhältnis zu. Dementsprechend konnte der Beton unter Teilflächenbelastung ($A/A_s \geq 2,25$) um 75 % gestaucht werden, unter Vollflächenbelastung ($A/A_s \approx 1,0$) hingegen nur um 47,4 %.

Die dargelegten Abweichungen im Verfestigungsverhalten waren auf lokale Unterschiede in der Gefügekompression zurückzuführen (Abbildung 123), die aus den variierenden und vom Lastflächenverhältnis abhängigen Spannungsverteilungen resultierten.

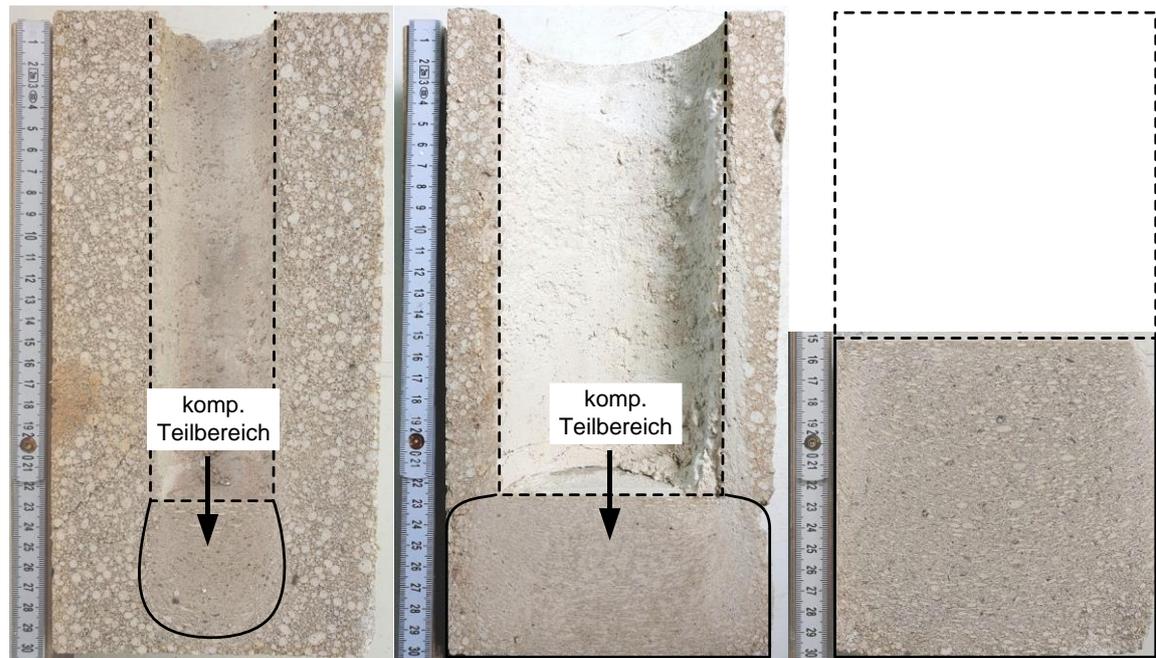


Abbildung 123: Schnittbilder von gestauchten Proben des Betons mit Blähglas 0,5/8 mm (B-Bg): $A/A_s = 9,0$ (links), 2,25 (Mitte) und $\approx 1,0$ (rechts) [109].

In Abbildung 123 ist zu erkennen, dass die Größe des Teilbereichs, indem sich eine Kompression des Gefüges abzeichnete, in Abhängigkeit des Lastflächenverhältnisses variierte. Bei der mit $A/A_s = 2,25$ um 75 % gestauchten Probe (vgl. Abbildung 123, Mitte) erstreckte sich der komprimierte Teilbereich unterhalb der eingedrückten Lastfläche sowohl über die gesamte Resthöhe als auch die gesamte Breite der Probe (vgl. auch Abbildung 101, Abschnitt 7.7.1). In Übereinstimmung damit war die Verfestigung bei dieser Stauchung bereits deutlich fortgeschritten, wie anhand der zugehörigen Spannungs-Stauchungskurve erkenntlich ist. Bei gleicher Stauchung war der komprimierte Teilbereich der mit $A/A_s = 9,0$ gestauchten Probe kleiner (vgl. Abbildung 123, links). Quer zur Belastungsrichtung zeigte sich nur eine geringfügige Verbreiterung im Vergleich zum Durchmesser der Lastfläche. In Belastungsrichtung erstreckte sich der komprimierte Teilbereich bis in eine Tiefe von ca. 0,5 cm oberhalb der Probenunterkante. Dementsprechend war der komprimierte Teilbereich sowohl nach unten (in Belastungsrichtung) als auch nach außen (quer zur Belastungsrichtung) von noch nicht komprimiertem Material umschlossen. Diese Beobachtungen decken sich mit der zugehörigen Spannungs-Stauchungskurve, die bis kurz vor Versuchsende noch keine Anzeichen einer wesentlichen Verfestigung aufzeigte. Unter Vollflächenbelastung ($A/A_s \approx 1,0$) kam es zu einer mehr oder weniger gleichmäßigen Stauchung über die Höhe und Querschnittsfläche der Probe. Daher war auch ein annähernd gleichmäßig stark komprimiertes Gefüge über die gesamte Schnittfläche zu erkennen (vgl. Abbildung 123, rechts). Da unter diesen Randbedingungen von Belastungsbeginn an keine seitliche Ausweichmöglichkeit bestand und die Kompression über die gesamte Höhe und Breite der Probe stattfand, kam es bereits kurz nach Überschreiten des elastischen Bereichs zu einer progressiven Zunahme des Spannungszuwachses.

7.7.4 Reproduzierbarkeit der Stauchversuche

Die Reproduzierbarkeit der Stauchversuche wurde exemplarisch an den Betonen mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,70$ und Blähglas 0,5/8 mm (B-Bg) bzw. EPS-Perlen 0,5/5 mm (B-EPS) untersucht. Dazu wurden Stauchversuche unter Teilflächenbelastung ($A/A_s = 2,25$) an jeweils sechs Zylinderproben durchgeführt. Die Einzelkurven und die daraus gemittelten Spannungs-Stauchungskurven sind in Abbildung 124 und Abbildung 125 dargestellt.

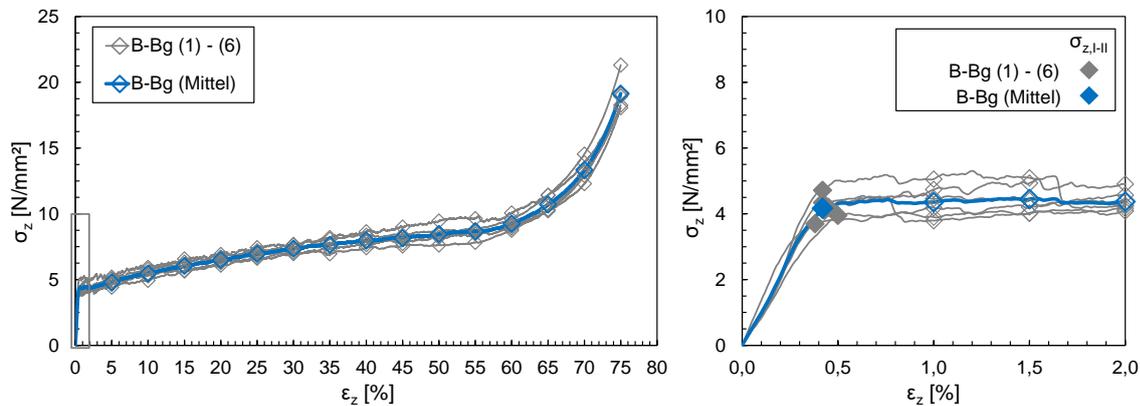


Abbildung 124: Spannungs-Stauchungskurven von sechs Proben des Betons mit Blähglas 0,5/8 mm (B-Bg) im Stauchungsbereich von 0 bis 80% (links) und 0 bis 2 % Stauchung (rechts).

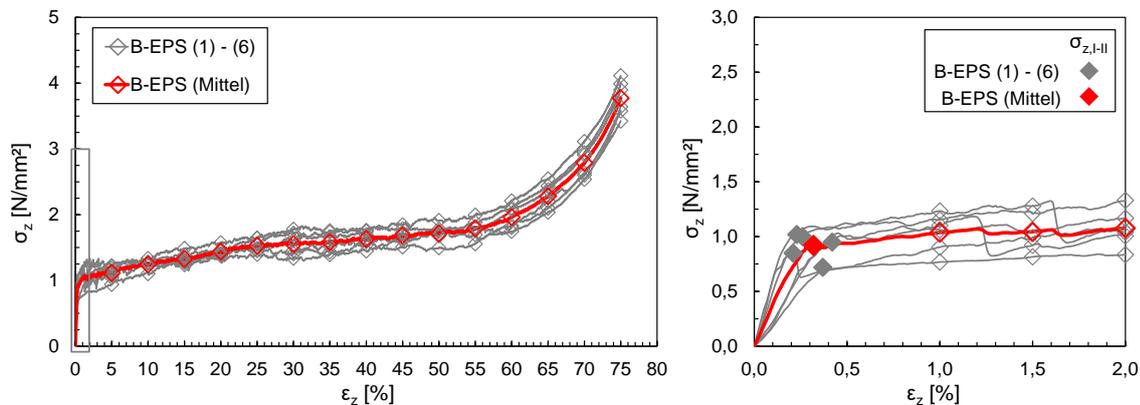


Abbildung 125: Spannungs-Stauchungskurven von sechs Proben des Betons mit EPS-Perlen 0,5/5 mm (B-EPS) im Stauchungsbereich von 0 bis 80% (links) und 0 bis 2 % Stauchung (rechts).

Für jede Einzelkurve wurden die Grenzspannung $\sigma_{z,I-II}$ sowie die Spannungen $\sigma_z(\epsilon_z)$ bei Stauchungen von $\epsilon_z = 10, 25, 50$ und 75 % bestimmt. Die Maximal- und Minimalwerte (max, min), die Differenzen zwischen den Maximal- und Minimalwerten ($\Delta(\max - \min)$), die Mittelwerte (M) sowie die daraus berechneten Standardabweichungen (SD) und Variationskoeffizienten (CV) sind in Tabelle 26 und Tabelle 27 dokumentiert.

Für den Beton mit Blähglas (B-Bg) lagen die Grenzspannungen der Einzelkurven zwischen $3,70$ N/mm² und $4,72$ N/mm². Die mittlere Grenzspannung betrug $4,17$ N/mm². Damit ergab sich für die Grenzspannung eine Standardabweichung von $0,35$ N/mm² und ein Variationskoeffizient

von 8,4 % (vgl. Tabelle 26). Nach Überschreiten der Grenzspannung war mit zunehmender Stauchung tendenziell ein Anstieg in der Differenz zwischen den maximalen und minimalen Spannungen festzustellen. Bei einer Stauchung von $\varepsilon_z = 10\%$ betrug die Differenz $0,99\text{ N/mm}^2$, bei einer Stauchung von $\varepsilon_z = 75\%$ $3,25\text{ N/mm}^2$. Folglich ergab sich mit zunehmender Stauchung ebenfalls ein Anstieg der Standardabweichung. Diese betrug zwischen $0,33\text{ N/mm}^2$ ($\varepsilon_z = 10\%$) und $1,06\text{ N/mm}^2$ ($\varepsilon_z = 75\%$). Da die absoluten Spannungen mit zunehmender Stauchung ebenfalls anstiegen, lagen die Variationskoeffizienten mit Werten zwischen 4,1 und 6,4 % in einer ähnlichen Größenordnung.

Im Vergleich zum Beton mit Blähglas (B-Bg) fiel die Streuung zwischen den Einzelkurven des Betons mit EPS-Perlen (B-EPS) geringfügig größer aus (vgl. Tabelle 27). In Bezug auf die Grenzspannung betrug der Variationskoeffizient 12,7 %. Bei Stauchungen zwischen 10 und 75 % lagen die Variationskoeffizienten zwischen 5,8 und 7,3 %.

Tabelle 26: Auswertung der Spannungs-Stauchungskurven von sechs Proben des Betons mit Blähglas 0,5/8 mm (B-Bg).

	max [N/mm ²]	min [N/mm ²]	$\Delta(\text{max} - \text{min})$ [N/mm ²]	M [N/mm ²]	SD [N/mm ²]	CV [%]
$\sigma_{z,I-II}$	4,72	3,40	1,02	4,17	0,35	8,4
$\sigma_z(\varepsilon_z = 10\%)$	5,93	4,94	0,99	5,46	0,33	6,0
$\sigma_z(\varepsilon_z = 25\%)$	7,43	6,61	0,82	6,97	0,29	4,1
$\sigma_z(\varepsilon_z = 50\%)$	9,46	7,63	1,83	8,45	0,54	6,4
$\sigma_z(\varepsilon_z = 75\%)$	21,3	18,1	3,25	19,14	1,06	5,5

Tabelle 27: Auswertung der Spannungs-Stauchungskurven von sechs Proben des Betons mit EPS-Perlen 0,5/5 mm (B-EPS).

	max [N/mm ²]	min [N/mm ²]	$\Delta(\text{max} - \text{min})$ [N/mm ²]	M [N/mm ²]	SD [N/mm ²]	CV [%]
$\sigma_{z,I-II}$	1,02	0,72	0,30	0,92	0,12	12,7
$\sigma_z(\varepsilon_z = 10\%)$	1,33	1,10	0,23	1,25	0,07	5,8
$\sigma_z(\varepsilon_z = 25\%)$	1,65	1,40	0,25	1,53	0,09	6,1
$\sigma_z(\varepsilon_z = 50\%)$	1,91	1,50	0,41	1,72	0,12	7,3
$\sigma_z(\varepsilon_z = 75\%)$	4,11	3,42	0,69	3,77	0,24	6,5

Die Streuungen zwischen den Einzelkurven sind für beide Betone tendenziell als gering zu beurteilen. Die Stauchversuche sind daher als gut reproduzierbar zu werten. Die Abweichungen zwischen den Einzelkurven der anderen Betonvarianten können ebenfalls als gering beurteilt werden (vgl. Anhang D-II). Eine statistische Auswertung der Streuungen zwischen den Einzelkurven wurde aufgrund der geringen Probenanzahl ($n = 3$) jedoch nicht durchgeführt.

8 Zusammenfassung und Erkenntnisse

Bei besonderen Anwendungsfällen von Beton, wie beispielsweise Stauchsichten im Tunnelbau, wird ein Materialverhalten angestrebt, das sich unter Druckbeanspruchung durch ein hohes plastisches Stauchvermögen bei gleichzeitig relativ geringen Spannungen auszeichnet. Bei ersten bekannten Materialkonzepten wird ein solches Verformungsverhalten über eine hohe Porigkeit und die damit verbundene Volumenkompressibilität erzielt. Gesicherte Kenntnisse zum Stauchverhalten stark porosierter Betone sind jedoch bisher äußerst begrenzt. Um ein ingenieurtechnisches Verständnis über das Stauchverhalten solcher Betone zu erlangen und einen gezielten Einsatz in verschiedenen Anwendungsbereichen zu ermöglichen, ist es daher zweckmäßig, reproduzierbare Versuchsergebnisse zum Stauchverhalten zu generieren und maßgebliche Einflussfaktoren zu eruieren.

Das globale Ziel dieser Arbeit war das Stauchverhalten stark porosierter Betone grundlegend zu charakterisieren sowie maßgeblich relevante Einflussparameter zu identifizieren und quantifizieren. Der Fokus der experimentellen Untersuchungen lag auf Betonen mit einem matrix- und kornporigen Gefüge, die sich aus einer aufgeschäumten Zementsteinmatrix und porösen Zuschlagstoffen (leichte Gesteinskörnungen, Schaumstoffzusätze) zusammensetzen. Um das Stauchverhalten des Gesamtsystems „Beton“ differenziert analysieren und verstehen zu können, wurde auch das Stauchverhalten der Einzelkomponenten untersucht.

Das Stauchverhalten wurde anhand der Spannungs-Stauchungskurven analysiert, die in einachsigen Druckversuchen mit Querdehnungsbehinderung ermittelt wurden. Durch begleitende Untersuchungen der strukturellen Gefügeänderungen wurden die wesentlichen mechanischen Effekte während der Stauchversuche und deren Auswirkungen auf das Stauchverhalten eruiert.

8.1 Stauchverhalten der porösen Zuschlagstoffe

In einem ersten Schritt wurde das Stauchverhalten von verschiedenen leichten Gesteinskörnungen (Blähton-Leichtsand, Blähton, Blähglas, Vermiculite) sowie von Schaumstoffperlen aus expandiertem Polystyrol (EPS-Perlen) untersucht. Dabei wurden auch verschiedene Korngrößen der porösen Zuschlagstoffe berücksichtigt. Die Stauchversuche wurden an Schüttungen der ungebundenen Zuschlagstoffe in einem Stahlzylinder ($h/D = 300 \text{ mm}/150 \text{ mm}$) durchgeführt.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass das Stauchverhalten der porösen Zuschlagstoffe maßgeblich durch die Kornstruktur und die Porosität bzw. die damit zusammenhängenden mechanischen Korneigenschaften (Festigkeit, Steifigkeit) sowie durch das resultierende stauchbare Volumen des Haufwerks bestimmt wird. Die wesentlichen Erkenntnisse der Untersuchungen sind nachfolgend aufgeführt:

- Bei den EPS-Perlen wurden auch bei großen Stauchungen (bis zu 75 %) keine nennenswerten Spannungen generiert, was auf die hochporöse Struktur und das sehr weiche bzw. verformungsfähige Grundmaterial zurückzuführen war. Ein Einfluss der Korngröße auf Stauchverhalten der EPS-Perlen konnte nicht festgestellt werden.
- Beim Blähton-Leichtsand, Blähton, Blähglas und den EPS-Perlen wurde eine annähernd lineare Abnahme der Spannungen bzw. des spezifischen Spannungszuwachses mit zunehmender Porosität bzw. abnehmender Kornrohddichte festgestellt (vgl. Abbildung 60 und Abbildung 61). Dies war darauf zurückzuführen, dass eine höhere Porosität mit einer geringeren Festigkeit und Steifigkeit der Körner einhergeht und gleichzeitig zu einem größeren stauchbaren Volumen des Haufwerks führt. Eine Zunahme der Porosität um 10 Vol.-% führte zu einer Abnahme des spezifischen Spannungszuwachses um etwa 12 N/mm².
- Für Blähglas lässt sich über diesen Zusammenhang auch der Einfluss der Korngröße abbilden. Mit zunehmender Korngröße nimmt die Porosität zu bzw. die Kornrohddichte ab, was zu einem flacheren Spannungsanstieg führte. Der spezifische Spannungszuwachs war bei einer Korngröße von 4/8 mm um etwa 40 % geringer als der bei einer Korngröße von 0,5/1 mm.
- Trotz ihrer deutlich geringeren Porosität bzw. höheren Kornrohddichte war der Widerstand der Vermiculite gegen die aufgebrachte Stauchung nur unwesentlich größer im Vergleich zu den EPS-Perlen. Dies war auf die blättrige und damit sehr weiche und instabile Kornstruktur der Vermiculite zurückzuführen. Die für die anderen porösen Zuschlagstoffe festgestellten Korrelationen zwischen der Spannung bzw. dem spezifischen Spannungszuwachs und der Porosität bzw. Kornrohddichte ist daher nicht auf die Vermiculite übertragbar.

8.2 Stauchverhalten des porosierten Zementsteins

Bei den Untersuchungen zum Stauchverhalten des porosierten Zementsteins erfolgte die Porosierung durch die Einführung von Luftporen unter Verwendung eines Schaumbildners sowie alternativ durch die Beimischung von EPS-Perlen. Der Luft- bzw. EPS-Gehalt wurde zwischen rd. 40 und 60 Vol.-% variiert. Im Falle der Verwendung von EPS-Perlen wurden darüber hinaus unterschiedliche EPS-Korngrößen (0,5/1 mm, 1/2 mm) in die Untersuchungen einbezogen, um den Einfluss der Porengröße auf das Stauchverhalten zu erfassen. Das Stauchverhalten wurde an Würfelproben (Kantenlänge: 150 mm) mit Querdehnungsbehinderung unter Vollflächenbelastung untersucht.

Im Vergleich zum nicht-porosierten Basis-Zementstein, der durch ein nahezu linear-elastisches Stauchverhalten bei gleichzeitig sehr geringem Stauchvermögen charakterisiert war, führte die starke Porosierung des Zementsteins zu einem Materialverhalten, das mit einem ausgeprägten plastischen Stauchvermögen einherging und prinzipiell dem von zellularen Werkstoffen entspricht. Durch die Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass das Stauchverhalten des porosierten Zementsteins maßgeblich durch den Luft-/EPS-Gehalt (dieser entsprach in etwa der relativen Porosität) bzw. die Festrohddichte bestimmt wird. Zudem wird das Stauchverhalten durch die Porengröße

bzw. die damit variierenden Stegdicken beeinflusst. Die wesentlichen Erkenntnisse der Untersuchungen sind nachfolgend aufgeführt:

- Bei Belastungsbeginn war der porosierte Zementstein durch ein annähernd linear-elastisches Stauchverhalten charakterisiert. Die initiale Steifigkeit nahm mit zunehmendem Luft-/EPS-Gehalt sowie mit abnehmendem mittleren Porendurchmesser nahezu linear ab (vgl. Abbildung 80 und Abbildung 91, links). Bezogen auf den Basis-Zementstein betrug die Abnahme der initialen Steifigkeit zwischen 74 und 96 %.
- Die Grenzspannung (Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich) lag tendenziell etwas über der einachsigen Druckfestigkeit (vgl. Abbildung 81, links), was auf die Querdehnungsbehinderung durch die Umschnürung der Probenhalterung zurückzuführen war. Mit einer maximalen Steigerung der Grenzspannung im Vergleich zur Druckfestigkeit von 9 % war der Einfluss der Querdehnungsbehinderung auf die Grenzspannung jedoch als gering zu beurteilen.
- Die Grenzspannung nahm mit zunehmendem Luft-/EPS-Gehalt sowie mit abnehmendem mittleren Porendurchmesser nahezu linear ab (vgl. Abbildung 81, rechts und Abbildung 91, rechts). Eine Erhöhung des Luft-/EPS-Gehaltes um 10 Vol.-% führte zu einer Abnahme der Grenzspannung um etwa $1,7 \text{ N/mm}^2$. Bei in etwa gleichem Luft-/EPS-Gehalt waren die Grenzspannungen der Zementsteine mit EPS-Perlen im Vergleich zu denen mit Luftporen in etwa um $1,1 \text{ N/mm}^2$ (EPS-Perlen $0,5/1 \text{ mm}$) bzw. $1,6 \text{ N/mm}^2$ (EPS-Perlen $0,5/1 \text{ mm}$) größer.
- Nach Überschreiten des elastischen Bereichs stellte sich ein plastisches Stauchverhalten ein, das durch große Stauchungen bei einem gleichzeitig mäßigen Spannungszuwachs gekennzeichnet war.
- Im plastischen Bereich konnte sowohl für das Spannungsniveau als auch für den Spannungszuwachs eine nahezu lineare Abnahme mit zunehmendem Luft-/EPS-Gehalt festgestellt werden (vgl. Abbildung 82). Analog zur Grenzspannung nahm das Spannungsniveau ebenfalls mit abnehmender Porengröße ab (vgl. Abbildung 92). Hingegen konnte ein Einfluss der Porengröße auf den Spannungszuwachs ausgeschlossen werden.
- Ab einer Stauchung, die in Abhängigkeit des Luft-/EPS-Gehaltes zwischen ca. 10 und 30 % lag, führte die zunehmende Materialverdichtung zu einer Verfestigung in Form eines progressiven Spannungszuwachses. Die Stauchung, ab der die Verfestigung einsetzte, war dabei umso geringer, je höher der Luft-/EPS-Gehalt war. Zudem war der progressive Spannungszuwachs im Verfestigungsbereich bei einem höheren Luft-/EPS-Gehalt vergleichsweise geringer ausgeprägt.
- Für den Spannungszuwachs im plastischen Bereich und im Verfestigungsbereich konnte gezeigt werden, dass dieser maßgeblich durch die residuale relative Porosität (d. h. das stauchungsabhängige Restporenvolumen) bestimmt wurde. Das bedeutet, dass die Spannungszuwächse bei gleicher residueller relativer Porosität, unabhängig vom initialen Luft-/EPS-Gehalt und von der Porengröße, annähernd gleich groß waren (vgl. Abbildung 86 und Abbildung 93). Die residuale relative Porosität nahm dabei direkt proportional zur aufgetragenen Stauchung ab.

- Der Übergang vom plastischen Bereich in den Verfestigungsbereich fand unabhängig vom initialen Luft-/EPS-Gehalt sowie von der Porengröße bei einer residualen relativen Porosität von etwa 30 Vol.-% statt.
- Das Stauchvermögen bis zum Versuchsende nahm in etwa proportional zum Luft-/EPS-Gehalt zu und betrug zwischen rd. 33 und 56 %. Das absolute Gesamtstauchvermögen des porierten Zementsteins wurde durch den Luft-/EPS-Gehalt bzw. durch die relative Porosität begrenzt. Die Porengröße hatte keinen Einfluss auf das Stauchvermögen.
- Die Streuungen zwischen den Spannungs-Stauchungskurven der einzelnen Proben einer Zementsteinvariante waren als gering zu beurteilen. Die Stauchversuche sind daher als gut reproduzierbar zu werten.

8.3 Stauchverhalten des porierten Betons

Aufbauend auf den Untersuchungen der Einzelkomponenten wurde das Stauchverhalten von stark poriertem Beton mit einem matrix- und kornporigen Gefüge untersucht. Die Porosierung erfolgte durch die Verwendung poröser Zuschlagstoffe sowie die Zumischung eines Schaumbildners. Der Luftporengehalt (exklusive der in porösen Zuschlagstoffen eingeschlossenen Luftporen) wurde konstant gehalten und betrug rd. 30 Vol.-%. Das Stauchverhalten wurde an Zylinderproben ($h/D = 300 \text{ mm}/150 \text{ mm}$) mit Querdehnungsbehinderung untersucht.

Auf Materialebene wurde der Einfluss der Art und Korngröße der porösen Zuschlagstoffe untersucht. Des Weiteren wurden Variationen des Wasserzementwertes einbezogen, um den Einfluss der Kapillarporosität der Zementsteinmatrix zu erfassen. Da bei typischen Anwendungsfällen von Stauchsichten bzw. -elementen davon auszugehen ist, dass diese nicht vollflächig, sondern eher partiell gestaucht werden, erfolgten die Stauchversuche zur Erfassung der materialtechnischen Einflussparameter unter Teilflächenbelastung (Lastflächenverhältnis: $A/A_s = 2,25$).

Qualitativ war das **charakteristische Stauchverhalten unter Teilflächenbelastung** bei allen der untersuchten Betonvarianten sehr ähnlich. Die wesentlichen Merkmale sind nachfolgend aufgeführt:

- Bis zum Erreichen einer gewissen Grenzspannung lag zunächst ein linear-elastisches Stauchverhalten vor. Die Grenzspannung war in Abhängigkeit der variierten Materialparameter um bis zu 46 % größer als die einachsige Druckfestigkeit der Betone. Diese Steigerung der Grenzspannung resultierte aus den sich überlagernden Umschnüreffekten durch die Probenhalterung sowie den unbelasteten Betonteil.
- Nach Überschreiten der Grenzspannung stellte sich ein plastisches Stauchverhalten ein, das durch einen mäßigen und leicht degressiven Spannungszuwachs gekennzeichnet war. In diesem Bereich kam es neben lokalen Bruch- und Verdichtungsvorgängen unterhalb der Lastfläche zu einem Eindringen des Druckstempels in die Probe und damit zu einem Abscheren entlang des Stempelumfangs.
- Ab einer Stauchung, die unabhängig von den untersuchten Materialvariationen zwischen ca. 55 und 60 % lag, wurde durch die zunehmende Verdichtung des Betons unterhalb der

Lastfläche der Übergang in den Verfestigungsbereich eingeleitet. Dieser war durch einen progressiven Spannungszuwachs gekennzeichnet.

Der **Einfluss der Zuschlagstoffart** wurde an Betonen mit Blähton, Blähglas, Vermiculiten und EPS-Perlen untersucht. Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Untersuchungen sind nachfolgend aufgeführt:

- Bei den Betonen mit Blähton, Blähglas und EPS-Perlen lässt sich der Einfluss der Zuschlagstoffart sehr präzise über die Korrelationen zur Festbetonrohddichte abbilden. Die Festbetonrohddichte nahm mit zunehmender Kornrohddichte zu und betrug zwischen 382 kg/m^3 (EPS-Perlen) und 927 kg/m^3 (Blähton).
- Im elastischen Bereich waren die initiale Steifigkeit sowie Grenzspannung umso größer, je höher die Festbetonrohddichte war. Dies war auf die mit zunehmender Kornrohddichte zunehmende Steifigkeit und Festigkeit der Zuschlagstoffe zurückzuführen.
- Mit zunehmender Festbetonrohddichte stiegen die initiale Steifigkeit sowie Grenzspannung nahezu linear an (vgl. Abbildung 104). Bei einer Zunahme der Festbetonrohddichte um 100 kg/m^3 stieg die initiale Steifigkeit um rd. 490 N/mm^2 und die Grenzspannung um rd. $1,40 \text{ N/mm}^2$ an.
- Die aus den Umschnürungseffekten resultierende Steigerung der Grenzspannung im Vergleich zur einachsigen Druckfestigkeit nahm mit zunehmender Festbetonrohddichte geringfügig zu (vgl. Abbildung 105). Diese betrug zwischen 16 % (EPS-Perlen) und 46 % (Blähton).
- Nach Überschreiten des elastischen Bereichs war der Spannungszuwachs der Betone umso größer, je höher die Festbetonrohddichte war. Dies konnte auf den mit zunehmender Kornrohddichte zunehmenden Widerstand bzw. spezifischen Spannungszuwachs der Zuschlagstoffe zurückgeführt werden.
- Im plastischen Bereich stieg der spezifische Spannungszuwachs der Betone mit zunehmender Festbetonrohddichte nahezu linear an (vgl. Abbildung 108). Eine Zunahme in der Festbetonrohddichte um 100 kg/m^3 entsprach einem Anstieg des spezifischen Spannungszuwachses um rd. $3,4 \text{ N/mm}^2$.
- Im Verfestigungsbereich stieg der spezifische Spannungszuwachs ebenfalls mit zunehmender Festbetonrohddichte nahezu linear an. Allerdings war der Einfluss der Zuschlagstoffart in diesem Bereich aufgrund der stark fortgeschrittenen Verdichtung deutlich ausgeprägter als im plastischen Bereich. Im Verfestigungsbereich war der Anstieg des spezifischen Spannungszuwachses rd. 3,8-mal größer.
- Für den Beton mit Vermiculiten ergaben sich keine mit den anderen Betonen übereinstimmenden Korrelationen zur Festbetonrohddichte. Trotz der deutlich höheren Festbetonrohddichte des Betons mit Vermiculiten (569 kg/m^3) zeigten sich im elastischen Bereich keine wesentlichen Abweichungen im Vergleich zum Beton mit EPS-Perlen. Im plastischen Bereich und im Verfestigungsbereich war der Spannungszuwachs des Betons mit Vermiculiten nur geringfügig größer als der des Betons mit EPS-Perlen. Diese Beobachtungen waren

maßgeblich auf die charakteristische Kornstruktur der Vermiculite zurückzuführen, die mit einer in Bezug auf ihre Kornrohichte sehr geringen Steifigkeit und Festigkeit bzw. einem geringen Widerstand gegen die Stauchung einhergeht.

Der **Einfluss der Korngröße** wurde an den Betonen mit EPS-Perlen bzw. Blähglas untersucht. Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Untersuchungen sind nachfolgend aufgeführt:

- Anders als beim porosierten Zementstein konnte ein Einfluss der EPS-Korngröße auf das Stauchverhalten der Betone nicht festgestellt werden. Offenbar spielten die Abweichungen in der Gefügestruktur des Betons (Stegdicken) in Abhängigkeit der EPS-Korngröße eine untergeordnete Rolle.
- Beim Beton mit Blähglas ergaben sich in Abhängigkeit der Korngröße jedoch leichte Unterschiede im Stauchverhalten. Mit abnehmender Korngröße nahmen die initiale Steifigkeit und Grenzspannung sowie der Spannungszuwachs im plastischen Bereich und im Verfestigungsbereich geringfügig zu. Dies war darauf zurückzuführen, dass sowohl die Festigkeit und Steifigkeit als auch der spezifische Spannungszuwachs des Blähglases mit abnehmender Korngröße zunahm.
- Unter Einbezug der verschiedenen Korngrößen ergeben sich ähnliche Korrelationen zur Festbetonrohichte, wie sie in Abhängigkeit der Zuschlagstoffart festgestellt wurden.

Der **Einfluss des Wasserzementwertes** ($w/z = 0,70; 1,00; 1,40$) wurde an den Betonen mit EPS-Perlen bzw. Blähglas untersucht. Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Untersuchungen sind nachfolgend aufgeführt:

- Im elastischen Bereich nahmen die initiale Steifigkeit und Grenzspannung mit zunehmendem Wasserzementwert annähernd linear ab (vgl. Abbildung 116).
- Die prozentuale Abnahme der initialen Steifigkeit und der Grenzspannung waren bei den Betonen mit Blähglas bzw. EPS-Perlen jeweils in etwa gleich groß. Infolge einer Erhöhung des Wasserzementwertes von $w/z = 0,70$ auf $1,40$ betrug die Abnahme der initialen Steifigkeit rd. 67 %. Die Abnahme der Grenzspannung lag mit rd. 65 % in einer ähnlichen Größenordnung.
- Ein nennenswerter Einfluss des Wasserzementwertes auf die Steigerung der Grenzspannung im Vergleich zur einachsigen Druckfestigkeit konnte nicht festgestellt werden (vgl. Abbildung 117).
- In Bezug auf den Spannungszuwachs im plastischen Bereich spielte der Wasserzementwert eine untergeordnete Rolle. Mit zunehmendem Wasserzementwert nahm der Spannungszuwachs im plastischen Bereich nur geringfügig ab.
- Im Verfestigungsbereich war aufgrund der stark fortgeschrittenen Verdichtung hingegen ein deutlicher Einfluss des Wasserzementwertes bzw. der damit zusammenhängenden Kapillarporosität der Zementsteinmatrix auf den Spannungszuwachs festzustellen. Mit zunehmendem Wasserzementwert nahm der spezifische Spannungszuwachs nahezu linear ab (vgl. Abbildung 118). Bei einer Erhöhung des Wasserzementwertes von $w/z = 0,70$ auf

1,40 betrug die Abnahme des spezifischen Spannungszuwachses in diesem Bereich rd. 58 % (EPS-Perlen) bzw. 43 % (Blähglas).

Neben dem Einfluss der Materialvariationen wurde der **Einfluss des Lastflächenverhältnisses** ($A/A_s = 1,0; 2,25; 9,0$) untersucht, um anwendungsbezogene Randbedingungen hinsichtlich voll- bzw. teilflächigen Stauchungen abzudecken. Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Untersuchungen sind nachfolgend aufgeführt:

- Im elastischen Bereich nahmen die initiale Steifigkeit sowie Grenzspannung mit zunehmendem Lastflächenverhältnis zu. Dies war auf die zunehmende Umschnürungswirkung durch den unbelasteten Betonteil zurückzuführen.
- Die auf die einachsige Druckfestigkeit bezogene Steigerung der Grenzspannung nahm mit größer werdendem Lastflächenverhältnis unterproportional zu (vgl. Abbildung 120). Unter Vollflächenbelastung ($A/A_s = 1,0$) betrug diese 8 %, unter Teilflächenbelastung hingegen 31 % ($A/A_s = 2,25$) bzw. 66 % ($A/A_s = 9,0$).
- Am Anfang des plastischen Bereichs war der Spannungszuwachs unter Teilflächenbelastung größer als unter Vollflächenbelastung, was auf die zusätzlich aufzubringende Scherkraft zurückgeführt werden konnte, die unter Teilflächenbelastung beim Eindringen des Druckstempels in die Probe generiert wurde. Aufgrund des Zusammenhangs zwischen der Scherkraft und der auf die Lastfläche bezogenen Scherspannung (vgl. Abbildung 122) war der Spannungszuwachs umso höher, je größer das Lastflächenverhältnis war.
- Die Stauchung, ab der sich die Verfestigung infolge der Verdichtung des Betons deutlich bemerkbar machte, nahm mit zunehmendem Lastflächenverhältnis zu. Dies war auf die vom Lastflächenverhältnis abhängige Ausbreitung des komprimierten Betonteils unterhalb der Lastfläche zurückzuführen. Unter Vollflächenbelastung fand die Kompression des Gefüges relativ gleichmäßig über die gesamte Höhe und Querschnittsfläche der Probe statt. Hingegen stellte sich die Kompression unter Teilflächenbelastung nur in einem lokal begrenzten Bereich unterhalb der Lastfläche ein. Den Spannungsverteilungen unter Teilflächenbelastung entsprechend nahm die Größe des komprimierten Teilbereichs mit zunehmendem Lastflächenverhältnis ab.

Die **Reproduzierbarkeit der Stauchversuche** wurde exemplarisch an den Betonen mit EPS-Perlen bzw. Blähglas untersucht. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Streuungen zwischen den Spannungs-Stauchungskurven der einzelnen Versuche gering waren. Somit sind die Stauchversuche am porierten Beton als gut reproduzierbar zu werten.

9 Ausblick

Die Erkenntnisse dieser Arbeit liefern einen Beitrag zum grundlegenden Verständnis des Stauchverhaltens stark porosierter Betone. Der Fokus der experimentellen Untersuchungen lag auf dem Stauchverhalten von Betonen mit einem matrix- und kornporigen Gefüge. In die Untersuchungen wurden verschiedene poröse Zuschlagstoffe mit variierenden Korngrößen sowie unterschiedliche Wassermenge einbezogen. Für eine umfassendere Identifizierung und Quantifizierung der materialtechnischen Einflussparameter sind jedoch weitere Untersuchungen unter Variation der Ausgangsstoffe bzw. Betonzusammensetzung notwendig. Neben anderen leichten Gesteinskörnungen (z. B. Blähschiefer) bzw. porösen Zuschlagstoffen (z. B. Holzspäne, poröse Gummizusätze) sollten beispielsweise auch Variationen der Volumenanteile der Einzelkomponenten berücksichtigt werden.

Wie in den theoretischen Grundlagen dieser Arbeit beschrieben, sind die Methoden zur Porosierung von Beton vielfältig und resultieren in verschiedenen Gefügestrukturen. Zur Erzielung eines ausgeprägten Stauchverhaltens durch eine hohe Porosität kommen daher auch Materialansätze in Betracht, die beispielsweise zu einer haufwerksporigen Gefügestruktur führen und im Rahmen dieser Arbeit unberücksichtigt blieben. Da das Verformungsverhalten von Beton maßgeblich durch seine strukturelle Zusammensetzung bestimmt wird, sind Untersuchungen zum Stauchverhalten unter Einbezug variierender Gefügestrukturen zweckmäßig.

Die hohe Porosität von Betonen mit einem ausgeprägten Stauchvermögen geht zwangsläufig mit einer hohen Wasseraufnahme einher. Um einen gezielten Einsatz solcher Betone unter Berücksichtigung verschiedener hygrischer Randbedingungen zu ermöglichen, sollte auf materialtechnischer Ebene auch der Einfluss des Feuchtezustandes auf das Stauchverhalten untersucht werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Stauchverhalten ausschließlich unter quasi-statischer bzw. kurzzeitiger Druckbelastung erfasst. Aufgrund der viskosen Verformungseigenschaften von Beton sollten zur Charakterisierung des zeitabhängigen Stauchverhaltens zusätzliche Versuche unter Variation der Prüfgeschwindigkeit durchgeführt werden. Im Hinblick auf den Einsatz stauchfähiger Betone bei druckhaftem Gebirge im Tunnelbau sind dabei vor allem sehr geringe Prüfgeschwindigkeiten von Interesse, da die Gebirgsverformungen unter solchen geologischen Randbedingungen in der Regel über einen sehr langen Zeitraum auftreten. Diesbezüglich sind vor allem Versuche zur Erfassung des Relaxationsverhaltens nach Überschreiten des elastischen Bereichs zu empfehlen.

Für eine gezielte Anwendung stauchfähiger Betone zum Schutz vor stoß- oder explosionsartigen Beanspruchungen ist es zudem ratsam, das Stauchverhalten auch unter dynamischen Belastungsszenarien zu erfassen. Erste Untersuchungen wurden hierzu von der *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)* angestellt (u. a. in [66, 68, 69, 71-73]).

Ein weiterer Aspekt, der im Hinblick auf das Stauchverhalten von Interesse ist und im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden konnte, ist das Entlastungs- bzw. Rückverformungsverhalten der Betone.

Insbesondere im Hinblick auf die komplexen Randbedingungen bei verschiedenen Anwendungsgebieten wäre es hilfreich, analytische und numerische Modelle zu entwickeln, mit denen sich das Stauchverhalten der Betone möglichst realitätsnah abbilden lässt. Die Versuchsergebnisse dieser Arbeit könnten dabei als Datengrundlage für die Validierung und Kalibrierung der Modelle herangezogen werden. Erste numerische Modellansätze, bei denen Teile der in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse implementiert wurden, sind in [85, 86, 105] veröffentlicht.

10 Literaturangaben

- [1] Deutsches Institut für Normung: DIN 1045-1:2008-8: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion.
- [2] Faust, T.: Leichtbeton im Konstruktiven Ingenieurbau. Ernst & Sohn, 2003.
- [3] Grübl, P., Weigler, H., Karl, S.: Beton. Arten, Herstellung und Eigenschaften (Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau). 2. Auflage, Ernst & Sohn, 2001.
- [4] Technische Hochschule Darmstadt, Institut für Massivbau: Leichtzuschlag-Beton mit hohem Luftporengehalt (Leichtzuschlag-Schaumbeton). Bericht zu einem Forschungsvorhaben gefördert vom Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, F 1624, Fraunhofer IRB Verlag, 1979.
- [5] Pott, J. U.: Entwicklungsstrategien für zementgebundene Schäume. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Dissertation, 2006.
- [6] Dehn, F., Wiens, U.: Beton. In: Bergmeister, K., Fingerloos, F., Wörner, J. D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2022. Nachhaltigkeit, Digitalisierung, Instandhaltung. Berlin: Ernst & Sohn, S. 1–172, 2022.
- [7] Weigler, H., Karl, S., Jaegermann, C.: Leichtzuschlag-Beton mit hohem Gehalt an Mörtelporen. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 321, Ernst & Sohn, 1981.
- [8] Trautmann, J., Pott, J. U.: Konstruktionsleichtbeton unter Verwendung von Luftporen. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): *Tagungsband des 44. Forschungskolloquiums des DAfStb*, S. 9-1–9-14, 2004.
- [9] Lohaus, L., Pott, J.: Schlußbericht zum AIF-Forschungsvorhaben "Konstruktionsleichtbeton unter Verwendung vorgeschäumter Luftporen". Universität Hannover, 2005.
- [10] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 12350-7:2022-05: Prüfung von Frischbeton - Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren; Deutsche Fassung EN 12350-7:2019 + AC:2022.
- [11] ASTM International: ASTM C173/C173M:2016: Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method.
- [12] Hoff, G. C.: Guide for the Use of Low-Density Concrete in Civil Works Projects. Innovations for Navigation Projects Research Program, 2002.
- [13] Owens, P. L., Newman, J. B.: 7. Lightweight aggregate manufacture. In: Newman, J., Choo, B. S. (Hrsg.): *Advanced Concrete Technology. Constituent Materials*, pp. 7/1–7/12, 2003.
- [14] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 206:2021-06: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A2:2021.
- [15] Faust, T.: Herstellung, Tragverhalten und Bemessung von konstruktivem Leichtbeton. Dissertation, Universität Leipzig, 2000.
- [16] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 13055:2016-11: Leichte Gesteinskörnungen; Deutsche Fassung EN 13005:2016.
- [17] Deutsches Institut für Normung: DIN 4226-3:1983-04: Zuschlag für Beton - Prüfung von Zuschlag mit dichtem oder porigem Gefüge.
- [18] Reinhardt, H.-W.: *Ingenieurbaustoffe*. 2. Auflage, Ernst & Sohn, 2010.

- [19] Meyer, C.: Bestimmung der Zug- und Druckfestigkeit grober Leichtzuschläge und deren Einfluß auf die Betonfestigkeit. Hannover, Dissertation, 1974.
- [20] Grübl, P.: Die Zugfestigkeit von Leichtzuschlägen. *Betonwerk+Fertigteil-Technik*, Heft 10, 1979.
- [21] Müller-Rochholz, J.: Einfluß von Leichtzuschlageigenschaften auf die Leichtbetondruckfestigkeit. Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 1979.
- [22] Grübl, P.: Modell zur quantitativen Beschreibung der Bruchvorgänge in gefügedichtem Leichtbeton unter Kurzzeitbelastung. Dissertation, München, 1976.
- [23] Schütz, F. R.: Der Einfluß der Zuschlagelastizität auf die Betondruckfestigkeit. Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 1970.
- [24] Maage, M., Thienel, K.-C., Smeplass, S., van Breugel, K., Kwint, E., Mijnsbergen, J., Monsen, A., Sveindottir, E. L.: LWAC Material Properties - State-of-the-Art. EuroLight-Con, Technical Report BE96-3942/R14, 2000.
- [25] Grübel, P., Klemt, K.: Optimierte Betonzusammensetzung beim Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge. *Beton- und Stahlbetonbau* 95, Heft 7, Ernst & Sohn, S. 415–419, 2000.
- [26] Wischers, G., Lusche, M.: Einfluss der inneren Spannungsverteilung auf das Tragverhalten von druckbeanspruchtem Normal- und Leichtbeton. *Betontechnische Berichte 1972*, Verlag Bau+Technik, S. 135–163, 1972.
- [27] Lusche, M.: Beitrag zum Bruchmechanismus von auf Druck beanspruchtem Normal- und Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge. Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 1971.
- [28] Wittmann, F., Zaitsev, J.: Verformung und Bruchvorgang poröser Baustoffe bei kurzzeitiger Belastung und Dauerlast. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 232, Ernst & Sohn, S. 65–145, 1974.
- [29] Bonzel, J.: Ein Beitrag zur Frage der Verformung von Beton. *Betontechnische Berichte 1971*, Verlag Bau+Technik, S. 33–54, 1971.
- [30] Sell, R.: Festigkeit und Verformung von Gasbeton unter zweiachsialer Druck-Zug-Beanspruchung. Untersuchungen über die Gastbeton-Schubfestigkeit zum Studium des Bruchverhaltens. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 209, Ernst & Sohn, S. 1–40, 1970.
- [31] Stadie, R.: Festigkeits- und Verformungsverhalten von kurzfaserverstärktem Porenbeton. Technische Universität Berlin, Dissertation, 2008.
- [32] Wischers, G.: Aufnahme und Auswirkungen von Druckbeanspruchungen auf Beton. *Betontechnische Berichte 1978*, Verlag Bau+Technik, S. 31–56, 1978.
- [33] Siebel, E., Wichers, G.: Verformungsverhalten, Energieaufnahme und Tragfähigkeit von Normal- und Leichtbeton im Kurzzeitdruckversuch. *Betontechnische Berichte 1989*, Beton-Verlag GmbH, S. 57–82, 1989.
- [34] Linse, D., Stegbauer, A.: Festigkeit und Verformungsverhalten von Leichtbeton, Gasbeton, Zementstein und Gips unter zweiachsigen Kurzzeitbeanspruchungen. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 254, Ernst & Sohn, S. 51–95, 1976.
- [35] Kvitsel, V.: Zur Vorhersage des Schwindens und Kriechens von normal- und hochfestem Konstruktionsleichtbeton mit Blähtongesteinskörnung. Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2017.

- [36] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.
- [37] Sell, R., Zelger, C.: Versuche über den Verbund bei bewehrtem Gasbeton. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 209, Ernst & Sohn, S. 41–63, 1970.
- [38] Manns, W.: Elastizitätsmodul von Zementstein und Beton. *Betontechnische Berichte 1970*, Verlag Bau+Technik, S. 139–164, 1970.
- [39] Schickert, G., Winkler, H.: Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 277, Ernst & Sohn, 1977.
- [40] Walz, K.: Beziehung zwischen Wasserzementwert, Normenfestigkeit des Zements (DIN 1164, Juni 1970) und Betondruckfestigkeit. *Betontechnische Berichte 1970*, Verlag Bau+Technik, S. 165–178, 1970.
- [41] Ameler, J.: Betonverhalten bei hohen Temperaturen und triaxialer Beanspruchung - FE-Modell auf der Basis der Betonstruktur. Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 1997.
- [42] Hampel, T.: Experimentelle Analyse des Tragverhaltens von Hochleistungsbeton unter mehraxialer Beanspruchung. Technische Universität Dresden, Dissertation, 1969.
- [43] Scheerer, S.: Hochleistungsleichtbeton unter mehraxialer Druckbeanspruchung. Eine experimentelle Analyse. Technische Universität Dresden, Dissertation, 2009.
- [44] Speck, K., Curbach, M.: Ein einheitliches dreiaxiales Bruchkriterium für alle Betone. *Beton- und Stahlbetonbau 105*, Heft 4, S. 233–243, 2010.
- [45] Kupfer, H.: Das Verhalten des Betons unter mehrachsiger Kurzzeitbelastung unter besonderer Berücksichtigung der zweiachsigen Beanspruchung. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 229, S. 1–105, 1973.
- [46] Comité Euro-International du Béton: CEB-FIP Model code 1990. Design Code.
- [47] Plückelmann, S., Breitenbücher, R., Smarslik, M., Mark, P.: Aufnehmbare Teilflächenspannung von hochfestem Stahlfaserbeton. *Beton- und Stahlbetonbau 114*, Heft 9, Ernst & Sohn, S. 653–662, 2019.
- [48] Wichers, M.: Bemessung von bewehrten Betonbauteilen bei Teilflächenbelastung unter Berücksichtigung der Rissbildung. Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2013.
- [49] Heilmann, H. G.: Versuche zur Teilflächenbelastung von Leichtbeton für tragende Konstruktionen. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 344, Ernst & Sohn, S. 1–45, 1983.
- [50] Wurm, P., Daschner, F.: Teilflächenbelastung von Normalbeton. Versuche an bewehrten Scheiben. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 344, Ernst & Sohn, S. 47–93, 1983.
- [51] Wurm, P., Daschner, F.: Versuche über Teilflächenbelastung von Normalbeton. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 286, Ernst & Sohn, 1977.
- [52] Bauschinger, J.: Versuche mit Quadern aus Naturstein. *Mitteilungen des Mechanisch und Technischen Laboratoriums der Technischen Hochschule München*, Heft 6, 1876.
- [53] Walraven, J., Uijl, J. den, Stroband, J., Gijsbers, J., Naaktgeboren, M.: Structural lightweight Concrete: Recent research. *HERON 40*, Heft 1, Delft (Netherlands), 1995.

- [54] CUR-Centre of Civil Engineering Research and Codes: Structural behaviour of concrete with coarse lightweight aggregates (report 173), Gouda (Netherlands), 1995.
- [55] Ebel, L.: Tragfähigkeit von Porenbeton unter Teilflächenbelastung. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): *Tagungsband des 37. Forschungskolloquiums des DAfStb*, S. 15–22, 1999.
- [56] Gibson, L. J., Ashby, M. F.: Cellular solids. Structures and properties. 2nd edn., Cambridge UK: Cambridge University Press, 1997.
- [57] Ashby, M. F., Medalist, R. F. M.: The Mechanical Properties of Cellular Solids. *Metallurgical Transactions A 14A*, pp. 1755–1769, 1983.
- [58] Banhart, J.: Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Material Science 46*, Elsevier Science Ltd., pp. 559–632, 2001.
- [59] Hartmann, M.: Herstellung, Struktur und Eigenschaften syntaktischer Magnesiumschäume. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2015.
- [60] Ashby, M. F.: The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 364*, Issue 1838, The Royal Society, pp. 15–30, 2006.
- [61] Zhang, Z. Q., Yang, J. L., Li, Q. M.: An analytical model of foamed concrete aircraft arresting system. *International Journal of Impact Engineering 61*, pp. 1–12, 2013.
- [62] Song, Y., Lange, D. A.: Crushing Behavior and Crushing Strengths of Low-Density Foam Concrete. *ACI Materials Journal 117*, Issue 2, pp. 43–52, 2020.
- [63] Song, Y., Lange, D.: Crushing Performance of Ultra-Lightweight Foam Concrete with Fine Particle Inclusions. *Applied Sciences 9*, Issue 5, pp. 1–14, 2019.
- [64] Guo, W.-G., Wang, J.-J., Li, G.-L., Shi, Y.-J.: Crushing and Flowing Characteristics of Lightweight Foamed Concrete under Different Loading Rates and Temperatures. *Key Engineering Materials 535-536*, pp. 569–573, 2013.
- [65] Amirrasouli, B.: Mechanical Properties of Low Density Fibre-Reinforced Cellular Concrete and its Energy Absorption Potential against Air Blast. University of Manchester, Dissertation, 2015.
- [66] Kasperek, E., Völzke, H., Scheidemann, R.: Simulationen von stoßdämpfenden Werkstoffen unter dem Aufprall von Fallgewichten. In: *Tagungsband des 11. Internationalen Symposiums "Konditionierung radioaktiver Betriebs- und Stilllegungsabfälle" (KONTEC 2013)*. Dresden, Deutschland, 2013.
- [67] Qiao, L., Zencker, U., Kasperek, E.-M., Völzke, H., Scheidemann, R.: Development of a finite element model for damping concrete under severe impact loads. In: *Proceedings of the 17th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM 2013)*. San Francisco, USA, 2013.
- [68] Scheidemann, R., Kasperek, E.-M., Müller, K., Droste, B., Völzke, H.: Model-sized and full-scale dynamic penetration tests on damping concrete. In: *Proceedings of the 17th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM 2013)*. San Francisco, USA, 2013.

- [69] Scheidemann, R., Kasperek, E.-M., Qiao, L.: Dynamic Penetration Tests on Shock Absorbing Damping Concrete – 14166. In: *Proceedings of the Waste Management Symposia (WM2014)*. Phoenix, USA, 2014.
- [70] Scheidemann, R., Qiao, L., Müller, K., Droste, B.: Determination of material parameters of damping concrete under dynamic loading. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Radioactive Materials Transport and Storage (RAMTRANS 2015)*. Oxford, UK, 2015.
- [71] Scheidemann, R., Qiao, L., Müller, K.: Ermittlung dynamischer Kennwerte von Dämpferbeton für die Simulation des Beanspruchungsverhaltens. In: *Tagungsband zur Tagung Werkstoffprüfung 2016: "Fortschritte in der Werkstoffprüfung für Forschung und Praxis"*. Düsseldorf, Deutschland, 2016.
- [72] Scheidemann, R., Qiao, L., Müller, K.: Comparison of experimental results and numerical simulations of penetration tests with damping concrete. In: *Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels & Piping Conference (PVP2017)*. Hawaii, USA, 2017.
- [73] Kasperek, E., Scheidemann, R., Zencker, U., Wolff, D., Völzke, H.: Effect of dynamic loading on compressional behavior of damping concrete. In: *Proceedings of the 16th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM 2010)*. London, UK, 2010.
- [74] Qiao, L., Zencker, U., Kasperek, E.-M., Völzke, H.: Simulation of Damping Concrete under Severe Impact Loads using a Crushable Foam Model with Damage Mechanisms. In: Topping, B. H. V., Iványi, P. (Hrsg.): *Proceedings of the 12th International Conference on Computational Structures Technology*. Stirlingshire, Scotland, 2014.
- [75] Stolz, M., Steiner, P.: Der Einsatz von hochdeformierbaren Betonelementen beim Tunnelbau in druckhaften und quellfähigen Gebirgsverhältnissen. In: *Tagungsband des 7. Kolloquiums "Bauen in Boden und Fels"*. Stuttgart, Deutschland, 2010.
- [76] Billig, B., Gipperich, C., Wulff, M., Schaab, A.: II. Ausbausysteme für den maschinellen Tunnelbau in druckhaftem Gebirge. In: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (Hrsg.): *Taschenbuch für den Tunnelbau 2008. Kompendium der Tunnelbautechnologie. Planungshilfe für den Tunnelbau*. VGE Verlag, S. 223–262, 2008.
- [77] Kovári, K.: Design methods with yielding support in squeezing and swelling rock. In: *Proceedings of the World Tunnel Congress 2009*. Budapest, Hungary, 2009.
- [78] Radončić, N., Schubert, W., Moritz, B.: Ductile support design. *Geomechanics and Tunneling* 2, Issue 5, pp. 561–577, 2009.
- [79] Kovári, K., Chiaverio, F.: Modular yielding support for tunnels in heavily swelling rock. In: *Tagungsband der STUVA-Tagung 2007*. Köln, Deutschland, 2007.
- [80] Moritz, B.: Yielding elements - requirements, overview and comparison. *Geomechanics and Tunneling* 4, Issue 3, pp. 221–236, 2011.
- [81] Mezger, F., Ramoni, M., Anagnostou, G.: Options for deformable segmental lining systems for tunnelling in squeezing rock. *Tunnelling and Underground Space Technology* 76, Elsevier Ltd., pp. 64–75, 2018.

- [82] Schneider, E., Rotter, K., Saxer, A., Röck, R.: Compex Support System. Komprimierbarer Ringspaltmörtel zur Bewältigung druckhafter Gebirgsbereiche bei TBM-Vortrieben mit starrem Tübbingausbau. *Felsbau* 23, Heft 5, S. 95–101, 2005.
- [83] Ramoni, M., Anagnostou, G.: Tunnel boring machines under squeezing conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology* 25, Issue 2, Elsevier Ltd., pp. 139–157, 2010.
- [84] Wiese, A.-L.: Vergleichende Untersuchungen von Stauchelementen für den Einsatz in druckhaftem Gebirge. *mining geo*, Heft 1, S. 125–134, 2012.
- [85] Breitenbücher, R., Christ, F., Iskhakov, T., Lavasan, A. A., Mark, P., Meschke, G., Neu, G. E., Petraroia D. N., Plückelmann, S., Schulte-Schrepping, C., Schoen, M., Timothy, J. J.: Deformation-Tolerant Tunnel Linings in Swelling Soils. tunnel Series: Interaction Modeling in Mechanized Tunneling, Part 4. *Tunnel* 4, pp. 50–54, 2021.
- [86] Neu, E. N., Christ, F., Iskhakov, T., Krikelis, C., Petraroia, D. N., Plückelmann, S., Schoen, M., Breitenbücher, R., Lavasan, A. A., Mark, P., Meschke, G., Timothy, J. J.: Tunnel Linings. In: Meschke, G., Breitenbücher, R., Freitag, S., König, M., Thewes, M. (Hrsg.): Interaction Modeling in Mechanized Tunneling. Springer, pp. 253–328, 2023.
- [87] Petraroia, D. N., Plückelmann, S., Mark, P., Breitenbücher, R.: Tunnel lining segments with enhanced bearing capacity using hybrid concrete concepts. *Tunneling and Underground Space Technology* 143, 105484, 2024.
- [88] Plückelmann, S., Breitenbücher, R.: Verformungsverhalten von Betonen mit ausgeprägtem plastischen Stauchvermögen. *Beton- und Stahlbetonbau* 115, Heft 12, Ernst & Sohn, S. 994–1005, 2020.
- [89] Petraroia, D. N., Medeghini, F., Plückelmann, S., Mark, P., Breitenbücher, R.: Material reduced tunnel lining segments for moderately swelling soils. *Structural Concrete* 24, Issue 4, pp. 5150–5166, 2023.
- [90] Vu, G., Iskhakov, T., Timothy, J. J., Schulte-Schrepping, C., Breitenbücher, R., Meschke, G.: Cementitious Composites with High Compaction Potential: Modeling and Calibration. *Materials* 13, Issue 21, 2020.
- [91] Eisenacher, G.: Charakteristik und Modellierung von Fichtenholz unter dynamischer Druckbelastung. Technische Universität Berlin, Dissertation, 2014.
- [92] Neumann, M.: Untersuchung des Verhaltens stoßdämpfender Bauteile von Transportbehältern für radioaktive Stoffe in Bauartprüfung und Risikoanalyse. Bergische Universität Wuppertal, Dissertation, 2009.
- [93] Doyle, K. E.: Material properties of crushable concrete for use in vehicle anti-ram barriers. Master Thesis, Pennsylvania State University, 2015.
- [94] Barsotti, M. A., Puryear, J. M. H., Stevens, D. J.: Developing Improved Civil Aircraft Arresting Systems (ACRP report 29), Transportation Research Board, 2009.
- [95] Jiang, C., Yao, H., Xiao, X., Kong, X., Shi, Y.: Phenomena of Foamed Concrete under Rolling of Aircraft Wheels. *Journal of Physics: Conference Series* 495, 012035, 2014.
- [96] United States Department of Transportation: https://www.faa.gov/airports/engineering/incursions_excursions/emas, abgerufen am: 09.11.2023.
- [97] Runway Safe Group: <https://runwaysafe.com/solutions/emasmax/>, abgerufen am: 09.11.2023.

- [98] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 933-1:2012-03: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren; Deutsche Fassung EN 933-1:2012.
- [99] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 1936:2007-02: Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität; Deutsche Fassung EN 1936:2006.
- [100] Deutsches Institut für Normung: DIN V 18004:2004-04: Anwendungen von Bauprodukten in Bauwerken - Prüfverfahren für Gesteinskörnungen nach DIN V 20000-103 und DIN V 20000-104.
- [101] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 1097-3:1998-06: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 3: Bestimmung von Schüttdichte und Hohlraumgehalt; Deutsche Fassung EN 1097-3:1998.
- [102] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 445:2008-01: Einpressmörtel für Spannglieder - Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 445:2007.
- [103] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 12350-6:2019-09: Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonrohichte; Deutsche Fassung EN 12350-6:2019.
- [104] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 12390-7:2021-01: Prüfung von Festbeton - Teil 7: Rohdichte von Festbeton; Deutsche Fassung EN 12390-7:2019 + AC:2020.
- [105] Iskhakov, T., Timothy, J. J., Plückelmann, S., Breitenbücher, R., Meschke, G.: Compressible cementitious composite materials: Multiscale modeling and experimental investigation. *Cement and Concrete Composites* 142, 105174, 2023.
- [106] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 12390-3:2019-10: Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2019.
- [107] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 12350-5:2019-09: Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß; Deutsche Fassung EN 12350-5:2019.
- [108] Deutsches Institut für Normung: DIN 1045-2:2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1.
- [109] Plückelmann, S., Breitenbücher, R.: Experimentelle Untersuchungen zum Stauchverhalten stark porosierter Betone. In: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): *Tagungsband der 21. Internationalen Baustofftagung ibausil*. Weimar, Deutschland, 2023.
- [110] Schulte-Schrepping, C.: Materialkonzepte zur Aktivierung von Ringspaltverfüllmaterialien im maschinellen Tunnelbau. Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2020.
- [111] Dyckerhoff GmbH: Technisches Datenblatt: Dyckerhoff PZ Doppel R (Portlandzement EN 197-1 - CEM I 42,5 R).
- [112] Euroquarz GmbH: Technisches Datenblatt: Quarzmehl Silverbond M8.
- [113] Sika Deutschland GmbH: Technisches Datenblatt: Schaumbildner Sika Lighcrete-400.
- [114] Wöllner GmbH: Technisches Datenblatt: Betol 38 (Natriumwasserglas).
- [115] Wöllner GmbH: Technisches Datenblatt: Geosil 14515 (Kaliumwasserglas).

Anhang

ANHANG	149
Anhang A Charakteristische Kennwerte der Ausgangsstoffe	150
Anhang B Mischungszusammensetzungen.....	153
I. Zementsteinvarianten.....	153
II. Betonvarianten.....	154
Anhang C Zementstein- und Festbetoneigenschaften.....	158
I. Zementsteinvarianten.....	158
II. Betonvarianten.....	162
Anhang D Spannungs-Stauchungskurven (Einzelkurven)	163
I. Zementsteinvarianten.....	163
II. Betonvarianten.....	166
III. Variation des Lastflächenverhältnisses.....	170
Anhang E Bauteilpläne – Versuchsstand.....	171
LEBENS LAUF	177

Anhang A Charakteristische Kennwerte der Ausgangsstoffe

Bindemittel (Zement)

Tabelle A 1: Charakteristische Kennwerte des verwendeten Zements (CEM I 42,5 R).

Kennwert	Einheit	CEM I 42, R
<i>Mechanische und physikalische Kennwerte nach [110, 111]</i>		
Dichte (bei 20 °C)	[g/cm ³]	3,09
Spezifische Oberfläche	[cm ² /g]	5052
D ₁₀ (Partikel-Ø 10 %)	[µm]	0,47
D ₅₀ (Partikel-Ø 50 %)	[µm]	8,62
D ₉₀ (Partikel-Ø 90 %)	[µm]	35,2
Erstarrungsbeginn	[hh:min]	146
Wasseranspruch	[M.-%]	27
Raumbeständigkeit	[mm]	1
Normdruckfestigkeit (2 d)	[N/mm ²]	29
Normdruckfestigkeit (28 d)	[N/mm ²]	59
Glühverlust	[M.-%]	3,2
Unlöslicher Rückstand	[M.-%]	2
<i>Chemische Zusammensetzung nach [110]</i>		
SiO ₂	[M.-%]	19,8
TiO ₂	[M.-%]	0,3
Al ₂ O ₃	[M.-%]	5,3
FeO ₂	[M.-%]	2,0
CaO	[M.-%]	59,5
MgO	[M.-%]	1,2
MnO	[M.-%]	0,1
K ₂ O	[M.-%]	0,9
Na ₂ O	[M.-%]	0,2
SO ₃	[M.-%]	3,1

Quarzmehl

Tabelle A 2: Charakteristische Kennwerte des verwendeten Quarzmehls nach [112].

Kennwert	Einheit	Quarzmehl
<i>Physikalische Kennwerte</i>		
Dichte (bei 20 °C)	[g/cm ³]	2,65
Spezifische Oberfläche	[cm ² /g]	3200
D ₁₀ (Partikel-Ø 10 %)	[µm]	4
D ₅₀ (Partikel-Ø 50 %)	[µm]	27
D ₉₀ (Partikel-Ø 90 %)	[µm]	75
Glühverlust	[M.-%]	0,15
<i>Chemische Zusammensetzung</i>		
SiO ₂	[M.-%]	99,4
Fe ₂ O ₃	[M.-%]	0,03
Al ₂ O ₃	[M.-%]	0,1
TiO ₂	[M.-%]	0,07

Schaumbildner

Tabelle A 3: Charakteristische Kennwerte des verwendeten Schaumbildners nach [113].

Kennwert	Einheit	Schaumbildner
Chemische Basis	-	Organisches Tensid
Dichte (bei 20 °C)	[g/cm ³]	1,07
Chloridgehalt	[M.-%]	≤ 0,10

Wassergläser

Tabelle A 4: Charakteristische Kennwerte der verwendeten Wassergläser nach [114, 115].

Kennwert	Einheit	Natriumwasserglas	Kaliumwasserglas
Chemische Basis	-	Natriumsilikat	Kaliumsilikat
Dichte (bei 20 °C)	[g/cm ³]	1,37	1,51
pH-Wert	[-]	11,3	13,5
Viskosität (bei 20 °C)	[mPas]	100	20
SiO ₂	[M.-%]	27,5	21,9
M ₂ O	[M.-%]	8,3	22,9
Molverhältnis (SiO ₂ :M ₂ O)	[%]	3,4	1,5
Feststoffgehalt	[M.-%]	36,0	45,0

Poröse Zuschlagstoffe

Die charakteristischen Kennwerte (Kornform, Kornoberflächenbeschaffenheit, Lieferkorngröße, Reindichte, Rohdichte, Schüttdichte, Porosität, Wasseraufnahme, Hohlraumgehalt des Haufwerks, Korndruckfestigkeit) der eingesetzten Zuschlagstoffe können Abschnitt 5.2 entnommen werden. Die Korngrößenverteilung der Lieferkörnungen wurde nach DIN EN 933-1 [98] bestimmt und ist den nachfolgenden Tabellen zu entnehmen.

Tabelle A 5: Korngrößenverteilung der Lieferkörnungen: Blähton und Blähton-Leichtsand.

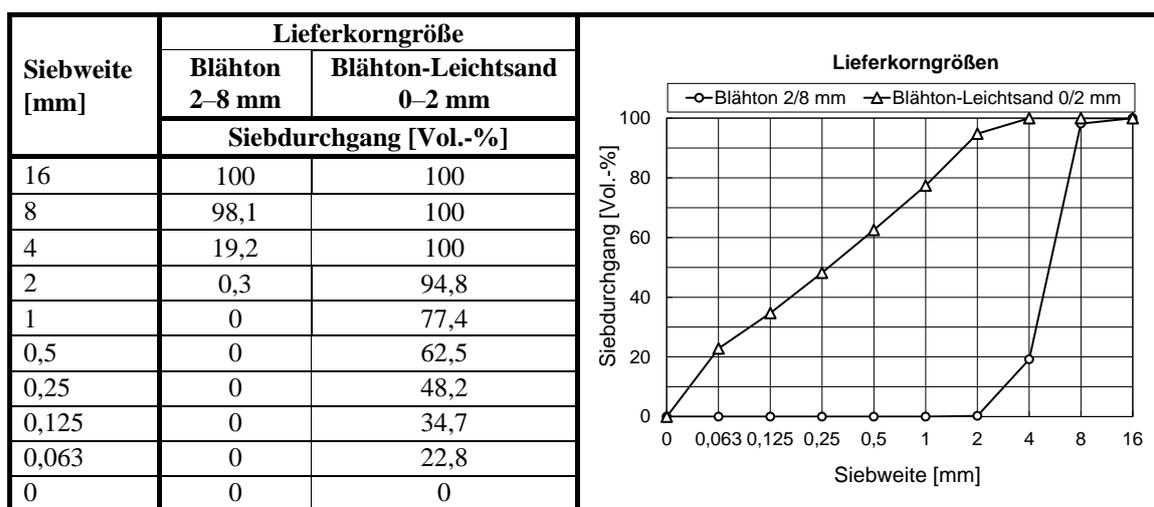


Tabelle A 6: Korngrößenverteilung der Lieferkörnungen: Blähglas.

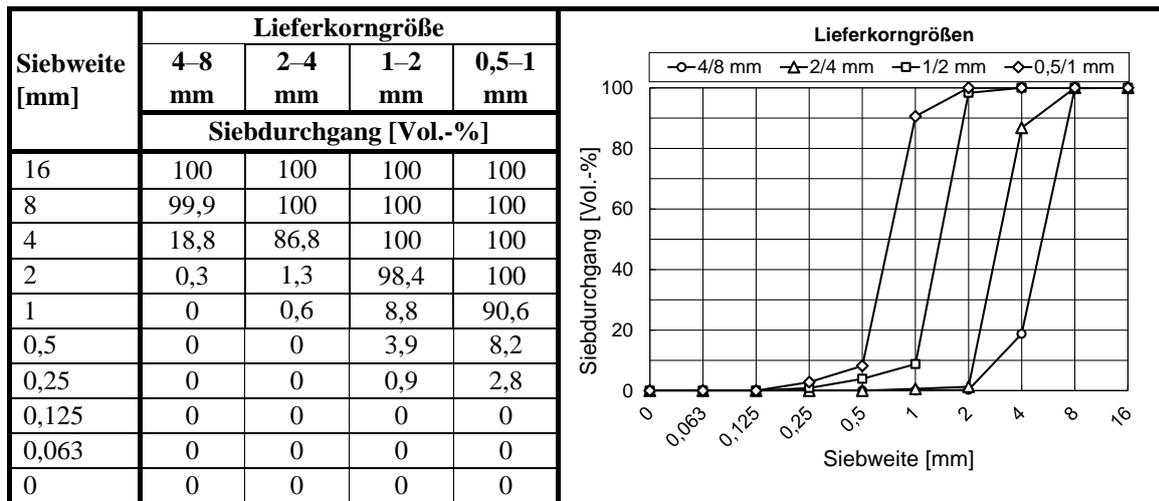


Tabelle A 7: Korngrößenverteilung der Lieferkörnungen: Vermiculite.

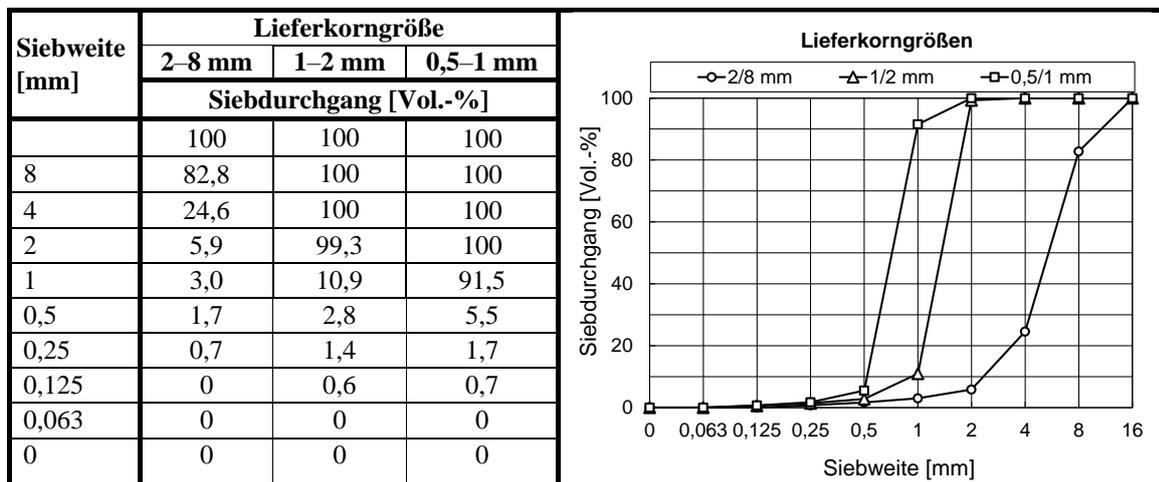
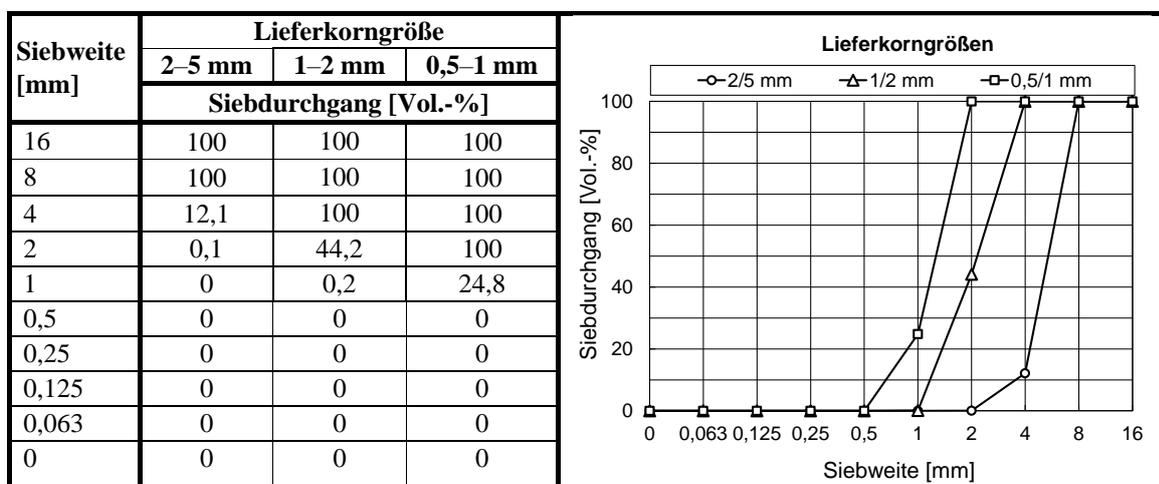


Tabelle A 8: Korngrößenverteilung der Lieferkörnungen: EPS-Perlen.



Anhang B Mischungszusammensetzungen

I. Zementsteinvarianten

Tabelle A 9: Mischungszusammensetzung ZS-0.

Komponenten	Rohdichte ρ kg/dm ³	Einwaage [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]
Zement (CEM I 42,5 R)	3,1	941,3	303,6
Wasser	1,0	658,9	658,9
w/z-Wert	-	0,70	
Luftporen	-	-	0
Wasserglas Na+Ka	1,44	53,9	37,4
		$\Sigma \approx 1654$	$\Sigma \approx 1000$
Soll-Frischrohddichte $\rho_{f,soll}$ [kg/m ³]		1654	

Tabelle A 10: Mischungszusammensetzungen ZS-L40, ZS-L50 und ZS-L60.

Komponenten	Rohdichte ρ [kg/dm ³]	ZS-L40		ZS-L50		ZS-L60	
		Einwaage [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]	Einwaage [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]	Einwaage [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]
Zement (CEM I 42,5 R)	3,1	562,9	181,6	468,4	151,1	373,1	120,4
Wasser	1,0	394,0	394,0	327,9	327,9	261,2	261,2
w/z-Wert	-	0,70		0,70		0,70	
Luftporen	-	-	400,0	-	500,0	-	600,0
Wasserglas (Na+Ka)	1,44	32,3	22,4	26,8	18,6	21,3	14,8
Schaumbildner	1,10	2,2	2,0	2,6	2,4	4,0	3,6
		$\Sigma \approx 991$	$\Sigma \approx 1000$	$\Sigma \approx 826$	$\Sigma \approx 1000$	$\Sigma \approx 659$	$\Sigma \approx 1000$
Soll-Frischrohddichte $\rho_{f,soll}$ [kg/m ³]		991		826		659	

Tabelle A 11: Mischungszusammensetzungen ZS-EPS40_0,5/1, ZS-EPS50_0,5/1 und ZS-EPS60_0,5/1.

Komponenten	Rohdichte ρ [kg/dm ³]	ZS-EPS40_0,5/1		ZS-EPS50_0,5/1		ZS-EPS60_0,5/1	
		Einwaage [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]	Einwaage [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]	Einwaage [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]
Zement (CEM I 42,5 R)	3,1	564,8	182,2	470,7	151,8	376,5	121,5
Wasser	1,0	395,4	395,4	329,5	329,5	263,6	263,6
w/z-Wert	-	0,70		0,70		0,70	
Luftporen	-	-	0	-	0	-	0
EPS-Perlen: 0,5–1 mm	0,0212	8,48	400,0	10,6	500,0	12,7	600,0
Wasserglas (Na+Ka)	1,43	32,4	22,5	26,9	18,7	21,6	15,0
		$\Sigma \approx 1001$	$\Sigma \approx 1000$	$\Sigma \approx 837$	$\Sigma \approx 1000$	$\Sigma \approx 674$	$\Sigma \approx 1000$
Soll-Frischrohddichte $\rho_{f,soll}$ [kg/m ³]		1001		837		674	

Tabelle A 12: Mischungszusammensetzungen ZS-EPS50_1/2 und ZS-EPS60_1/2.

Komponenten	Rohdichte ρ [kg/dm ³]	ZS-EPS50_1/2		ZS-EPS60_1/2	
		Einwaage [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]	Einwaage [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]
Zement (CEM I 42,5 R)	3,1	470,7	151,8	376,5	151,8
Wasser	1,0	329,5	329,5	263,5	329,5
w/z-Wert		0,70		0,70	
Luftporen	-	-	0	-	0
EPS-Perlen: 1–2 mm	0,0276	13,8	500,0	16,6	600,0
Wasserglas (Na+Ka)	1,43	26,7	18,7	21,4	15,0
		$\Sigma \approx 841$	$\Sigma \approx 1000$	$\Sigma \approx 678$	$\Sigma \approx 1000$
Soll-Frischrohddichte $\rho_{f,soll}$ [kg/m ³]		841		678	

II. Betonvarianten

Tabelle A 13: Mischungszusammensetzungen B-Bg (Bg_0,5/8, wz0,7_Bg) und Bg_0,5/2.

Komponenten	Rohdichte ρ [kg/dm ³]	B-Bg (Bg_0,5/8, wz0,7_Bg)		Bg_0,5/2	
		Einwaage [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]	Einwaage [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]
Zement(CEM I 42,5 R)	3,1	220,0	71,0	220,0	71,0
Wasser effektiv	1,0	154,0	154,0	154,0	154,0
Saugwasser	1,0	39,1	-	52,1	-
		$\Sigma = 193,1$		$\Sigma = 206,1$	
w/z-Wert	-	0,70			
Luftporen	-	-	300,0	-	300,0
Blähglas:					
4–8 mm	0,312	44,4	142,1	-	-
2–4 mm	0,336	31,9	94,9	-	-
1–2 mm	0,421	46,9	118,5	99,8	237,0
0,5–1 mm	0,516	61,1	118,4	122,3	237,0
		$\Sigma = 187,3$	$\Sigma = 474,0$	$\Sigma = 222,1$	$\Sigma = 474,0$
Schaumbildner	1,1	1,1	1,0	1,2	1,1
		$\Sigma \approx 601$	$\Sigma \approx 1000$	$\Sigma \approx 1000$	$\Sigma \approx 649$
Soll-Frischrohddichte $\rho_{f,soll}$ [kg/m ³]		601		649	

Tabelle A 14: Mischungszusammensetzungen $wz1,0_Bg$ und $wz1,4_Bg$

Komponenten	Rohdichte ρ [kg/dm ³]	$wz1,0_Bg$		$wz1,4_Bg$	
		Einwaage [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]	Einwaage [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]
Zement(CEM I 42,5 R)	3,1	154,0	49,7	110,0	35,5
Quarzmehl	2,65	56,5	21,3	94,0	35,5
Wasser effektiv	1,0	154,0	154,0	154,0	154,0
Saugwasser	1,0	39,1	-	39,1	-
		$\Sigma = 193,1$		$\Sigma = 193,1$	
w/z-Wert	-	1,00		1,40	
Luftporen	-	-	300,0	-	300,0
Blähglas:					
4–8 mm	0,312	44,4	142,1	44,4	142,1
2–4 mm	0,336	31,9	94,9	31,9	94,9
1–2 mm	0,421	46,9	118,5	46,9	118,5
0,5–1 mm	0,516	61,1	118,4	61,1	118,4
		$\Sigma = 187,3$	$\Sigma = 474,0$	$\Sigma = 187,3$	$\Sigma = 474,0$
Schaumbildner	1,1	1,1	1,0	1,1	1,0
		$\Sigma \approx 592$	$\Sigma \approx 1000$	$\Sigma \approx 585$	$\Sigma \approx 1000$
Soll-Frischrohddichte $\rho_{f,soll}$ [kg/m ³]		592		585	

Tabelle A 15: Mischungszusammensetzungen B-EPS (EPS_0,5/5, $wz0,7_EPS$) und EPS_0,5/1.

Komponenten	Rohdichte ρ [kg/dm ³]	B-EPS (EPS_0,5/5, $wz0,7_EPS$)		EPS_0,5/1	
		Einwaage [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]	Einwaage [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]
Zement (CEM I 42,5 R)	3,1	220,0	71,0	220,0	71,0
Wasser effektiv	1,0	154,0	154,0	154,0	154,0
Saugwasser	1,0	-	-	-	-
w/z-Wert	-	0,70			
Luftporen	-	-	300,0	-	300,0
EPS-Perlen:					
2–5 mm	0,0220	3,13	142,2	-	-
1–2 mm	0,0276	3,27	118,5	-	-
0,5 - 1 mm	0,0212	4,52	213,3	10,0	474,0
		$\Sigma = 10,9$	$\Sigma = 474,0$	$\Sigma = 10,0$	$\Sigma = 474,0$
Schaumbildner	1,1	0,9	1,0	1,1	1,0
		$\Sigma \approx 386$	$\Sigma \approx 1000$	$\Sigma \approx 385$	$\Sigma \approx 1000$
Soll-Frischrohddichte $\rho_{f,soll}$ [kg/m ³]		386		385	

Tabelle A 16: Mischungszusammensetzungen w/z1,0_EPS und w/z1,4_EPS

Komponenten	Rohdichte ρ [kg/dm ³]	w/z1,0_EPS		w/z1,4_EPS	
		Einwaage [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]	Einwaage [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]
Zement (CEM I 42,5 R)	3,1	154,0	49,7	110,0	35,5
Quarzmehl	2,65	56,5	21,3	94,0	35,5
Wasser effektiv	1,0	154,0	154,0	154,0	154,0
Saugwasser	1,0	-	-	-	-
w/z-Wert	-	1,00		1,40	
Luftporen	-	-	300,0	-	300,0
EPS-Perlen:					
2–5 mm	0,0220	3,13	142,2	3,13	142,2
1–2 mm	0,0276	3,27	118,5	3,27	118,5
0,5 - 1 mm	0,0212	4,52	213,3	4,52	213,3
		$\Sigma = 10,9$	$\Sigma = 474,0$	$\Sigma = 10,9$	$\Sigma = 474,0$
Schaumbildner	1,1	1,0	0,9	1,0	0,9
		$\Sigma \approx 376$	$\Sigma \approx 1000$	$\Sigma \approx 370$	$\Sigma \approx 1000$
Soll-Frischrohddichte $\rho_{f,soll}$ [kg/m ³]		376		370	

Tabelle A 17: Mischungszusammensetzung Bt_0/8 und Ver_0,5/8.

Komponenten	Rohdichte ρ [kg/dm ³]	Bt_0/8		Ver_0,5/8	
		Einwaage [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]	Einwaage [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]
Zement (CEM I 42,5 R)	3,1	220,0	71,0	220,0	71,0
Wasser effektiv	1,0	154,0	154,0	154,0	154,0
Saugwasser	1,0	79,9	-	192,3	-
		$\Sigma = 233,9$		$\Sigma = 346,3$	
w/z-Wert	-	0,70		0,70	
Luftporen	-	-	300	-	300,0
Blähton 2–8 mm	0,67	221,0	331,8	-	-
Blähton-Leichtsand 0–2 mm	1,68	238,6	142,2	-	-
Vermiculite:					
2–8 mm	0,205	-	-	48,6	137,0
1–2 mm	0,211	-	-	20,0	94,8
0,5–1 mm	0,247	-	-	35,1	142,2
		$\Sigma = 459,6$	$\Sigma = 474,0$	$\Sigma = 103,7$	$\Sigma = 474,0$
Schaumbildner	1,1	1,4	1,3	1,2	1,1
		$\Sigma \approx 915$	$\Sigma \approx 1000$	$\Sigma \approx 671$	$\Sigma \approx 1000$
Soll-Frischrohddichte $\rho_{f,soll}$ [kg/m ³]		915		671	

Die Zusammensetzungen und Gesamtsieblinien der für die Betone verwendeten Zuschlagstoffvarianten sind in der nachfolgenden Tabelle angegeben.

Tabelle A 18: Zusammensetzung und Gesamtsieblinien der Zuschlagstoffvarianten.

Zuschlagstoff	Blähton-Leichtsand		Blähton			Blähglas			Vermiculite			EPS-Perlen			Σ
	0-2 mm	2-8 mm	0,5-1 mm	1-2 mm	2-4 mm	4-8 mm	0,5-1 mm	1-2 mm	2-8 mm	0,5-1 mm	1-2 mm	2-5 mm			
Bezeichnung	Volumenanteil [Vol.-%]														
Bt_0/8	30	70													100
Bg_0,5/8 (B-Bg)			25	25	20	30									100
Bg_0,5/2			50	50											100
Ver_0,5/8							30	20	50						100
EPS_0,5/5 (B-EPS)										45	25	30			100
EPS_0,5/1										100					100

The figure contains four line graphs showing cumulative sieve curves for different aggregate types. Each graph plots Siebdurchgang [Vol.-%] on the y-axis (0 to 100) against Siebweite [mm] on the x-axis (0 to 16).

- Top-left graph:** Compares Bg_0,5/8 (squares) and Bg_0,5/2 (circles). Bg_0,5/2 has a steeper curve, reaching 100% at 2 mm, while Bg_0,5/8 reaches 100% at 8 mm.
- Top-right graph:** Compares EPS_0,5/5 (squares) and EPS_0,5/1 (circles). EPS_0,5/1 reaches 100% at 2 mm, while EPS_0,5/5 reaches 100% at 8 mm.
- Bottom-left graph:** Shows Bt_0/8 (squares), which reaches 100% at 8 mm.
- Bottom-right graph:** Shows Ver_0,5/8 (squares), which reaches 100% at 16 mm.

Anhang C Zementstein- und Festbetoneigenschaften

I. Zementsteinvarianten

Tabelle A 19: Festrohdichte und Druckfestigkeit der Zementsteinvarianten

Bezeichnung	Festrohddichte ρ_s [kg/m ³]		Druckfestigkeit $f_{c,cube}$ [N/mm ²]	
	EW	MW	EW	MW
ZS-0	1628	1621	22,5	23,1
	1624		23,9	
	1611		22,8	
ZS-L40	955	947	4,43	4,20
	944		3,99	
	943		4,18	
ZS-L50	809	808	2,50	2,61
	806		2,63	
	809		2,70	
ZS-L60	664	643	1,47	1,30
	630		1,17	
	635		1,27	
ZS-EPS40_0,5/1	930	929	5,18	5,18
	941		4,95	
	917		5,41	
ZS-EPS50_0,5/1	778	789	3,63	3,59
	791		3,97	
	797		3,19	
ZS-EPS60_0,5/1	637	644	2,15	2,22
	639		2,04	
	656		2,46	
ZS-EPS50_1/2	788	801	4,34	4,38
	814		4,23	
	800		4,57	
ZS-EPS60_1/2	657	656	2,73	2,88
	665		2,85	
	646		3,05	

Tabelle A 20: Einzelwerte der gemessenen Luftporendurchmesser $\geq 0,03$ mm für ZS-L40.

n [-]	Ø [mm]						
1	0,18	51	0,06	101	0,14	151	0,06
2	0,07	52	0,12	102	0,16	152	0,23
3	0,14	53	0,16	103	0,11	153	0,24
4	0,19	54	0,29	104	0,06	154	0,14
5	0,16	55	0,08	105	0,20	155	0,12
6	0,14	56	0,14	106	0,09	156	0,10
7	0,17	57	0,26	107	0,15	157	0,29
8	0,25	58	0,15	108	0,10	158	0,12
9	0,28	59	0,13	109	0,06	159	0,03
10	0,07	60	0,06	110	0,13	160	0,10
11	0,05	61	0,08	111	0,16	161	0,15
12	0,21	62	0,18	112	0,16	162	0,06
13	0,08	63	0,09	113	0,06	163	0,20
14	0,18	64	0,08	114	0,04	164	0,10
15	0,15	65	0,20	115	0,12	165	0,19
16	0,13	66	0,09	116	0,08	166	0,11
17	0,17	67	0,13	117	0,10	167	0,10
18	0,10	68	0,17	118	0,14	168	0,21
19	0,12	69	0,13	119	0,14	169	0,23
20	0,14	70	0,06	120	0,10	170	0,12
21	0,06	71	0,68	121	0,53	171	0,18
22	0,03	72	0,09	122	0,12	172	0,12
23	0,18	73	0,12	123	0,11	173	0,07
24	0,22	74	0,17	124	0,15	174	0,18
25	0,07	75	0,27	125	0,28	175	0,14
26	0,06	76	0,13	126	0,12	176	0,09
27	0,42	77	0,03	127	0,21	177	0,16
28	0,13	78	0,14	128	0,11	178	0,22
29	0,10	79	0,10	129	0,17	179	0,11
30	0,21	80	0,09	130	0,17	180	0,18
31	0,76	81	0,11	131	0,05	181	0,21
32	0,07	82	0,42	132	0,11	182	0,18
33	0,31	83	0,15	133	0,15	183	0,10
34	0,44	84	0,09	134	0,14	184	0,07
35	0,05	85	0,24	135	0,07	185	0,11
36	0,27	86	0,09	136	0,30	186	0,13
37	0,18	87	0,11	137	0,45	187	0,08
38	0,05	88	0,09	138	0,27	188	0,16
39	0,03	89	0,13	139	0,34	189	0,04
40	0,11	90	0,14	140	0,07	190	0,05
41	0,04	91	0,49	141	0,15	191	0,07
42	0,10	92	0,10	142	0,09	192	0,19
43	0,21	93	0,07	143	0,08	193	0,13
44	0,10	94	0,13	144	0,10	194	0,17
45	0,20	95	0,23	145	0,14	195	0,13
46	0,10	96	0,08	146	0,07	196	0,15
47	0,25	97	0,10	147	0,08	197	0,14
48	0,71	98	0,07	148	0,32	198	0,05
49	0,27	99	0,13	149	0,20	199	0,17
50	0,13	100	0,23	150	0,05		

min(Ø): 0,03 mm
max(Ø): 0,76 mm
MW(Ø): 0,15 mm

Tabelle A 21: Einzelwerte der gemessenen Luftporendurchmesser $\geq 0,03$ mm für ZS-L50.

n [-]	Ø [mm]								
1	0,20	51	0,31	101	0,13	151	0,20	201	0,07
2	0,34	52	0,31	102	0,34	152	0,13	202	0,30
3	0,17	53	0,10	103	0,12	153	0,11	203	0,14
4	0,28	54	0,18	104	0,13	154	0,27	204	0,22
5	0,20	55	0,15	105	0,19	155	0,13	205	0,09
6	0,27	56	0,56	106	0,14	156	0,31	206	0,05
7	0,20	57	0,10	107	0,11	157	0,06	207	0,26
8	0,08	58	0,08	108	0,03	158	0,26	208	0,09
9	0,12	59	0,26	109	0,06	159	0,10	209	0,11
10	0,12	60	0,20	110	0,16	160	0,4	210	0,13
11	0,25	61	0,11	111	0,11	161	0,05	211	0,18
12	0,21	62	0,07	112	0,05	162	0,16	212	0,09
13	0,20	63	0,27	113	0,42	163	0,35	213	0,20
14	0,26	64	0,09	114	0,19	164	0,14	214	0,08
15	0,15	65	0,14	115	0,23	165	0,14	215	0,40
16	0,21	66	0,40	116	0,22	166	0,30	216	0,15
17	0,29	67	0,53	117	0,09	167	0,22	217	0,09
18	0,28	68	0,16	118	0,16	168	0,24	218	0,08
19	0,18	69	0,14	119	0,06	169	0,11	219	0,40
20	0,29	70	0,46	120	0,15	170	0,27	220	0,13
21	0,28	71	0,16	121	0,09	171	0,14	221	0,12
22	0,10	72	0,20	122	0,05	172	0,33	222	0,06
23	0,08	73	0,09	123	0,05	173	0,11		
24	0,14	74	0,29	124	0,37	174	0,20		
25	0,29	75	0,48	125	0,14	175	0,07		
26	0,16	76	0,27	126	0,31	176	0,11		
27	0,29	77	0,26	127	0,22	177	0,43		
28	0,15	78	0,11	128	0,29	178	0,37		
29	0,22	79	0,24	129	0,07	179	0,09		
30	0,37	80	0,10	130	0,05	180	0,13		
31	0,26	81	0,10	131	0,21	181	0,29		
32	0,22	82	0,11	132	0,66	182	0,33		
33	0,09	83	0,20	133	0,10	183	0,15		
34	0,18	84	0,09	134	0,09	184	0,19		
35	0,10	85	0,18	135	0,11	185	0,23		
36	0,19	86	0,18	136	0,06	186	0,17		
37	0,28	87	0,06	137	0,15	187	0,15		
38	0,18	88	0,29	138	0,33	188	0,18		
39	0,20	89	0,11	139	0,41	189	0,13		
40	0,16	90	0,10	140	0,19	190	0,14		
41	0,22	91	0,05	141	0,07	191	0,81		
42	0,20	92	0,18	142	0,08	192	0,13		
43	0,19	93	0,13	143	0,04	193	0,11		
44	0,26	94	0,12	144	0,14	194	0,23		
45	0,25	95	0,08	145	0,11	195	0,11		
46	0,25	96	0,11	146	0,18	196	0,15		
47	0,15	97	0,11	147	0,08	197	0,10		
48	0,22	98	0,35	148	0,29	198	0,08		
49	0,18	99	0,24	149	0,29	199	0,11		
50	0,20	100	0,13	150	0,25	200	0,35		

min(Ø): 0,03 mm
max(Ø): 0,81 mm
MW(Ø): 0,19 mm

II. Betonvarianten

Tabelle A 23: Festbetonrohddichte und Druckfestigkeit der Betonvarianten

Bezeichnung	Festbetonrohddichte ρ_s [kg/m ³]		Druckfestigkeit $f_{c,cyl}$ [N/mm ²]	
	EW	MW	EW	MW
<i>Basiszusammensetzung, Blähglas 0,5/8 mm bzw. EPS 0,5/5 mm</i>				
B-Bg \triangleq { Bg_0,5/8 wz0,7_Bg	583	584	3,11 (3,41)	3,18
	587		3,35 (3,32)	
	582		3,07 (3,35)	
B-EPS \triangleq { EPS_0,5/5 wz0,7_Bg	361	365	0,81 (0,72)	0,79
	378		0,76 (0,89)	
	357		0,78 (0,88)	
<i>Variation der Zuschlagstoffe, ansonsten wie Basiszusammensetzung</i>				
Bt_0/8	933	927	5,95	6,13
	920		6,25	
	928		6,18	
Bg_0,5/2	619	624	3,55	3,57
	632		3,76	
	622		3,40	
Ver_0,5/8	575	569	0,81	0,85
	569		0,79	
	564		0,95	
EPS_0,5/1	380	382	0,76	0,76
	384		0,78	
	383		0,73	
<i>Variation des Wasserzementwertes, Blähglas 0,5/8 mm bzw. EPS 0,5/5 mm</i>				
wz1,0_Bg	563	564	13,67	1,85
	568		1,99	
	561		1,88	
wz1,0_EPS	349	351	0,44	0,46
	344		0,48	
	359		0,45	
wz1,4_Bg	577	576	1,06	1,05
	574		1,08	
	577		1,00	
wz1,4_EPS	346	344	0,32	0,27
	336		0,23	
	348		0,25	

Anhang D Spannungs-Stauchungskurven (Einzelkurven)

I. Zementsteinvarianten

In den nachfolgenden Abbildungen sind die in den Stauchversuchen ermittelten Einzelkurven der verschiedenen Zementsteinvarianten dargestellt (Datengrundlage Abschnitt 6.6). Die Versuchsrandbedingungen sind in Abschnitt 6.5 angegeben.

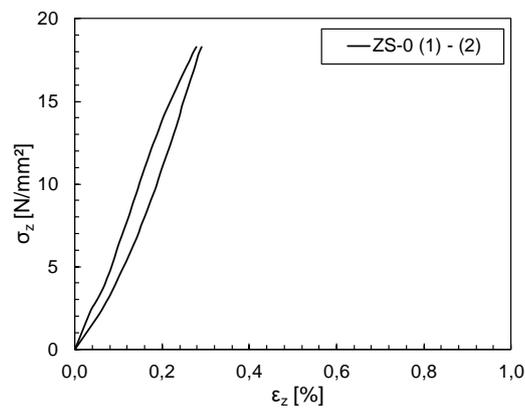


Abbildung A 1: Spannungs-Stauchungskurven von zwei Würfelproben (Kantenlänge: 150 mm) des Zementsteins ZS-0.

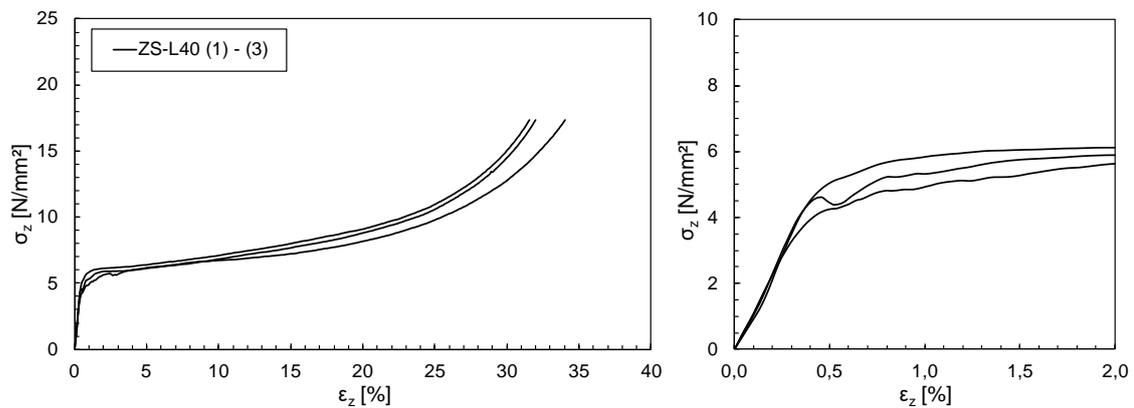


Abbildung A 2: Spannungs-Stauchungskurven von drei Würfelproben (Kantenlänge: 150 mm) des Zementsteins ZS-L40.

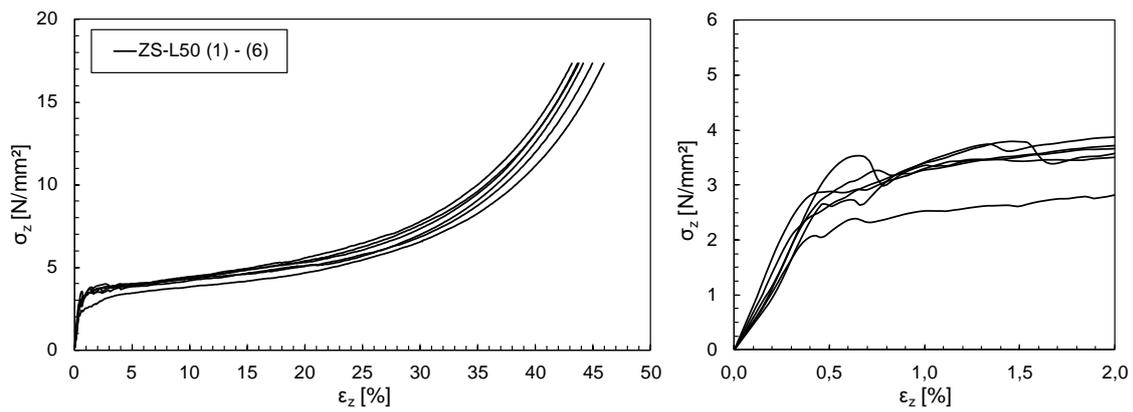


Abbildung A 3: Spannungs-Stauchungskurven von sechs Würfelproben (Kantenlänge: 150 mm) des Zementsteins ZS-L50.

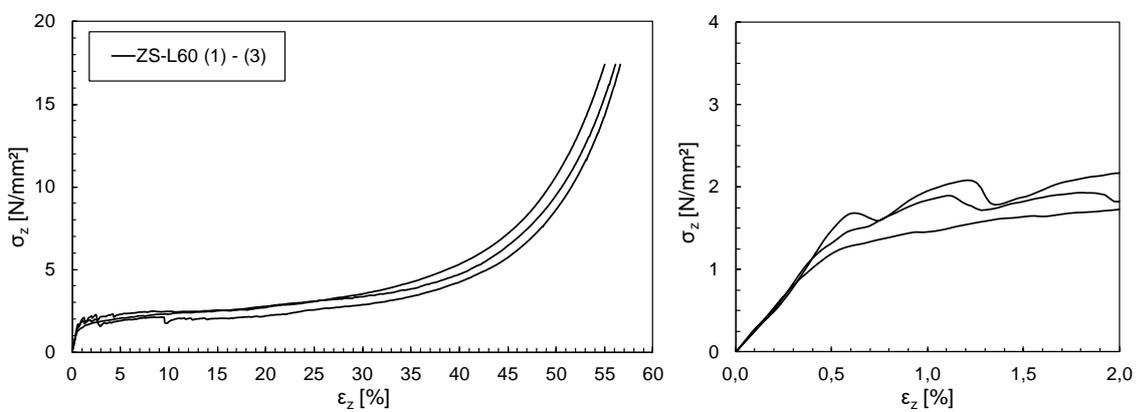


Abbildung A 4: Spannungs-Stauchungskurven von drei Würfelproben (Kantenlänge: 150 mm) des Zementsteins ZS-L60.

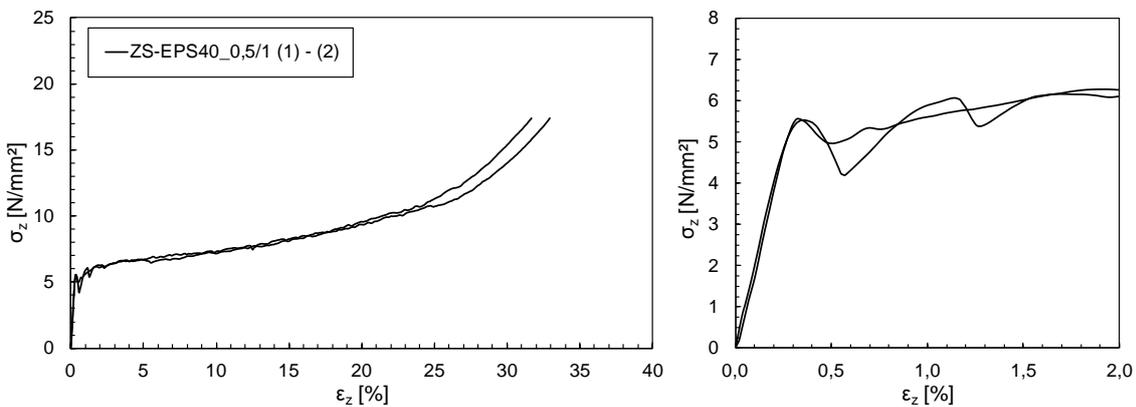


Abbildung A 5: Spannungs-Stauchungskurven von zwei Würfelproben (Kantenlänge: 150 mm) des Zementsteins ZS-EPS40_0,5/1.

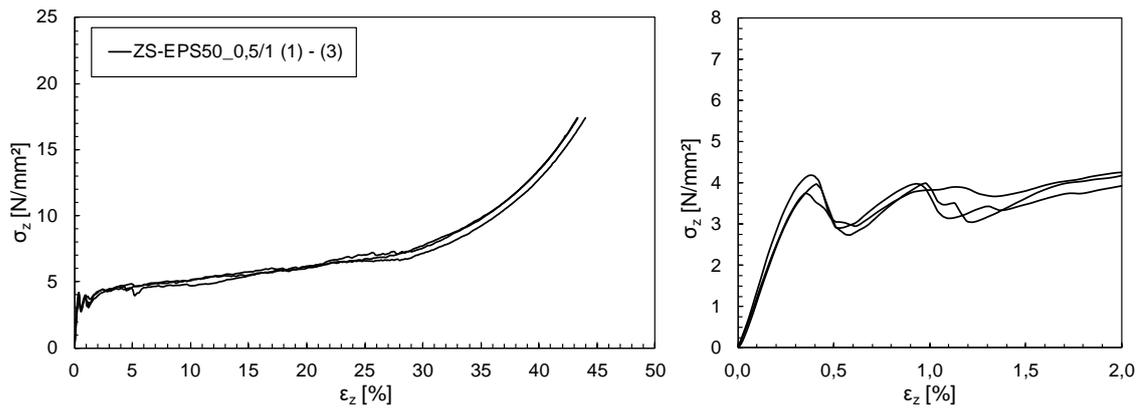


Abbildung A 6: Spannungs-Stauchungskurven von drei Würfelp Proben (Kantenlänge: 150 mm) des Zementsteins ZS-EPS50_0,5/1.

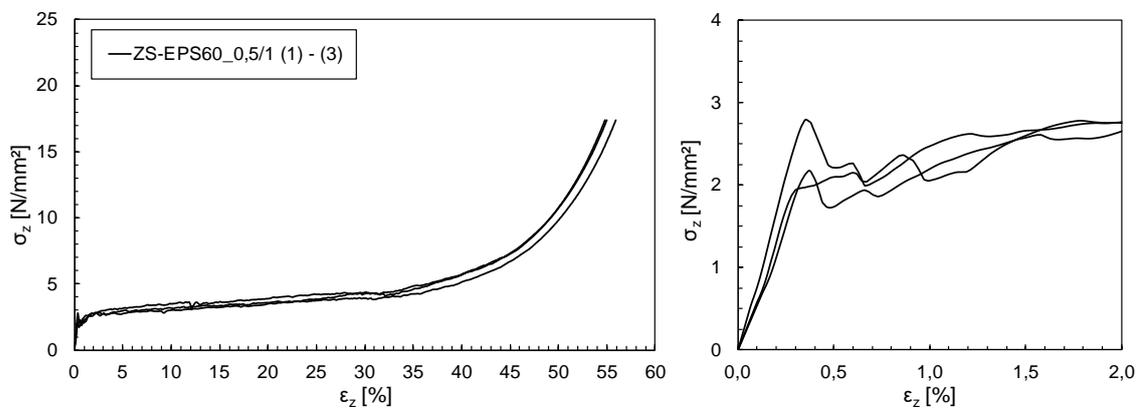


Abbildung A 7: Spannungs-Stauchungskurven von drei Würfelp Proben (Kantenlänge: 150 mm) des Zementsteins ZS-EPS60_0,5/1.

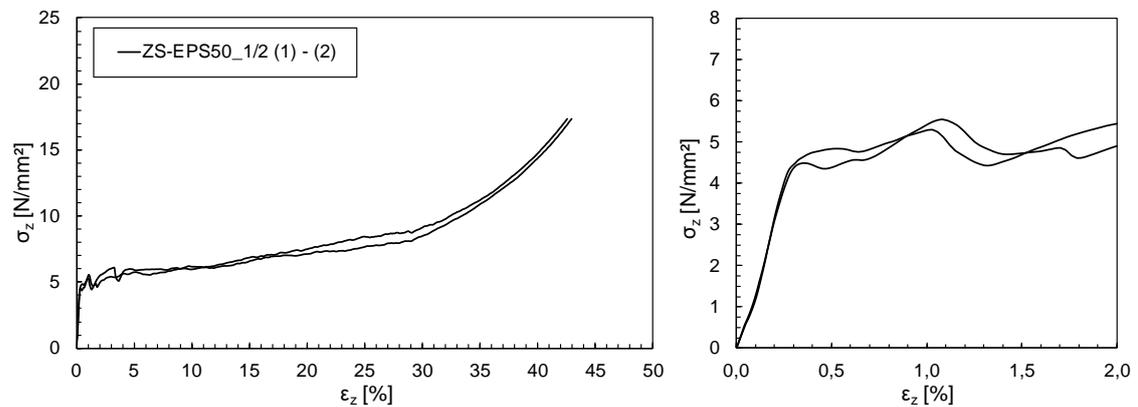


Abbildung A 8: Spannungs-Stauchungskurven von zwei Würfelp Proben (Kantenlänge: 150 mm) des Zementsteins ZS-EPS50_1/2.

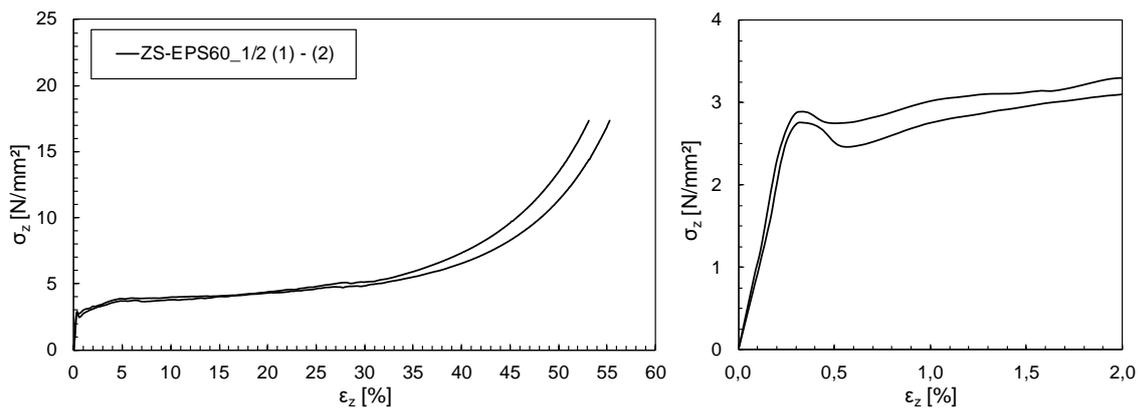


Abbildung A 9: Spannungs-Stauchungskurven von zwei Würfelproben (Kantenlänge: 150 mm) des Zementsteins ZS-EPS60_1/2.

II. Betonvarianten

In den nachfolgenden Abbildungen sind die in den Stauchversuchen ermittelten Einzelkurven der verschiedenen Betonvarianten dargestellt (Datengrundlage Abschnitt 7.7.1 und 7.7.2). Die Versuchsrandbedingungen sind in Abschnitt 7.6 angegeben.

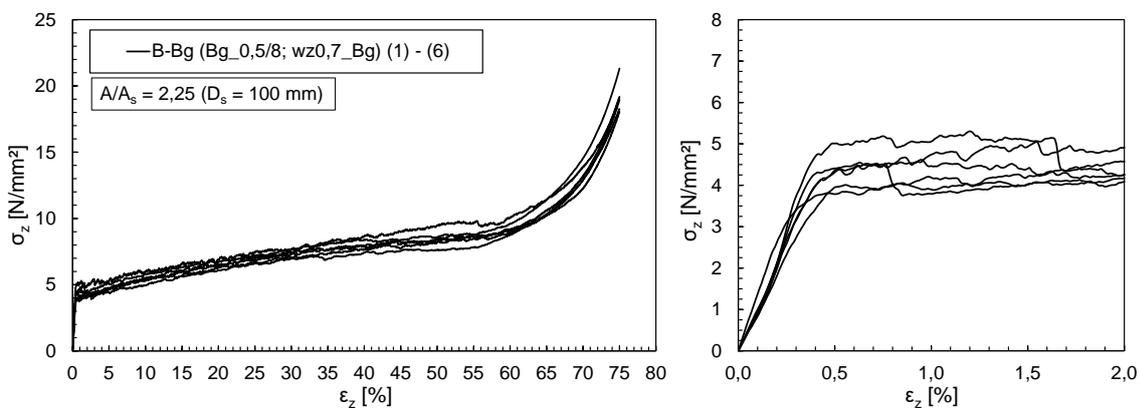


Abbildung A 10: Spannungs-Stauchungskurven von sechs Zylinderproben ($h_0/D = 300\text{ mm}/150\text{ mm}$) des Betons B-Bg (Bg_0,5/8, $wz0,7$ _Bg) unter Teilflächenbelastung ($A/A_s = 2,25$).

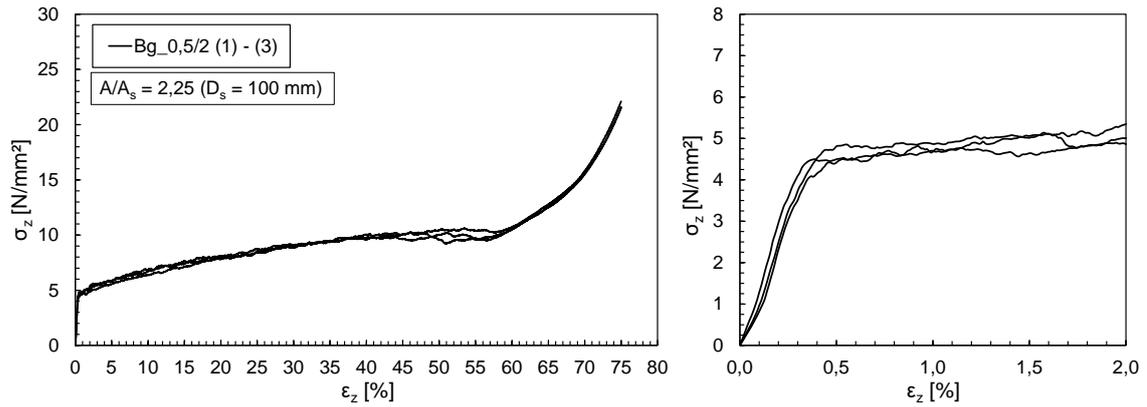


Abbildung A 11: Spannungs-Stauchungskurven von drei Zylinderproben ($h_0/D = 300$ mm/150 mm) des Betons Bg_0,5/2 unter Teilflächenbelastung ($A/A_s = 2,25$).

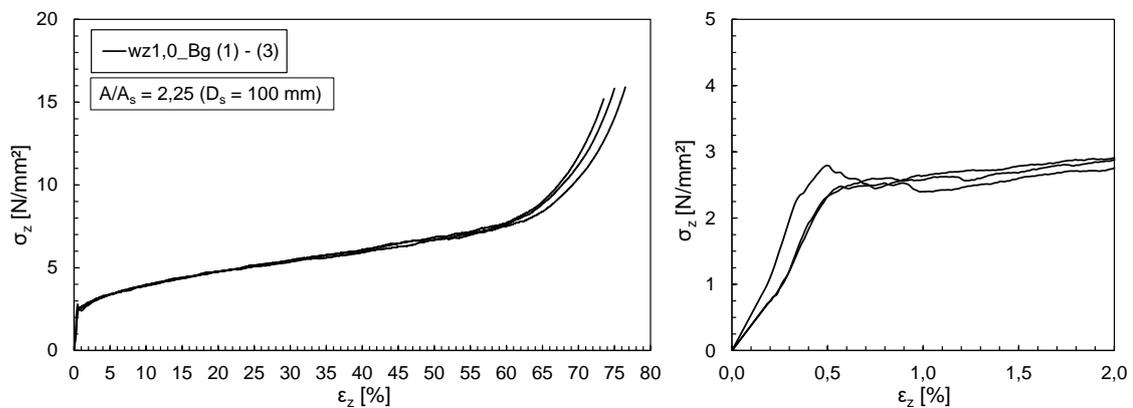


Abbildung A 12: Spannungs-Stauchungskurven von drei Zylinderproben ($h_0/D = 300$ mm/150 mm) des Betons wz1,0_Bg unter Teilflächenbelastung ($A/A_s = 2,25$).

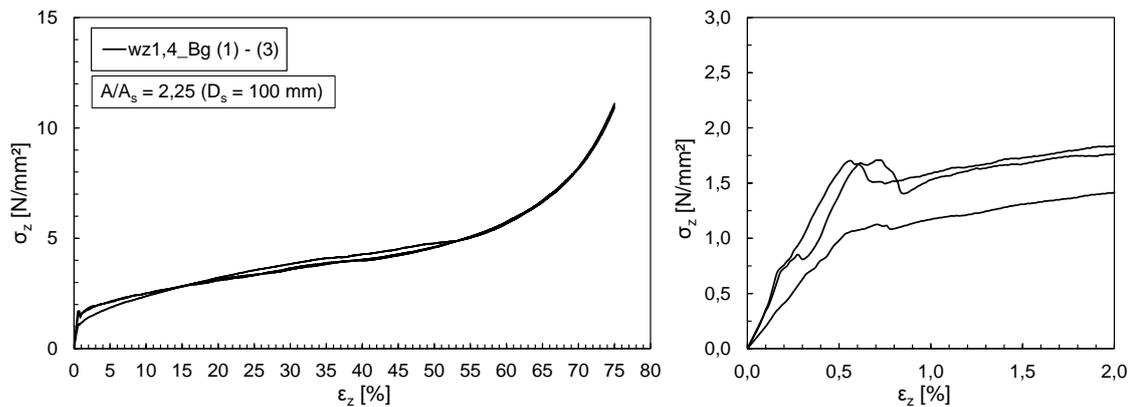


Abbildung A 13: Spannungs-Stauchungskurven von drei Zylinderproben ($h_0/D = 300$ mm/150 mm) des Betons wz1,4_Bg unter Teilflächenbelastung ($A/A_s = 2,25$).

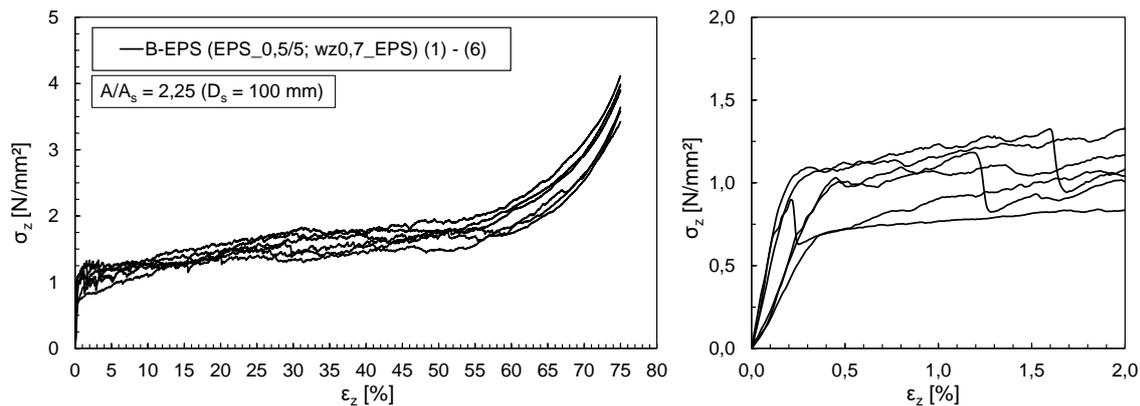


Abbildung A 14: Spannungs-Stauchungskurven von sechs Zylinderproben ($h_0/D = 300$ mm/ 150 mm) des Betons B-EPS (EPS_0,5/5, wz0,7_EPS) unter Teilflächenbelastung ($A/A_s = 2,25$).

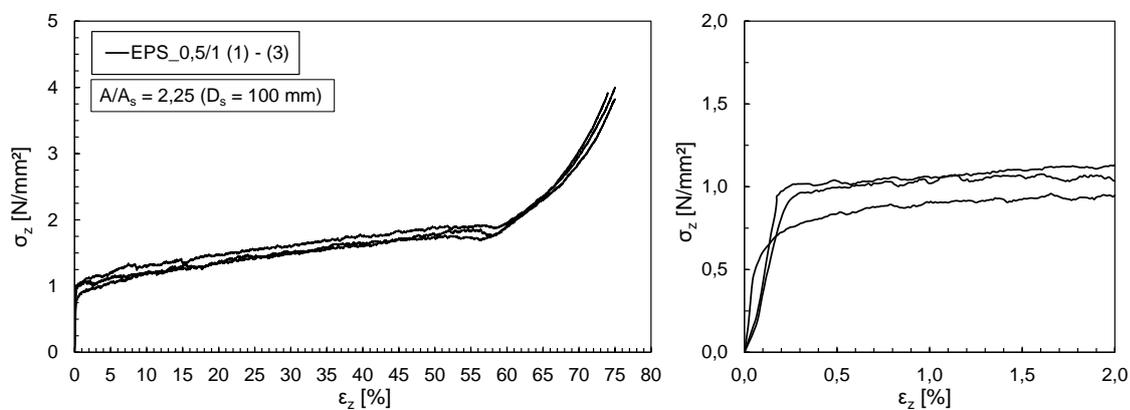


Abbildung A 15: Spannungs-Stauchungskurven von drei Zylinderproben ($h_0/D = 300$ mm/ 150 mm) des Betons EPS_0,5/1 unter Teilflächenbelastung ($A/A_s = 2,25$).

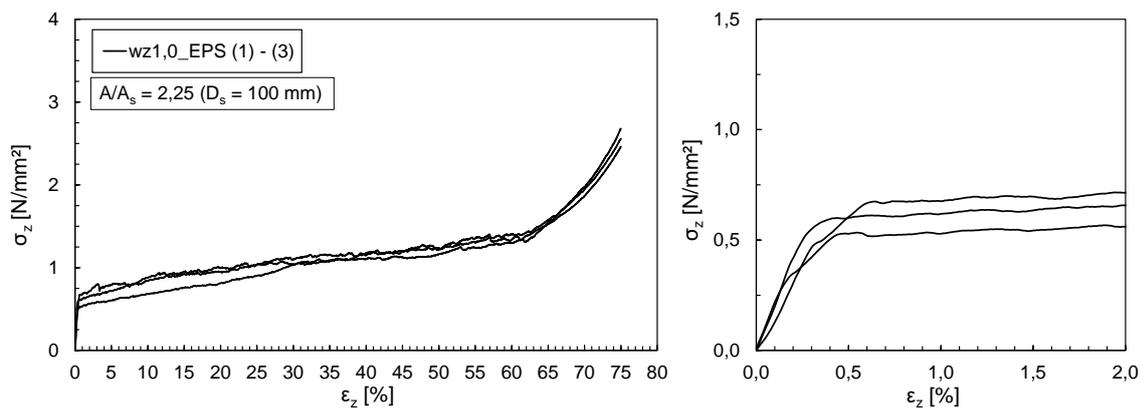


Abbildung A 16: Spannungs-Stauchungskurven von drei Zylinderproben ($h_0/D = 300$ mm/ 150 mm) des Betons wz1,0_EPS unter Teilflächenbelastung ($A/A_s = 2,25$).

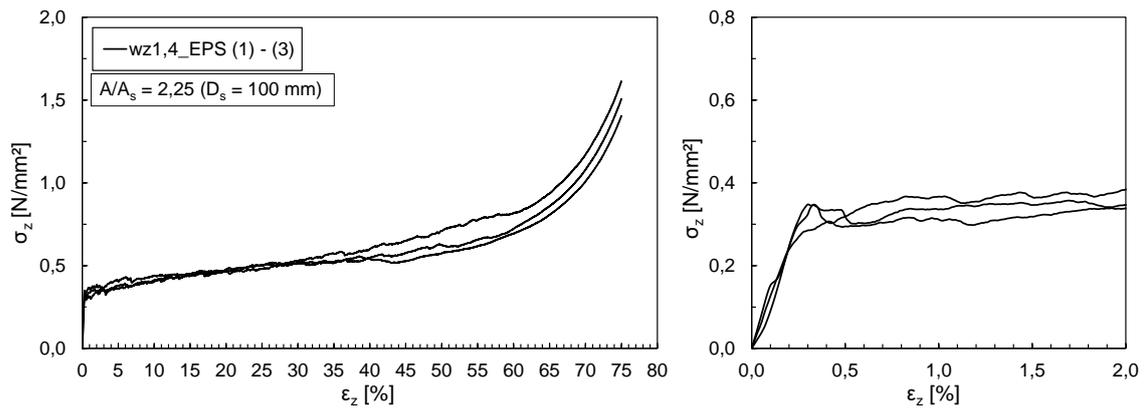


Abbildung A 17: Spannungs-Stauchungskurven von drei Zylinderproben ($h_0/D = 300$ mm / 150 mm) des Betons *wz1,4_EPS* unter Teilflächenbelastung ($A/A_s = 2,25$).

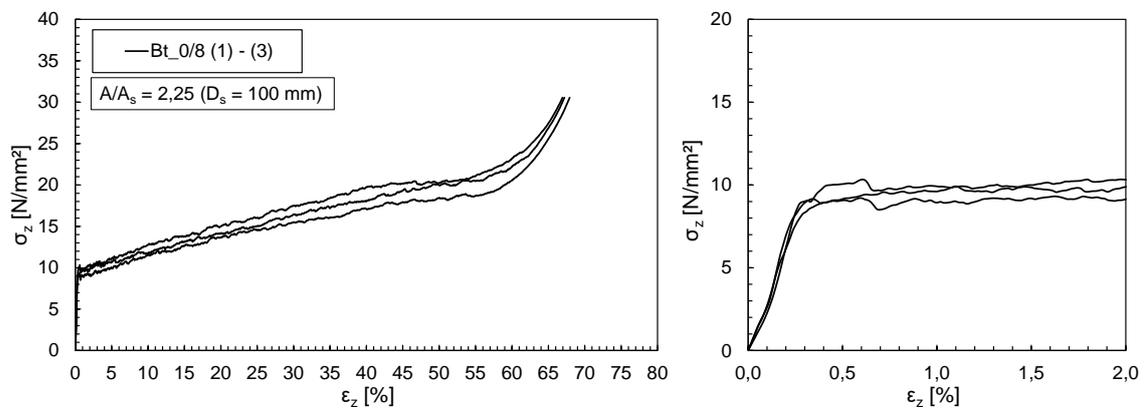


Abbildung A 18: Spannungs-Stauchungskurven von drei Zylinderproben ($h_0/D = 300$ mm / 150 mm) des Betons *Bt_0/8* unter Teilflächenbelastung ($A/A_s = 2,25$).

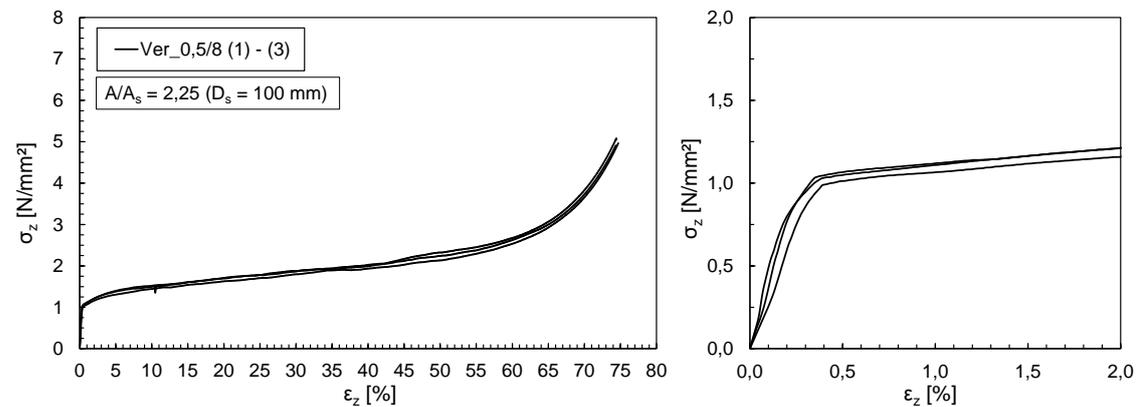


Abbildung A 19: Spannungs-Stauchungskurven von drei Zylinderproben ($h_0/D = 300$ mm / 150 mm) des Betons *Ver_0,5/8* unter Teilflächenbelastung ($A/A_s = 2,25$).

III. Variation des Lastflächenverhältnisses

In den nachfolgenden Abbildungen sind die in den Stauchversuchen ermittelten Einzelkurven des Betons B-Bg bei den verschiedenen Lastflächenverhältnissen dargestellt (Datengrundlage Abschnitt 7.7.3).

- Die Einzelkurven von sechs Zylinderproben ($h_0/D = 300 \text{ mm}/150 \text{ mm}$) des Betons B-Bg unter Teilflächenbelastung ($A/A_s = 2,25$) sind in Abbildung A 10 (Anhang D-II) dargestellt.

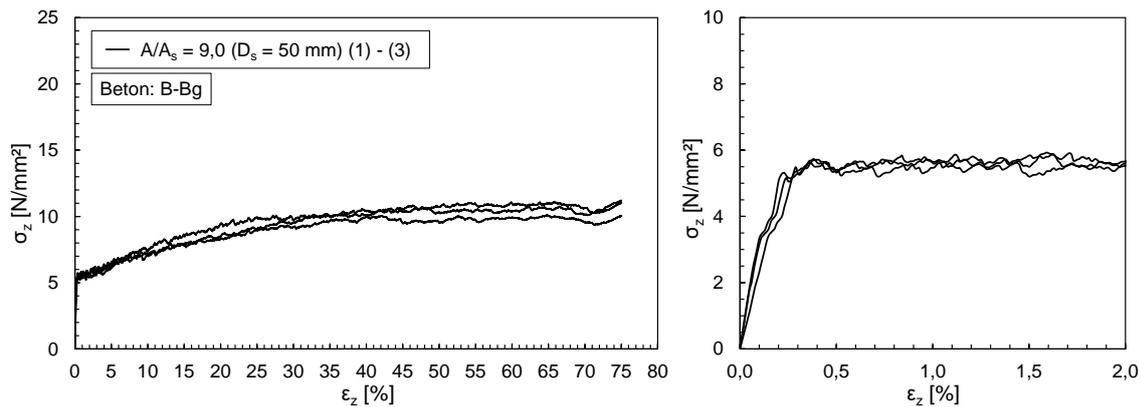


Abbildung A 20: Spannungs-Stauchungskurven von drei Zylinderproben ($h_0/D = 300 \text{ mm}/150 \text{ mm}$) des Betons B-Bg unter Teilflächenbelastung ($A/A_s = 9,0$).

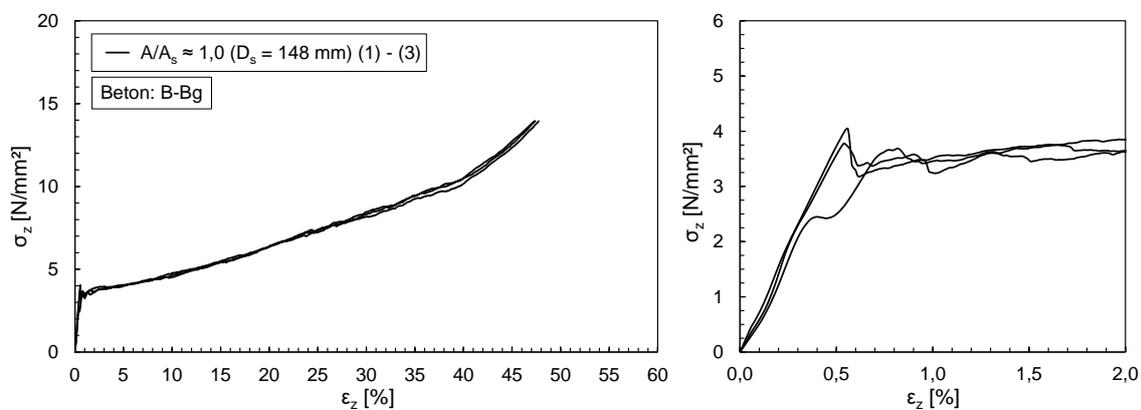


Abbildung A 21: Spannungs-Stauchungskurven von drei Zylinderproben ($h_0/D = 300 \text{ mm}/150 \text{ mm}$) des Betons B-Bg unter Vollflächenbelastung ($A/A_s \approx 1,0$).

Anhang E Bauteilpläne – Versuchsstand

Die Details des in Abschnitt 6.5 beschriebenen Versuchsstands können den nachfolgenden Abbildungen entnommen werden.

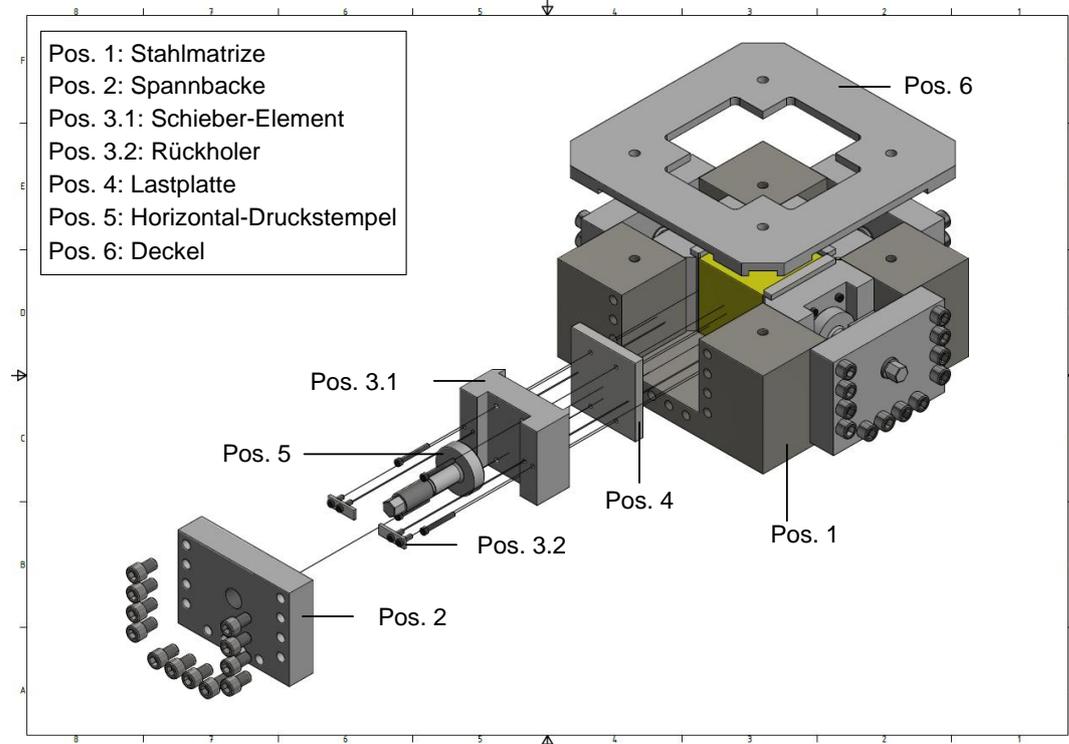


Abbildung A 22: 3D-Explosionsdarstellung des Versuchsstands für einachsige Druckversuche an Würfelpföben mit Querdehnungsbehinderung.

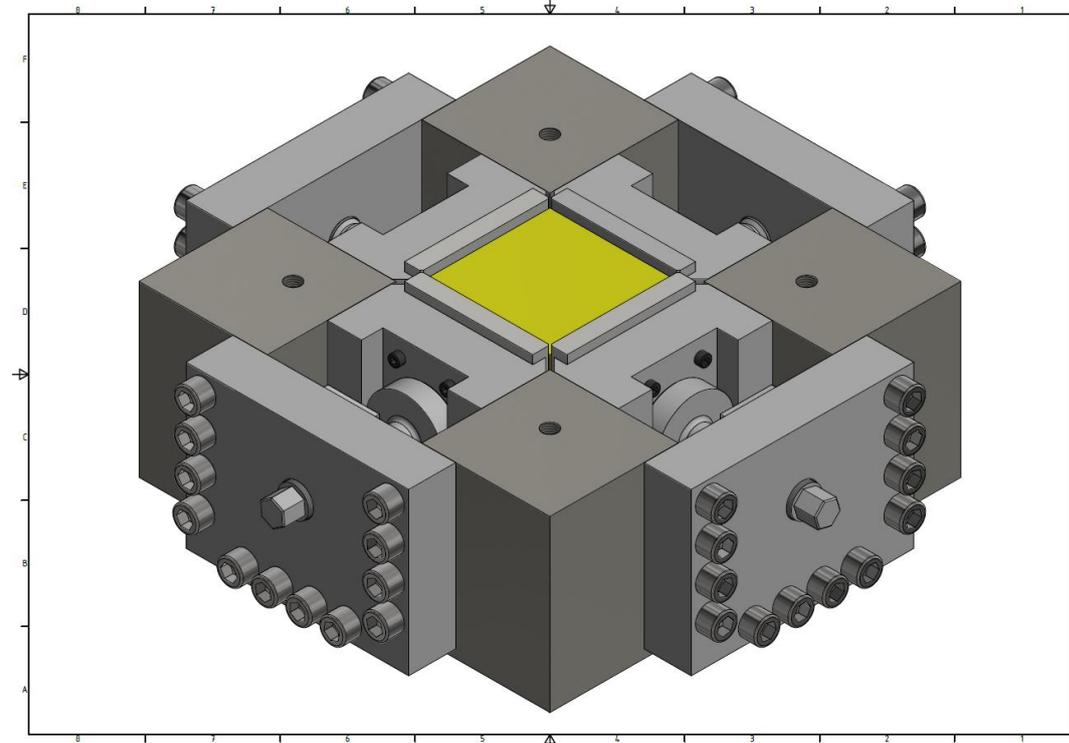


Abbildung A 23: 3D-Darstellung des Versuchsstands (ohne Deckel).

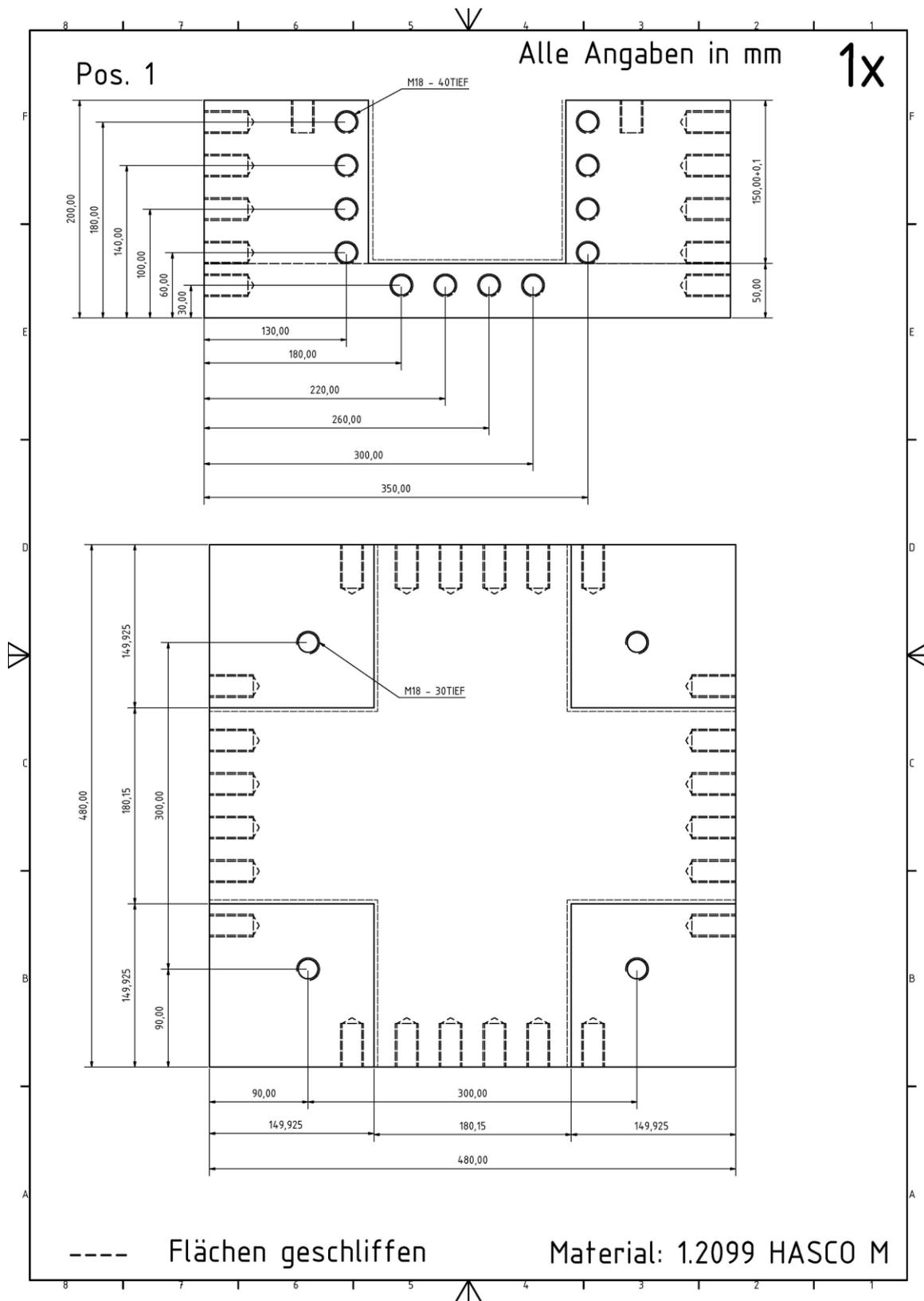


Abbildung A 24: Bauteilplan Pos. 1 (monolithische Stahlmatrize).

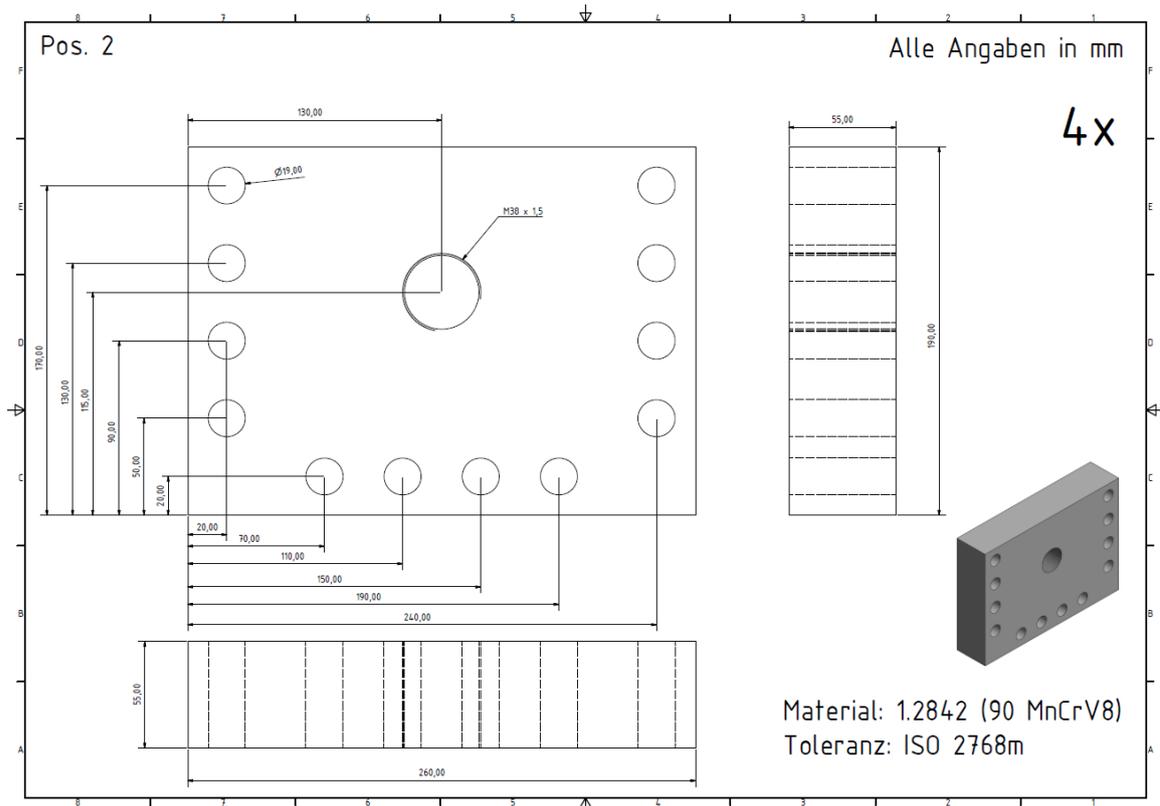


Abbildung A 25: Bauteilplan Pos. 2 (Spannbacke).

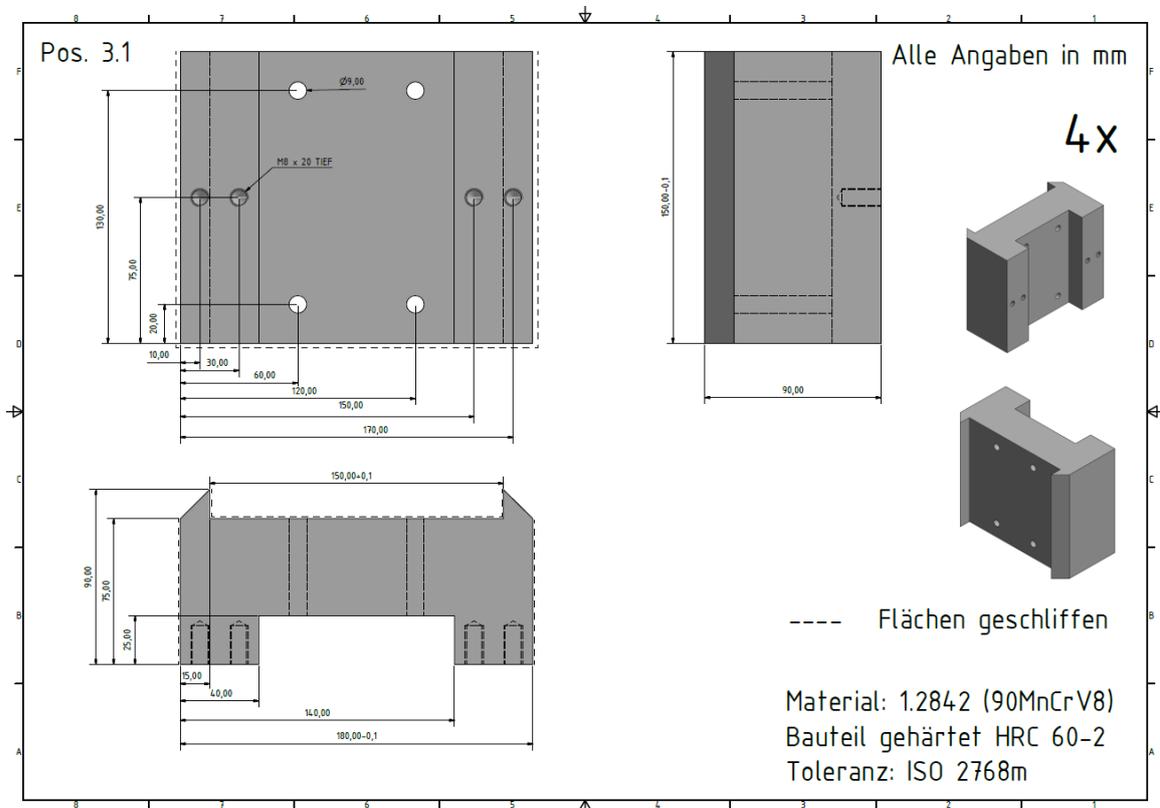


Abbildung A 26: Bauteilplan Pos. 3.1 (Schieber-Element).

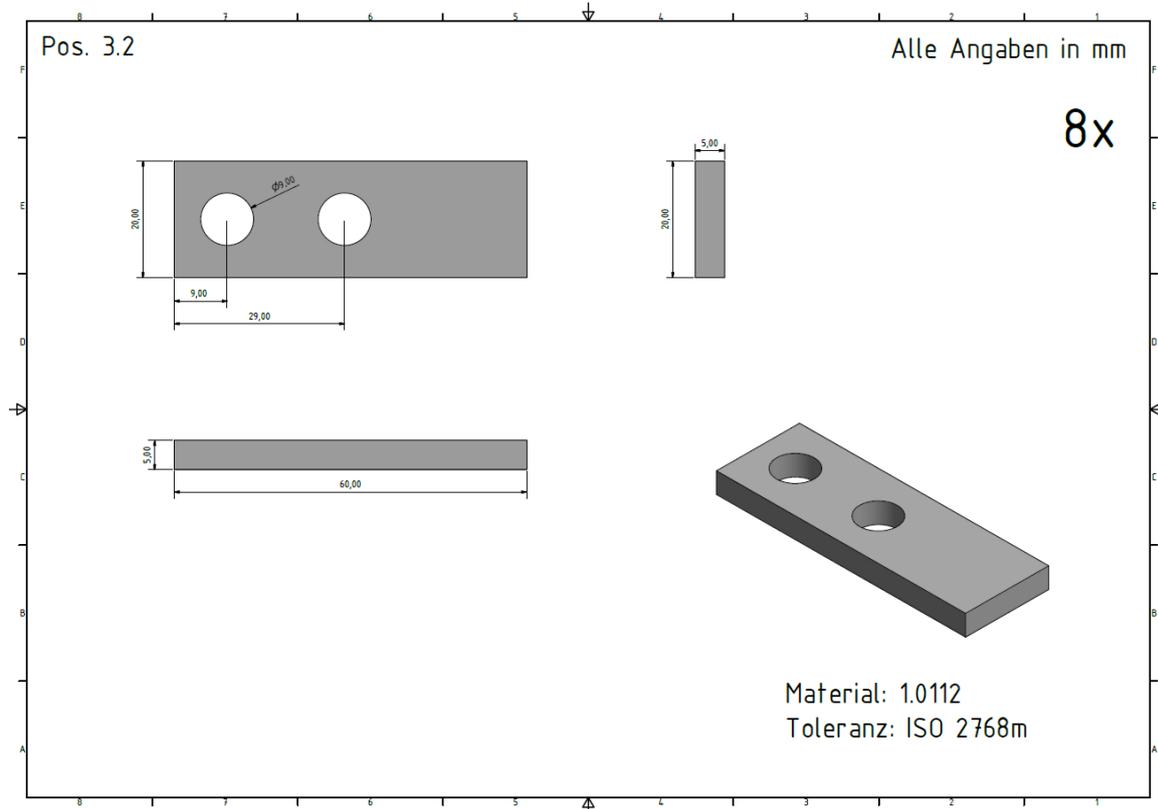


Abbildung A 27: Bauteilplan Pos. 3.2 (Rückholer).

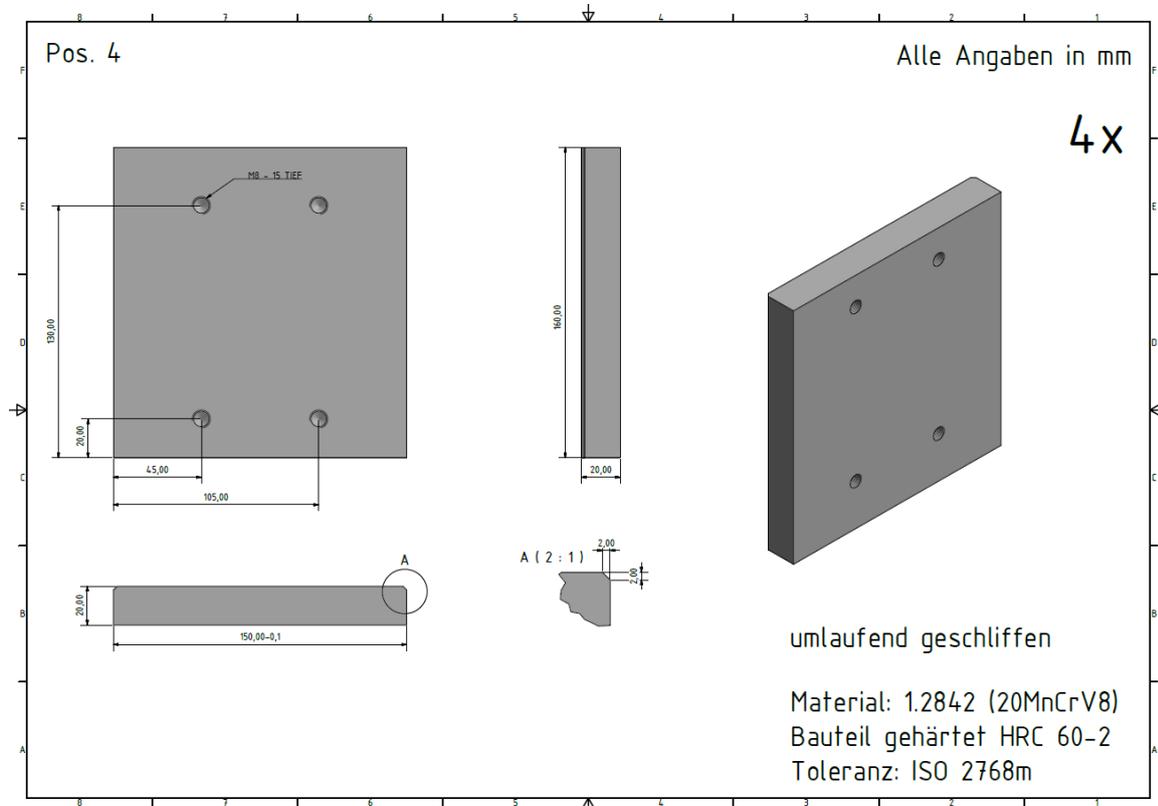


Abbildung A 28: Bauteilplan Pos. 4 (Lastplatte).

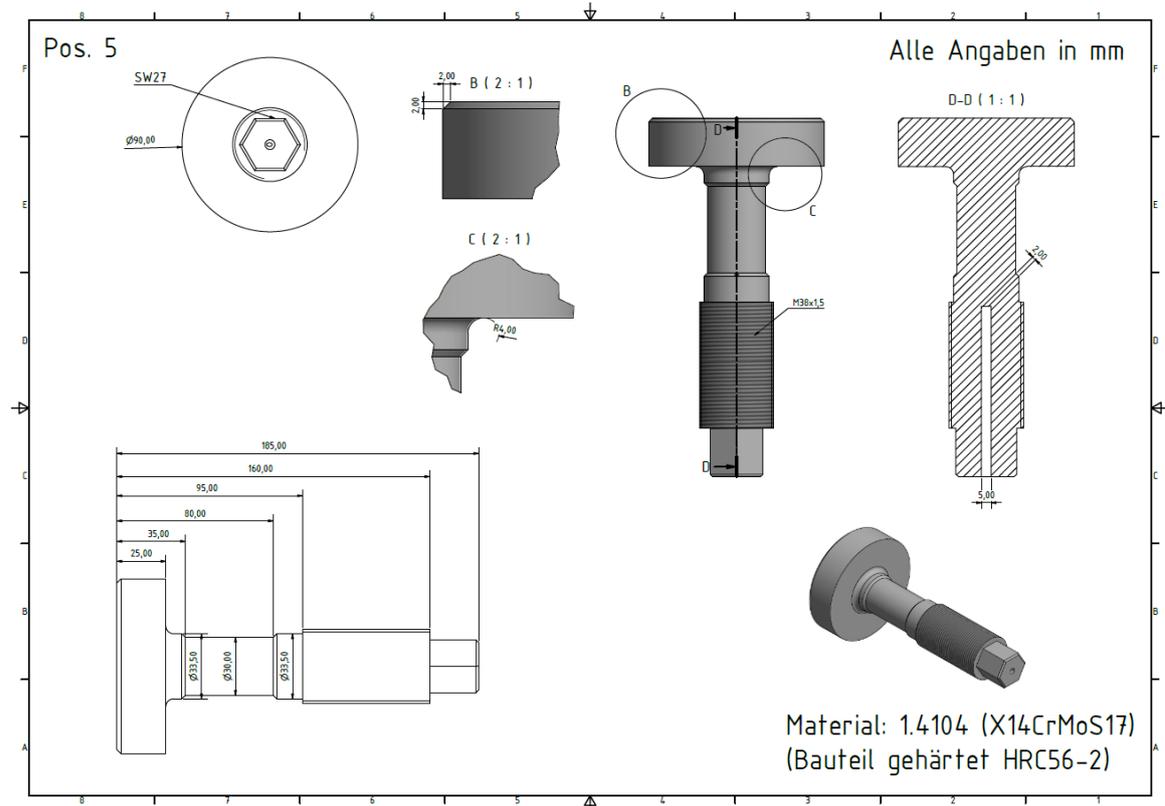


Abbildung A 29: Bauteilplan Pos. 5 (Horizontal-Druckstempel).

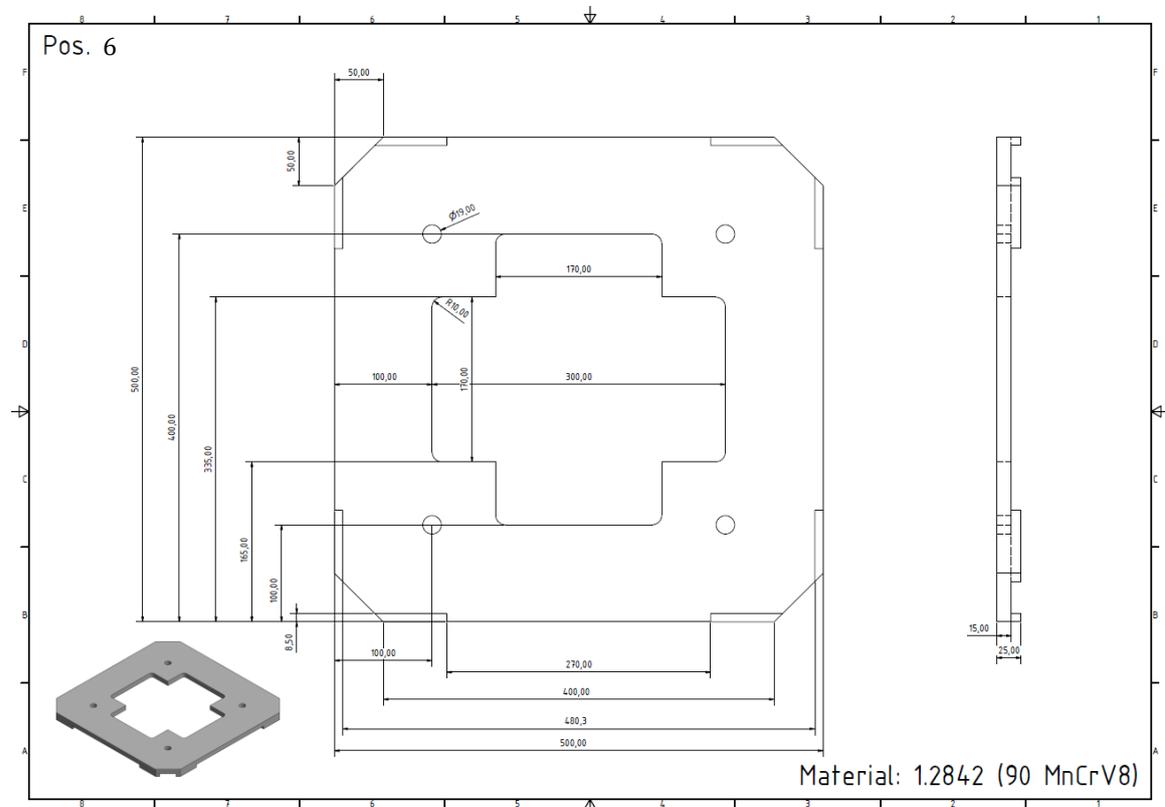


Abbildung A 30: Bauteilplan Pos. 6 (Deckel).

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name **Sven Plückelmann**
Geburtsdatum/-ort 27. Juni 1990 / Witten
Staatsangehörigkeit Deutsch

Berufserfahrung

seit 04/2024 **Stv. Prüfstellenleiter**
Materialprüfanstalt HARTL Deutschland GmbH,
Wendenweg 19, 44149 Dortmund

12/2015 – 03/2024 **Wissenschaftlicher Mitarbeiter**
Lehrstuhl für Baustofftechnik, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher,
Ruhr-Universität Bochum, 44801 Bochum

03/2014 – 11/2015 **Wissenschaftliche Hilfskraft**
Lehrstuhl für Baustofftechnik, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher,
Ruhr-Universität Bochum, 44801 Bochum

02/2013 – 02/2014 **Studentischer Mitarbeiter**
Architekturbüro Kriener, 58454 Witten

11/2011 – 01/2013 **Wissenschaftliche Hilfskraft**
Lehrstuhl für Statik und Dynamik, Prof. Dr. techn. Günther Meschke,
Ruhr-Universität Bochum, 44801 Bochum

Ausbildung

12/2015 – 03/2024 **Promotionsstudium**
Ruhr-Universität Bochum, 44801 Bochum
Promotionsthema „Experimentelle Untersuchungen zum Stauchverhalten
von stark porosiertem Beton und dessen Einzelkomponenten“

10/2013 – 11/2015 **Studium des Bauingenieurwesens (M.Sc.)**
Ruhr-Universität Bochum, 44801 Bochum
Masterarbeitsthema „Beulnachweise im Brückenbau am Beispiel der
Köln-Mülheimer Stahlhängebrücke“
Vertiefungsrichtung Konstruktiver Ingenieurbau

10/2009 – 11/2013 **Studium des Bauingenieurwesens (B.Sc.)**
Ruhr-Universität Bochum, 44801 Bochum
Bachelorarbeitsthema „Entwicklung eines Laser-Scan-Verfahrens zur
Bestimmung des Hohlraumgehaltes und der Oberflächentextur von offen-
porigen Straßenbetonen (COPS)“

08/2000 – 07/2009 **Abitur, Allgemeine Hochschulreife**
Albert-Martmöller-Gymnasium, 58452 Witten