

Diplomarbeit

Experimentelle Festigkeitsuntersuchungen von Ziegelsplittbeton

*ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads
Diplom-Ingenieur
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen*

Diploma Thesis

Experimental strength tests of brick aggregate concrete

*Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering*

von

Lars Bohling, BSc
Matr.Nr.: 11931694

Betreuung: Univ.-Prof. i.R. Dipl.-Ing. Dr. techn. **Andreas Kolbitsch**
Dipl.-Ing. Dr.techn. **Verena Sophia Hammerschmidt, BSc**
INSTITUT FÜR HOCHBAU, BAUDYNAMIK UND GEBÄUDETECHNIK
FORSCHUNGSBEREICH HOCHBAUKONSTRUKTION UND BAUWERKSERHALTUNG
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN,
KARLSPLATZ 13/208-2, 1040 WIEN, ÖSTERREICH

Wien, im Oktober 2023

Kurzfassung

Die Bevölkerung in Großstädten wie Wien wächst von Jahr zu Jahr und mit ihr der Bedarf an Wohnraum. Im innerstädtischen Bereich sind heutzutage die meisten Freiflächen bereits eng bebaut, sodass neuer Wohnraum nur schwer zu schaffen ist. Ein in Wien oft verfolgter Lösungsansatz ist die Aufstockung beziehungsweise der Ausbau von ungenutzten Dachgeschossen von Wohngebäuden.

Für Gebäude, die bis in die 1940er Jahre erbaut wurden, wird dies heute bereits oft umgesetzt und es liegt ein großer Erfahrungsschatz über die Bauweisen und heutigen (statischen) Möglichkeiten der Aufstockung dieser Gebäude vor. Anders sieht es hingegen bei den Nachkriegsbauten aus, bei denen damals oft neue Baumaterialien und Bauverfahren eingesetzt wurden. Diese wurden in der Nachkriegszeit oftmals in beschleunigten Verfahren entwickelt und zum Teil ohne einheitliche Regelungen in Normen zugelassen. Heute sind vergleichsweise wenig Informationen zu den charakteristischen Materialkennwerten der damaligen Baustoffe und -systeme vorhanden. Einer der damals entwickelten und im Wohnungsbau eingesetzten Baumaterialien ist der Vibrostein. Dabei handelt es sich um einen Ziegelsplittbeton-Hohlblockstein, dessen Gesteinskörnung aus dem Ziegelschutt der durch den Krieg zerstörten Häuser hergestellt wurde. Diese Mauersteine wurden in Wien in vielen Ausführungsarten gefertigt. Aufgrund von Schwankungen in der Zusammensetzung, der Korngröße des Ziegelsplitts, der Größe des Porenraums sowie der Art und Menge des Bindemittels des Ziegelsplittbetons weisen die Vibrosteine unterschiedliche Materialfestigkeiten auf. Heute sind außer der alten Zulassungen der Vibrosteine kaum Dokumentationen verfügbar. Für den Ausbau der damit errichteten Gebäude ist der Nachweis der Tragfähigkeit des Bestandsmauerwerks zwingend notwendig. Aus diesem Grund werden die Materialkennwerte des Mauerwerks benötigt, die durch experimentelle Versuchsreihen gewonnen werden können.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden aus sechs Vibrosteinen Kleinprüfkörper herausgeschnitten und das Materialverhalten des Ziegelsplittbetons untersucht. Dabei wurden insbesondere die Druck- und Biegezugfestigkeiten der Ziegelsplittbeton-Prüfkörper, in Anlehnung an die heute gültigen Normen für Mauersteine aus Beton, untersucht.

Die Ergebnisse dieser Versuche zeigen, dass der Ziegelsplittbeton, im Vergleich zu den damals angegebenen Werten, recht hohe Materialfestigkeiten aufweist. Auf Basis der Versuche an den Kleinprüfkörpern können weiterführende Untersuchungen angestellt werden, um von den charakteristischen Materialeigenschaften der Kleinprüfkörper auf die Mauersteinfestigkeit zu schließen und somit die Möglichkeit einer zerstörungssarmen Bestandsuntersuchung aufzuzeigen.

In einem umfangreichen Experiment soll erreicht werden, den Ziegelsplittbeton der hier untersuchten Vibrosteine zu reproduzieren. Zusätzlich wird in den Versuchen der Einfluss verschiedener Materialfaktoren und Parameter auf die Festigkeitseigenschaften von Ziegelsplittbeton untersucht. Hierzu werden alte Wiener Mauerziegel zu Ziegelsplitt gebrochen und daraus in mehreren Probereihen in verschiedenen Sieblinien und Zementanteilen Ziegelsplittbeton hergestellt. Dieser wird analog zu den Versuchen am Ziegelsplittbeton der Vibrosteine untersucht. Anhand der Ergebnisse und Erkenntnisse aus den Versuchsreihen wird neben einem tiefergehenden Verständnis über den Einfluss der Zusammensetzung auch eine Einschätzung über das Potential des Einsatzes von rezykliertem Ziegelsplitt bei neuen Baumaterialien gewonnen.

Abstract

The population in large cities like Vienna is growing from year to year and consequently the demand for housing. In inner-city areas, the vast majority of open spaces are already densely built up, making it difficult to create new living space. One solution often pursued in Vienna is to add storeys or convert unused attics of residential buildings.

For buildings built up until the 1940s, this is already often implemented today, and there is a wealth of experience about the construction methods and the current (static) possibilities of adding storeys to these buildings. The situation is different, however, with post-war buildings, in which new building materials and construction methods were often used at the time. These were often developed in accelerated procedures in the post-war period and were in some cases approved in standards without uniform regulations. Nowadays, comparatively little information is available about the characteristic material values of the building materials and systems of that time. One of the building materials developed at that time and used in residential construction is called “Vibrosteine”. This is a brick split concrete hollow block, the stone grain of which was made from the brick rubble of the houses destroyed by the war. These masonry blocks were manufactured in Vienna in a wide range of designs. Due to variations in composition, the grain size of the brick chippings, the size of the pore space as well as the type and quantity of the binding agent of the brick chippings, the “Vibrosteine” have different material strengths. Today, apart from the old approvals of the “Vibrosteine”, hardly any documentation is available. For the extension of buildings constructed with them, the proof of the load-bearing capacity of the existing masonry is absolutely necessary. For this reason, the material characteristics of the masonry are required, which can be obtained through experimental test series.

In the context of the present work, small test specimens were cut out of six “Vibrosteine”, and the material behaviour of the brick-split concrete was investigated. In particular, the compressive and flexural strengths of the brick-split concrete test specimens were investigated in accordance with the currently valid standards for concrete masonry units.

The results of these tests show that the brick-split concrete has quite elevated material strengths compared to the values given at that time. Based on the tests on the small test specimens, further investigations can be carried out in order to draw conclusions from the characteristic material properties of the small test specimens to the masonry block strength and therefore demonstrate the possibility of a low-destruction as-built examination.

In an extensive experiment, an attempt is made to reproduce the brick-split concrete of the “Vibrosteine” examined here. In addition, the influence of various material factors and parameters on the strength properties of brick chippings concrete is investigated in the tests. For this purpose, old Viennese masonry bricks are crushed into brick chippings and used to produce brick chippings concrete in several test series with different grading curves and cement proportions. This is examined analogously to the tests on the brick chippings of the “Vibrosteine”. On the basis of the results results and findings from the test series, in addition to a deeper understanding of the influence of the composition as well as an assessment of the potential of the use of recycled brick chippings in new building materials will be gained.

Inhalt

Kurzfassung	II
Abstract.....	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Variablenverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
1. Einleitung	2
1.1. Ausgangslage	2
1.2. Fragestellung und Ziele	2
1.3. Vorgehensweise der Versuche und Methodik	3
2. Theoretische Grundlagen	5
2.1. Historie der Vibrosteine	5
2.1.1. Ziegelsplittbeton	5
2.1.1.1. Ursprung.....	5
2.1.2. Ziegelsplittbeton-Hohlblocksteine (Vibrosteine)	6
2.1.2.1. Historischer Hintergrund	6
2.1.2.2. Entwicklungsgeschichte.....	7
2.1.2.3. Herstellung	7
2.1.2.4. Vorschriften und damalige Regelwerke in Österreich.....	9
2.1.2.5. Ziegelsplittbetonsteine in Deutschland	10
2.2. Heutige Verwendung.....	12
2.3. Normengrundlage	12
2.3.1. Vibrosteine - ÖNORM EN 771-3:2011 bis EN 771-05+A1:2015-08 und die Prüfverfahren der Normenreihe ÖNORM EN 772-1 bis 772-22.....	12
2.3.2. Moderner Recyclingbeton	14
3. Experimentelle Untersuchungen an Kleinprüfkörpern des Vibrosteins	16
3.1. Prüfkörpervorbereitung	16
3.1.1. Zustand der Probekörper	16
3.1.2. Prüfkörpervorbereitung.....	17
3.1.3. Visuelle Analyse der Mauersteine und Kleinprüfkörper nach dem Zuschnitt	18
3.2. Grundlegende Materialparameter	18
3.2.1. Form und Abmessungen	19
3.2.1.1. Vibrostein	19
3.2.1.2. Prüfkörper	19
3.2.2. Rohdichte des Ziegelsplittbetons.....	22
3.3. Wasseraufnahmekoeffizient	22
3.3.1. Ablauf des Versuchs.....	23
3.3.2. Visuelle Beobachtungen	23
3.3.3. Ergebnisse nach ÖNORM EN 772-11:2011 [19]	24
3.3.4. Ergebnisse nach ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [22].....	25
3.3.5. Vergleich und Bewertung der Ergebnisse	27
3.4. Druckfestigkeit.....	28
3.4.1. Unbeschädigte Prüfkörper	28
3.4.1.1. Bruchverhalten	29
3.4.1.2. Ergebnisse.....	31
3.4.2. Vorgeschädigte Prüfkörper	32
3.4.2.1. Bruchverhalten	32

3.4.2.2.	Ergebnisse.....	33
3.4.3.	Zusammenfassung	34
3.4.4.	Vergleich mit der Steindruckfestigkeit der Vibrosteine	34
3.5.	Elastizitätsmodul und Querdehnzahl	35
3.5.1.	Elastizitätsmodul.....	36
3.5.2.	Querdehnzahl	36
3.6.	Biegezugfestigkeit.....	37
3.6.1.	Unbeschädigte Prüfkörper	38
3.6.1.1.	Bruchverhalten	38
3.6.1.2.	Ergebnisse.....	38
3.6.2.	Vorgeschädigte Prüfkörper	39
3.6.2.1.	Bruchverhalten	39
3.6.2.2.	Ergebnisse.....	40
3.6.3.	Zusammenfassung	40
3.7.	Druckversuche mit Leichtmörtelfugen.....	40
3.7.1.	Prüfkörpervorbereitung.....	41
3.7.2.	Druckversuche	41
3.8.	Zusammenfassung der experimentellen Materialuntersuchungen.....	43
4.	Reproduktion des Ziegelsplittbetons.....	45
4.1.	Vergleich der Zusammensetzung verschiedener Ziegelsplittbetone	45
4.2.	Versuche zur Herstellung des Ziegelsplittbetons	46
4.2.1.	Serie 1	47
4.2.1.1.	Zusammensetzung, Sieblinie und Herstellung.....	47
4.2.1.2.	Optisches Ergebnis und Zuschnitt	49
4.2.1.3.	Druckfestigkeit.....	50
4.2.1.4.	Biegezugfestigkeit.....	51
4.2.1.5.	Zusammenfassung der Prüfergebnisse	52
4.2.2.	Serie 2	53
4.2.2.1.	Sieblinie und Zusammensetzung	53
4.2.2.2.	Druckfestigkeit.....	55
4.2.2.3.	Biegezugfestigkeit.....	56
4.2.2.4.	Zusammenfassung der Prüfergebnisse	57
4.2.3.	Serie 3	58
4.2.3.1.	Sieblinie und Zusammensetzung	58
4.2.3.2.	Druckfestigkeit.....	59
4.2.3.3.	Biegezugfestigkeit.....	60
4.2.3.4.	Zusammenfassung der Prüfergebnisse	61
4.2.4.	Serie 4	61
4.2.4.1.	Sieblinie und Zusammensetzung	61
4.2.4.2.	Druckfestigkeit.....	63
4.2.4.3.	Biegezugfestigkeit.....	64
4.3.	Ergebnisse und Erkenntnisse der Reproduktionsversuche	65
5.	Vergleich von altem und neuem Ziegelsplittbeton	67
5.1.	Materialgefüge	67
5.2.	Rohdichte	68
5.3.	Druck- und Biegezugfestigkeit.....	68
5.4.	Elastizitätsmodul und Querdehnzahl	69
6.	Zusammenfassung und Ausblick.....	70

7. Verzeichnisse	72
7.1. Literaturverzeichnis	72
7.2. Abbildungsverzeichnis	75
7.3. Tabellenverzeichnis	78
8. Anhang.....	81
A. Wasseraufnahme Serie 1.....	81
B. Wasseraufnahme Serie 2.....	90
C. Wasserabgabe	98
D. Probekörperdaten Vibrosteine Gesamtübersicht	105
D.1. Stein Nr. 11	105
D.2. Stein Nr. 16	107
D.3. Stein Nr. 71	109
D.4. Stein Nr. 72	111
D.5. Stein Nr. 74	113
D.6. Stein Nr. 75	114
D.7. Zusammenfassung Ergebnisse Vibrosteine	115
E. Biegezug Vibrosteine	116
E.1. Steine 11 und 16.....	116
E.2. Steine 71, 72, 74 und 75.....	117
F. Probekörperdaten reproduzierter Ziegelsplittbeton Gesamtübersicht	118
F.1. Schüttgewichte Korngrößen	118
F.2. Serie 1.....	119
F.2.1. Sieblinie.....	119
F.2.2. Druckfestigkeit	120
F.3. Serie 2.....	122
F.3.1. Sieblinie.....	122
F.3.2. Druckfestigkeit	123
F.4. Serie 3.....	126
F.4.1. Sieblinie.....	126
F.4.2. Druckfestigkeit	127
F.5. Serie 4.....	128
F.5.1. Sieblinie.....	128
F.5.2. Druckfestigkeit	129
G. Biegezugfestigkeit reproduzierter Ziegelsplittbeton.....	131
G.1. Probewürfel Serie 1 und 2	131
G.2. Probewürfel Serie 3 und 4	132

Variablenverzeichnis

L_i	[mm]	Länge
w_i	[mm]	Breite
h_i	[mm]	Höhe
u	[-]	Index Mauerstein
p	[-]	Index Prüfkörper
w	[-]	Index Prüfkörper würfelförmig
q	[-]	Index Prüfkörper quaderförmig
s	[-]	Index Prüfkörper stabförmig
$\rho_{g,p}$	[kg/m ³]	Brutto-Trockenrohdichte Prüfkörper
$m_{dry,p}$	[g]	Trockengewicht Prüfkörper
$V_{g,p}$	[mm ³]	Bruttovolumen Prüfkörper
$C_{w,p}$	[g/m ³ *s]	Wasseraufnahmekoeffizient nach ÖNORM EN 772-11:2011
W_w	[kg/m ² *√h]	Wasseraufnahmekoeffizient nach ÖNORM EN ISO 15148:2002
$\left. \begin{matrix} m_{so,p} \\ m_t \end{matrix} \right\}$	[g]	Masse Prüfkörper nach Eintauchen über die Zeit t
$\left. \begin{matrix} m_{dry,p} \\ m_i \end{matrix} \right\}$	[g]	Masse trockener Prüfkörper
A_p	[mm ²]	Eingetauchte Fläche des Prüfkörpers
$\left. \begin{matrix} t_{so} \\ t_f \end{matrix} \right\}$	[s]	Tauchzeit
$\Delta m'_t$	[kg/m ²]	Flächenbezogene Massenzunahme nach der Zeit t
$\Delta m'_0$	[kg/m ²]	Flächenbezogene Massenzunahme extrapoliert auf Zeitpunkt 0
f_{cm}	[N/mm ²]	mittlere Druckfestigkeit
f_{ck}	[N/mm ²]	Charakteristische Druckfestigkeit (5 % Quantil)
$f_{ct,fl}$	[N/mm ²]	Biegezugfestigkeit Kleinprüfkörper
E	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul
ν	[-]	Querdehnzahl
V_p	[kg/m ³]	Volumen Probewürfel
V_i	[%]	Volumenanteil Korngröße
$M_{p,i}$	{kg}	Masse Korngröße für Sieblinie
Q_p	[-]	Erhöhungsfaktor Schüttvolumen
$\rho_{sch,p,i}$	[kg/m ³]	Schüttdichte Korngrößengruppe i

Abkürzungsverzeichnis

VK	Variationskoeffizient
----	-----------------------

1. Einleitung

1.1. Ausgangslage

Die Bevölkerungszahl in Wien steigt von Jahr zu Jahr weiter an. Es besteht ein konstant wachsender Bedarf an Wohnraum, nicht nur in den Randlagen, sondern auch in den älteren zentralen Bezirken. Diese sind bereits sehr dicht bebaut, sodass kaum freie Bauflächen in den Bezirken vorhanden sind. In Wien ist es mittlerweile weit verbreitet, bestehende Wohngebäude aufzustocken, indem die alten und oftmals ungenutzten Dachräume ausgebaut oder erweitert werden. An deren Stelle entstehen häufig ein bis zwei weitere Geschosse mit mehreren neuen Wohnungen. Bislang wurde dies vor allem auf Wohnhäusern aus der Gründerzeit und den Vorkriegsjahren mit Baujahr bis Mitte der 1940er Jahre umgesetzt.

Die Dachgeschosse der Wiener Gemeindebauten aus den Jahren 1950 bis 1970 bieten das Potential von über 34.000 weiteren Wohnungen, die dort durch Dachgeschossausbauten und Aufstockungen entstehen könnten [1]. Diese Gebäude erreichen mittlerweile ein Alter, in dem sie umfassend saniert und umgebaut werden. In diesem Zusammenhang kommt auch das Thema der Dachgeschossausbauten und die Schaffung von neuem Wohnraum auf bestehenden Gebäuden zum Tragen. Wohngebäude wurden in Österreich bis in die ersten Kriegsjahre des Zweiten Weltkrieges fast ausschließlich in klassischer Ziegelbauweise errichtet. Im Zuge des Wiederaufbaus wurden in Wien und Österreich neue Bauweisen und Baumaterialien erprobt, zugelassen und für den Bau neuer Wohngebäude eingesetzt. In vielen davon wurden Betonhohlblocksteine aus Ziegelsplittbeton, in Wien auch Vibrosteine genannt, eingesetzt. Im Gegensatz zum alten Ziegelmauerwerk sind für die neuen Bauweisen der Nachkriegsjahre kaum Materialkennwerte bekannt. Eine Nachrechnung der Gebäude, um die statischen Tragreserven zu ermitteln, ist ohne bekannte Materialkennwerte und den tatsächlichen Materialfestigkeiten nur mit großem Aufwand möglich. Erschwerend kommt hinzu, dass die Vibrosteine in Österreich nicht genormt waren und dementsprechend viele unterschiedliche Formen und Zusammensetzungen existieren.

Bei jedem Bestandsgebäude müssen umfangreiche Materialuntersuchungen durchgeführt werden, um die Materialkennwerte für den Nachweis der Tragfähigkeit des Gebäudes zu ermitteln. Um die Grundlage für weitere Materialuntersuchungen und Vergleichswerte zu schaffen, werden am Forschungsbereich für Hochbau und Gebäudeerhaltung (TU Wien) zusätzlich zu der vorliegenden Arbeit weitere Materialuntersuchungen durchgeführt. Diese umfassen hauptsächlich experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Materialkennwerte des Vibrosteins sowie weiterführende numerische Berechnungen. Zusätzlich werden die Zusammenhänge zwischen den Messwerten der Kleinprüfkörper und der Vibrosteine untersucht.

1.2. Fragestellung und Ziele

In dieser Diplomarbeit wird das Materialverhalten von porigem Ziegelsplittbeton untersucht und im Rahmen einer Literaturrecherche ein Überblick über die geschichtlichen Hintergründe, die Herstellung und die Einsatzzwecke von Ziegelsplittbeton in Österreich und Deutschland gewonnen. Die Materialuntersuchungen gliedern sich in drei Teilbereiche. Der erste Teil befasst sich mit dem Ziegelsplittbeton der in den Nachkriegsjahren hergestellten Vibrosteine (Betonhohlblocksteine aus Ziegelsplittbeton) unter Druck- und Biegezugwirkungen. Dabei sollen die charakteristische und die mittlere Druckfestigkeit sowie die Biegezugfestigkeit des Ziegelsplittbetons der Vibrosteine ermittelt werden. Hierzu werden Versuche an aus den Vibrosteinen entnommenen Kleinprüfkörpern durchgeführt und damit die reinen Materialparameter des Ziegelsplittbetons bestimmt. Versuche an ganzen Steinen zur Steindruckfestigkeit sind nicht Teil dieser Laborversuche. Die aus dem Forschungsprojekt [2] zur Verfügung gestellten Steindruckfestigkeiten werden bei den Ergebnissen der Druckfestigkeit mit herangezogen, um das Verhältnis zwischen der Druckfestigkeit der Kleinprüfkörper

und der Steindruckfestigkeit zu bestimmen. Zusätzlich werden im Rahmen der Druckfestigkeitsprüfungen der Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl des Ziegelsplittbetons mitbestimmt. Neben den Untersuchungen und Versuchen an dem Ziegelsplittbeton von unbeschädigten Vibrosteinen, werden in dieser Arbeit auch Prüfkörper von durch Steindruckversuchen vorgeschädigten Vibrosteinen untersucht. Mit den Untersuchungen soll die Resttragfähigkeit dieser vorgeschädigten Mauersteine beurteilt werden.

Alle Materialuntersuchungen in diesem Teil erfolgen an Ziegelsplittbeton aus den Nachkriegsjahren und sollen zur Beurteilung der Tragfähigkeit der Vibrosteine genutzt werden. Daher werden die Versuche, in Anlehnung an die heute gültigen ÖNORMEN, realitätsnah unter Raumluftbedingungen im Labor durchgeführt.

Im zweiten Teil der Arbeit wird das Materialverhalten bei Wasserkontakt bezüglich der Wasseraufnahme und der Einfluss von Mörtelfugen auf die Festigkeit im Mauerwerksverband mit Leichtmörtel untersucht. Dieser Teil hat einen eher informativen Anspruch und gilt der Betrachtung des Zusammenspiels von Ziegelsplittbeton und Leichtmörtel unter Druckbelastung.

Der dritte und abschließende Teil geht der Frage nach, welche Einflüsse die Sieblinien, die Kornzusammensetzungen und der Zementanteil auf die Druck- und Biegezeigeneigenschaften des Ziegelsplittbetons haben. Hierfür wird Ziegelsplittbeton in verschiedenen Zusammensetzungen gemischt und damit neue Probekörper hergestellt. Mit den daraus herausgeschnittenen Prüfkörpern werden anschließend die Druck- und Biegezugfestigkeit sowie der Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl bestimmt. Ziel ist es, der Materialzusammensetzung der untersuchten Vibrosteine auf experimentellem Wege so nahe wie möglich zu kommen und ähnliche Festigkeitswerte zu erhalten. Die genauen Mischungsverhältnisse der Originalsteine sind nicht bekannt.

1.3. Vorgehensweise der Versuche und Methodik

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden experimentelle Laboruntersuchungen zur Bestimmung der Festigkeitseigenschaften des Ziegelsplittbetons durchgeführt. Einleitend dazu wird in Kapitel 2 „*Theoretische Grundlagen*“ eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt, um einen Einstieg in die Historie des Ziegelsplittbetons und die Entwicklung der Vibrosteine zu erhalten. Zudem werden die für die Versuche wichtigen und heute gültigen Normen untersucht. Darauf aufbauend erfolgen anschließend die Prüfkörpervorbereitung und die Versuchsdurchführung.

Alle Prüfungen für diese Arbeit finden an Kleinprüfkörpern statt, welche aus mehreren Vibrosteinen herausgeschnitten wurden. Die Mauersteine wurden aus dem übergeordneten Forschungsprojekt der Wiener Magistratsabteilung 39 (MA 39) und dem Forschungsbereich Hochbau und Gebäudeerhaltung der TU Wien zur Verfügung gestellt. Durch das Herausschneiden von Kleinprüfkörpern aus mehreren Mauersteinen wird die in den Normen geforderte Mindestprobenzahl erreicht, sodass alle Laborversuche reproduzierbar durchgeführt und die Ergebnisse validiert werden können. Neben den eigenen Messwerten und den Messwerten aus dem Forschungsprojekt gibt es keine weiteren bekannten Materialkennwerte des Ziegelsplittbetons der vorliegenden Vibrosteinserie.

Die Kleinprüfkörper weisen drei verschiedene Abmessungen auf, die an die Anforderungen der jeweiligen Versuche angepasst sind. Bedingt durch die Form der Vibrosteine eignen sich nur Teilbereiche für die Entnahme von Kleinprüfkörpern. Durch diesen Umstand sind die Dimensionen der Prüfkörper begrenzt und es können nicht alle Anforderungen der Normen bezüglich der Abmessungen eingehalten werden. Es wird darauf geachtet, dass alle Prüfkörper durch die Vorbereitungen unbeschädigt und für das Material repräsentativ sind und keine natürlichen Außenkanten der Vibrosteine aufweisen. Außer des Zuschnitts auf einheitliche Prüfkörpermaße werden die Proben nicht weiter bearbeitet oder verändert. Die Vorgehensweise für die Laborversuche orientiert sich jeweils

eng an den zugehörigen aktuellen ÖNORMEN. Im Rahmen der Versuchsvorbereitungen werden alle verwendeten Prüfkörper genau vermessen und gewogen und die Ergebnisse notiert. Anschließend wird mit den Versuchen begonnen.

Kapillare Wasseraufnahme: Der Versuch der kapillaren Wasseraufnahme ist der zeitlich aufwendigste der Materialprüfungen am Ziegelsplittbeton und erstreckt sich über einen Zeitraum von bis zu 96 Stunden. Die Prüfkörper werden dabei einzeln etwa 5 mm tief in ein Wasserbad gestellt und in einem festen Zeitraster entnommen und gewogen. Auf diese Weise lässt sich in der Auswertung der Verlauf der Wasseraufnahme graphisch darstellen, detailliert auswerten und der Wasseraufnahmekoeffizient bestimmen.

Druckfestigkeit: Die Druckfestigkeitsprüfung erfolgt auf einer hydraulischen Prüfmaschine. Auf dieser werden die quaderförmigen Prüfkörper einzeln nacheinander geprüft. Die Prüfung wird so lange fortgesetzt, bis ein Druckversagen im Prüfkörper auftritt und die Last um einen festgelegten Anteil einbricht. Dabei werden von der Prüfmaschine die aufgebrachte Prüflast und der zurückgelegte Weg aufgezeichnet. Zusätzlich werden die Prüfkörper mit Messpunkten beklebt. Mithilfe einer Kamera und eines Prüfprogramms kann die genaue Verformung der Prüfkörper bestimmt werden. Damit lassen sich zusammen mit der aufgebrachten Prüflast der Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl des Ziegelsplittbetons bestimmen.

Biegezug: Der Biegezug wird im Labor ebenfalls mit einer Prüfmaschine gemessen. Dazu wird ein 3-Punkt-Biegezugversuch durchgeführt. Die Prüfkörper für die Biegezugprüfung werden auf zwei runde Auflager gelegt und mittig über ein Rollenlager mit einer konstant steigenden Last bis zum Bruch belastet. Dabei werden die aufgebrachte Prüflast und die Verformung des Probekörpers von der Prüfmaschine aufgezeichnet und später ausgewertet.

Druckversagen Mörtelfuge: Für diesen Versuch werden die würfelförmigen Prüfkörper zusammen mit einer Mörtelfuge aus Leichtmörtel miteinander „vermauert“. Der dabei verwendete Leichtmörtel weist ähnliche Festigkeitseigenschaften wie die damals verwendeten Kalk-Zementmörtel auf. Ziel der Versuche ist es, eine Einschätzung zum Einfluss der Mörtelfuge auf das Gesamttragverhalten des Ziegelsplittbetons zu erhalten. Die Mörtelfugen werden dazu in zwei unterschiedlichen Stärken hergestellt. Für jede Mörtelfugenstärke werden 6 Proben angefertigt und analog zum Vorgehen der Druckfestigkeitsprüfung in der Prüfmaschine geprüft.

Herstellung Ziegelsplittbeton: Ziel ist es, einen dem vorliegenden Ziegelsplittbeton der Vibrosteine ähnlichen Beton herzustellen. Dies geschieht auf experimentellem Wege, da die genaue Zusammensetzung des Ziegelsplittbetons nicht bekannt ist. Im Zuge der Versuche werden verschiedene Parameter in den Mischungen variiert, um die Auswirkungen auf die Festigkeitseigenschaften zu untersuchen.

Die Herstellung der Ziegelsplittbetonproben erfolgt dabei in vier Schritten. Zuerst werden alte Mauerziegel von Mörtelresten befreit und mit einem Backenbrecher gebrochen. Der Ziegelbruch wird anschließend gesiebt und nach Korngrößen getrennt gelagert. Für jede Probenserie wird eine andere, zuvor festgelegte Sieblinie verwendet. Diese werden entsprechend ihrer geplanten Zusammensetzung abgewogen und mit Anmachwasser vermischt und so befeuchtet. Anschließend wird der Zementleim angemischt und zu dem befeuchteten Ziegelsplitt hinzugegeben. Dieser Beton wird gut vermischt, in Probekörperformen gefüllt und auf einem Vibrationstisch verdichtet. Die Probewürfel werden nach 24 Stunden ausgeschalt und anschließend 7 Tage unter einem feuchten Tuch gelagert. Danach werden die Probewürfel bei Raumluftbedingungen bis zum Erreichen der Prüffestigkeit nach 28 Tagen gelagert. Die Probewürfel werden für die Druck- und Biegezugprüfungen zugeschnitten und nach dem Trocknen auf Druck- bzw. Biegezugfestigkeit nach dem oben dargestellten Ablauf geprüft.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Historie der Vibrosteine

Das Recycling von alten Baustoffen zur Herstellung neuer Materialien ist keine Idee der Neu- oder Nachkriegszeit. Es ist ein Ansatz, welcher in der Geschichte des Betons immer wieder aufgegriffen und aus unterschiedlichen Beweggründen für eine gewisse Zeit verfolgt wurde.

2.1.1. Ziegelsplittbeton

2.1.1.1. Ursprung

Die Idee, Ziegelbruch oder Ziegelsplitt als Zuschlagskörnung in Beton zu verwenden, ist in etwa so alt wie der Beton selbst - über 2.000 Jahre. Bereits die Römer verwendeten bei der Herstellung ihrer teils monumentalen Bauwerke neben verschiedenen natürlichen Gesteinen oft Ziegelbruch und Ziegelmehl als Zuschlagsstoffe für ihren „Beton“, den Opus Caementitium. Die Römer nutzten hierfür bevorzugt Material, welches in den Regionen vorhanden und oft nicht anders eingesetzt werden konnte oder Reste aus der Ziegelherstellung oder Bearbeitung von Naturstein. Somit kann man sagen, dass bereits im alten Rom Recycling- und Ziegelsplittbeton verwendet wurden. Bemerkenswert ist, dass bei Materialproben sowohl die Kornzusammensetzung und die Druckfestigkeit mit den heutigen Bauvorschriften vergleichbar sind [3].



Abbildung 1: Materialproben von Römischen Beton, unter anderem mit Ziegelbruchzuschlag; Quelle: [41]

Nach dem Ende des Römischen Reiches verschwand neben dem Opus Caementicium auch der Ziegelsplitt als Baumaterial wieder von der Bildfläche. Anders als der Beton, welcher um 1700 wiederentdeckt und während des 18. und 19. Jahrhunderts weiterentwickelt und immer häufiger eingesetzt wurde [4], kam Ziegelsplitt erst in den Nachkriegsjahren des Zweiten Weltkrieges als Material und Zuschlagsstoff im Betonbau wieder zur Anwendung. Dieses Mal war die Idee mehr aus der Not heraus geboren, da nach dem Krieg viel Wohnraum neu geschaffen werden musste, es jedoch an Baumaterial mangelte. Aus diesem Grund wurde aus den Kriegstrümmern Ziegelsplitt für die Baustoffindustrie gewonnen. Durch die Zugabe von Zement konnten daraus porige Hohlblockbetonsteine hergestellt werden, welche vor allem im Wohnungsbau in Mittel- und Westeuropa Verwendung fanden (siehe detailliert in Kapitel 2.1.2).

2.1.2. Ziegelsplittbeton-Hohlblocksteine (Vibrosteine)

Im Folgenden wird die Entwicklung, Herkunft und Herstellung von Hohlblocksteinen aus Ziegelsplittbeton, auch Vibrosteine genannt, näher erläutert. Hierbei liegt der Fokus der Betrachtung vor allem auf dem deutschsprachigen Raum und den Entwicklungen in Wien. Daneben sind auch in anderen Ländern wie Schweden, den Niederlanden und der Schweiz ähnliche Systeme und Verfahren entwickelt und eingesetzt worden. [5]

2.1.2.1. Historischer Hintergrund



Abbildung 2: Zerstörung in Wien nach dem Zweiten Weltkrieg. Hier in der Inneren Stadt Nähe Neuer Markt; Quelle: [5]

In den letzten Monaten des Zweiten Weltkrieges wurde auch Wien schwer getroffen. Große Teile Wiens wurden dabei zerstört und mit Trümmern übersät. Bei den insgesamt 52 Luftangriffen sowie den daran anschließenden Bodenkämpfen in der Schlacht um Wien wurden zwischen April 1944 und März 1945 etwa 21 % der Gebäude in Wien zerstört oder beschädigt. Fast 87.000 Wohnungen waren in der Folge nicht mehr bewohnbar, etwa 37.000 davon waren vollständig zerstört. Hinzu kamen ca. 70.000 Wohnungen mit kleineren Schäden. Außerdem entstanden große Schäden an der Infrastruktur und den Industrieanlagen. Wien war dadurch gleich einer Reihe gravierender Herausforderungen ausgesetzt. Es fehlten viele Wohnungen, es gab in der ganzen Stadt riesige Schuttberge (geschätzt ca. 7 Mio. m³, davon etwa 850.000 m³ auf öffentlichen Straßen und Plätzen [6]). Die Industrie war zudem durch schwere Kriegsschäden fast vollständig zum Erliegen gekommen, was den bevorstehenden Aufbau in der Anfangsphase erheblich erschwerte. Allein die Baustoffindustrie hatte durchschnittlich 46 % ihrer Kapazitäten eingebüßt und musste erst wieder in Gang gebracht werden, bevor der Wiederaufbau Wiens richtig anlaufen konnte [7], [8].

Die ersten Jahre des Wiederaufbaus waren geprägt durch den Mangel an Bau- und Rohstoffen, Kohle, Arbeitskräften, Werkzeugen und Maschinen. Diese scheinbar unüberbrückbaren Hindernisse erschwerten die Wiederaufnahme der (Baustoff-)Industrie erheblich. Es galt daher, die verfügbaren Ressourcen möglichst effizient und optimal einzusetzen. Insbesondere Kohle als Brennstoff war ein knappes, aber sehr gefragtes Gut. In dieser Zeit lag der Fokus vor allem auf drei Themen: die Räumung der Straßen, die Instandsetzung der wichtigen Infrastrukturen (vor allem Trink- und Abwasserversorgung als Seuchenschutz) und das Reparieren der nur leicht beschädigten Wohnungen. In diesen Bereichen konnten mit überschaubarem Aufwand schnelle Erfolge erzielt werden. Aus dem nicht mehr umgesetzten Vorhaben Wien zu einer Festung ausbauen zu wollen, waren in der Stadt große Mengen an Baumaterial, vor allem Zement und Ziegel, vorhanden. Aus diesen Vorräten konnte in den ersten Monaten nach der Eroberung Wiens gezehrt werden. Die Materialien wurden insbesondere bei der Instandsetzung der Ver- und Entsorgungseinrichtungen (wie Leitungs- und Kanalnetze), der Gas-, Elektrizitäts- und Wasserwerke und im zivilen Sektor in der lebenswichtigen

Industrie eingesetzt. Auch leichte Schäden an privaten Wohnungen konnten damit ausgebessert werden. Allerdings waren diese Baustoffvorräte bereits Anfang 1946 vollständig aufgebraucht. Bedingt durch den Mangel an Rohstoffen, Kohle, Transportmitteln und Arbeitskräften war die Erzeugung neuer Baumaterialien schwierig. Es musste genau geplant werden, wie insbesondere die vorhandene Kohle möglichst effektiv eingesetzt werden konnte [9].

Daher wurden neue Methoden gesucht, um die Vielzahl der Probleme bei der Baustoffbeschaffung und -erzeugung zu lösen. Ein vielversprechender und intensiv verfolgter Ansatz in dieser Zeit war das Recycling und Wiederverwenden von vorhandenem Kriegsschutt. Die Umsetzung erfolgte dabei hauptsächlich auf zwei Arten: einerseits das Separieren von ganzen Ziegeln aus den Schuttbergen für die neuerliche Verwendung in der Sanierung oder beim Neubau von Gebäuden, andererseits das Aufbereiten von Ziegelschutt zu neuen Baumaterialien. Im Folgenden wird die Aufbereitung näher betrachtet [10].

2.1.2.2. Entwicklungsgeschichte

Bereits in den Jahren vor dem Zweiten Weltkrieg war die Verwendung von Betonhohlblocksteinen in weiten Teilen Europas eine gängige Bauweise. In Österreich wurde dieser modernen Bauweise bis zu diesem Zeitpunkt kaum Aufmerksamkeit geschenkt. Bis dahin wurden die Wände fast ausschließlich als massives Vollziegelmauerwerk hergestellt. Bereits 1943 wurden in Deutschland die DIN 4152:1943-03 bis DIN 4154:1943-03 veröffentlicht, welche Hohlblocksteine aus Bimsbeton (poriger Leichtbeton) für Mauerwerke regelte. Angeregt durch den Grazer Stadtbauinspektor Dipl.-Ing. Hans Ebner wurden ab 1946 zahlreiche Untersuchungen angestellt, um eine solche Bauweise auch in Österreich, insbesondere in den stark kriegsgeschädigten Gebieten, für den Wiederaufbau einsetzen zu können. Durchgeführt wurden die Versuche und Untersuchungen im Materialprüfamt der Technischen Hochschule Graz und in den Versuchsanstalten am Technologischen Gewerbemuseum in Wien. Dabei wurde in den Hohlblocksteinen als Zuschlagsstoff Ziegelsplitt statt Bimsstein verwendet. In den Jahren vor dem Krieg waren in Europa verschiedene Systeme von derartigen porigen Leichtblocksteinen entwickelt worden. Nach dem Krieg wurden sie vielfach weiterentwickelt und die Zuschläge (vormals Sand und Kies oder Bimsstein) durch Ziegelsplitt ersetzt. Im Wiener Raum setzten sich dabei vor allem die Mauersteine auf Grundlage der deutschen DIN 4152:1943 und des schwedischen Patents der Vibro-Blocksteine nach Ing. Lindemann durch. Auf Grundlage dieser Mauersteine wurde in den Nachkriegsjahren eine Vielzahl an Vibrosteinen entwickelt und hergestellt, die, alle auf demselben Grundprinzip basieren, sich jedoch in Form, Abmessung und Hohlraumanteil unterscheiden.

Ein großer Vorteil war der deutlich geringere Bedarf an Kohle für die Herstellung dieser Mauersteine im Vergleich zur Fertigung klassischer Ziegel. Für die Herstellung des Zements für die Betonsteine wurde nur etwa 25 bis 50 % an Brennmaterial benötigt wie für dieselbe Menge an Ziegelmauerwerk. Darin sind die dünneren Wände noch nicht berücksichtigt. Zudem boten die neuen Mauersteine einen erheblich besseren Wärmeschutz als eine Vollziegelmauer bei gleichzeitig deutlich dünneren Mauern, was weitere Vorteile mit sich brachte. Außerdem war es möglich, mit überschaubarem Maschinen- und Platzbedarf die Mauersteine direkt in den Bezirken herzustellen und somit viele Materialtransporte zu sparen [10], [11].

2.1.2.3. Herstellung

Der Herstellungsprozess der Vibrosteine gliederte sich in zwei aufeinander aufbauende Arbeitsschritte, der Schuttverwertung und Aufbereitung zu Ziegelsplitt sowie daran anschließend die Herstellung der Vibrosteine. Verwendet wurde dafür ein Teil des Ziegelschutts der zerstörten Gebäude im Wiener Stadtgebiet.

Schuttverwertung: Zuerst musste der vorhandene Kriegsschutt zu den Sammelplätzen transportiert und aufbereitet werden. Bereits vor dem Verladen wurden in der Regel die obersten Schichten der Trümmerhaufen händisch nach ganzen und wiederverwertbaren Ziegeln abgesucht. Die so aussortierten Mauerziegel wurden auf verborgene Schäden (durch die Einwirkung von Feuer, Wasser oder der Lagerung im Freien) beprobt, gereinigt und anschließend vor Ort wiederverwendet. Der übrige Schutt wurde in Wien vor allem auf Bahnwaggons verladen und zu zentralen Sammel- und Aufbereitungsplätzen gebracht. Von hier aus wurde das Material entweder auf eine der Deponien verbracht oder vor Ort aufbereitet.

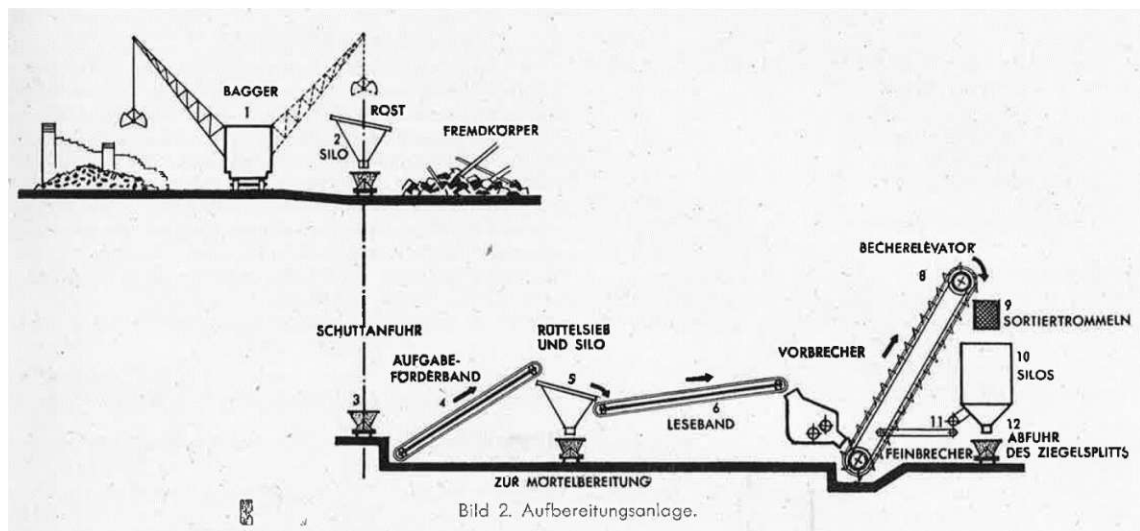


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Aufbereitungsanlage im Wiener Arsenal;

Quelle: [6]

In den Aufbereitungsanlagen wurde der angelieferte Schutt nach dem in Abbildung 3 gezeigten Schema zu Ziegelsplitt aufbereitet. Mit einem Bagger wurde das Material auf einen schrägen Rost gegeben, auf dem zu große und sperrige Teile abrutschen konnten und so direkt aussortiert wurden. Dazu gehörten zum Beispiel Mauerpfeiler, Eisenträger oder Trame. Diese Fremdkörper wurden weiter aufbereitet und entsprechend recycelt oder deponiert. In dem Rüttelsieb wurden aus dem übrigen Schutt alle feinen Bestandteile bis etwa 3 mm Korngröße ausgesiebt. Darin waren vor allem Gipsputze und Mörtel vom Mauerwerk, aber auch Sand und Asche enthalten. Das ausgesiebte Material wurde entweder für die Mörtelbereitung (nur bei Vorhandensein von gipsunempfindlichem Bindemittel) oder für Schüttungen und Düngemittel verwendet. Aus dem verbliebenen Material wurden auf dem Leseband vor allem alle Fremdstoffe (z. B. Holz und Gips) ausgelesen, welche nicht in den Ziegelsplitt gelangen durften. Aber auch ganze Mauerziegel wurden hier erneut zur direkten Wiederverwendung aussortiert. Anschließend wurde der übrige Schutt im Brecher gebrochen und mit Siebtrommeln in die gewünschten Sieblinien je nach Verwendung ausgesiebt. In der Regel wurde in Wien in den Korngrößengruppen 0 bis 3 mm, 3 bis 7 mm, 7 bis 15 mm und 15 bis 30 mm gesiebt, teilweise auch die Siebungen 0 bis 7 mm und 7 bis 15 mm. Für die Vibrosteine wurde nur Ziegelsplitt bis maximal 15 mm Korngröße verwendet. Die größeren Korngrößen fanden nur als Unterbau für Straßen und Wege oder als Zuschlag in Ort beton Anwendung.

Herstellung Vibrosteine: Für die Herstellung der Vibrosteine wurde in Wien vor allem Portlandzement verwendet, um ausreichende Festigkeiten zu erreichen. Später sind aber auch Mischbinder mit Flugasche und Kalk mit guten Ergebnissen für die Herstellung von Vibrosteinen eingesetzt worden. Die Zementzugabe lag für die Vibrosteine zwischen 130 und 200 kg/m³ Fertigbeton. Um eine gleichmäßige Porigkeit der Vibrosteine zu erzielen, wurden für die

Ziegelsplittzuschläge hauptsächlich Einkorngrößen verwendet. Gängig waren dabei die Korngruppen 1 bis 3 mm, 3 bis 7 mm und 7 bis 15 mm. Der Vorteil dieser Korngruppen, welche annähernd dem geometrischen Reihenfaktor 2 folgen, liegt in dem immer gleichbleibenden Porenraum im Mauerstein, unabhängig von der verwendeten Korngruppe. Das Auslassen der Korngröße kleiner 1 mm begründete sich vor allem darin, dass das kapillare Wasseraufnahmevermögen mit den ganz feinen Korngrößen in der Mischung erheblich größer gewesen wäre, was wiederum bauphysikalisch insbesondere beim Wärmeschutz nachteilig ist.

Im Jahr 1947 spendete Schweden zwei komplette Anlagen zur Herstellung von Vibrosteinen an die Stadt Wien. Die Anlagen wurden im Wiener Arsenal aufgestellt und produzierten dort fortan Vibrosteine. Daneben gab es mit den Jahren zahlreiche weitere Anlagen, welche alle nach einem ähnlichen Prinzip funktionierten. Die Erläuterungen der Funktionsweise und des Ablaufs erfolgen hier am Beispiel der aus Schweden stammenden Anlage im Arsenal.

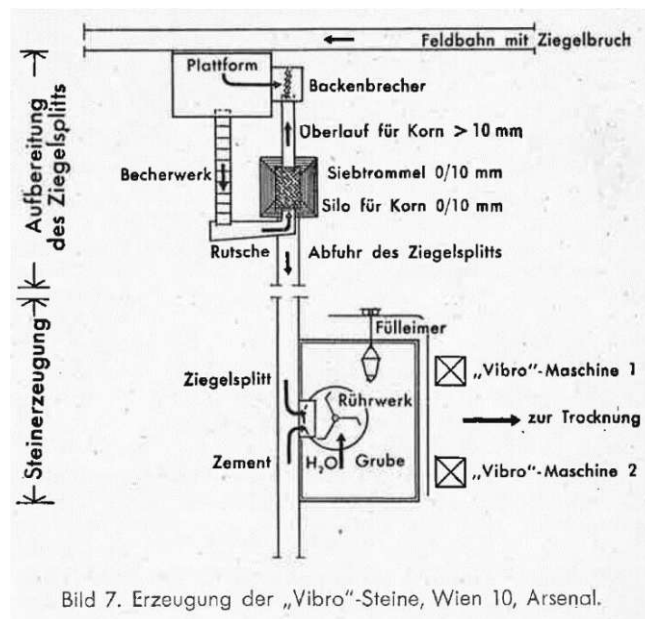


Abbildung 4: Schema der Vibrostein-Fertigungsanlage aus Schweden, welche im Wiener Arsenal aufgebaut wurde und dort Vibrosteine produzierte; Quelle: [6]

Für die Herstellung der Vibrosteine mit den schwedischen Maschinen wurde auch die in Schweden entwickelte Zusammensetzung genutzt. Der Ziegelsplitt (hier Korngruppe 0 bis 10 mm) wurde zusammen mit Wasser und Zement ($130 \text{ bis } 200 \text{ kg/m}^3$ Fertigbeton) im Rührwerk vermischt und anschließend in die Formen gefüllt (Abbildung 4). Die Verdichtung wurde immer im Rüttelverfahren durchgeführt, da sonst die Ziegelstruktur zertrümmert worden wäre. Da die Betonmischung relativ trocken und standfest war, konnten die Mauersteine direkt nach dem Verdichten mit einem Stempel aus der Form herausgedrückt werden und vor Austrocknung geschützt aushärten [6].

2.1.2.4. Vorschriften und damalige Regelwerke in Österreich

Anders als in Deutschland gab es in Österreich in den Nachkriegsjahren keine Norm, welche Hohlblocksteine oder Betonmauersteine behandelte oder regelte. Stattdessen wurden die zu der Zeit gültigen Normen für den klassischen Mauerwerksbau herangezogen. In den Zulassungen der einzelnen Vibrosteine wurden neben den spezifischen Druckfestigkeitswerten auch die Grenzwerte für die Anwendung festgehalten. Bedingt durch die Druckfestigkeiten zwischen $40 \text{ und } 80 \text{ kg/cm}^2$ ($4 \text{ bis } 8 \text{ N/mm}^2$) für die Vibrosteine, durften diese nach den damals in Österreich gültigen Bemessungsregeln nur in den oberen 3 Geschossen von Wohnhäusern bis maximal 5 Vollgeschosse eingesetzt werden.

Neben den Bauweisen mit Mauersteinen aus Ziegelsplittbeton wurden in den Nachkriegsjahren viele Gebäude in Wien und Österreich mit Schüttbetonwänden aus Ziegelsplittbeton und anderen Leichtbetonsorten gebaut. Die Schüttbetonwände aus Leichtbeton wurden in Österreich 1973 in der ÖNORM B 3353-1973 [12] genormt.

2.1.2.5. Ziegelsplittbetonsteine in Deutschland

In Deutschland wurde bereits 1943 die Normenreihe DIN 4152:1943 bis DIN 4155:1943 eingeführt. Mit dieser wurden diverse Hohlblocksteine aus Normal-, Bims- und Leichtbeton in ihren Anforderungen und ihrer Anwendung geregelt. Nach Ende des Zweiten Weltkrieges 1945 stand Deutschland vor denselben Herausforderungen wie Wien und Österreich, dass große Teile der Städte zerstört und mit gewaltigen Trümmerbergen übersät waren. Auf Basis der bereits existierenden DIN-Normen für Leichtbetonsteine wurden die ursprünglichen Zuschläge durch Ziegelsplitt ersetzt. Mit den theoretischen und in Laborversuchen gewonnenen Erkenntnissen wurden zwei neuen Normenblätter für Mauersteine aus Ziegelsplittbeton herausgegeben, eines für Vollsteine und eines für Hohlblocksteine. So konnte bereits wenige Monate nach Kriegsende die Produktion von genormten Hohlblocksteinen starten.

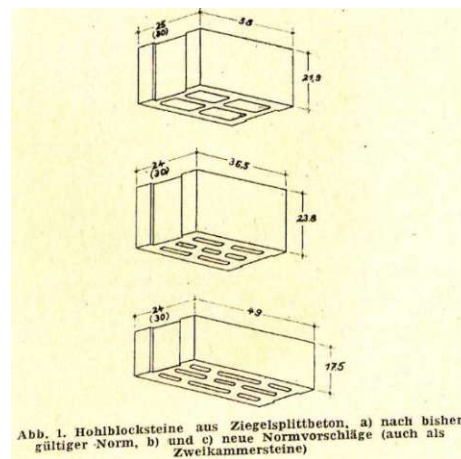


Abbildung 5: Abmessungen von Hohlblocksteinen aus Ziegelbeton nach der neuen deutschen Norm (oben: Zweikammerstein alte Norm, Mitte und unten: Dreikammerstein nach neuer Norm; vermutlich ist in der Abbildung die DIN 4163:1951 gemeint); Quelle: [12]

1951 wurden die Normenblätter offiziell als DIN 4163:1951 veröffentlicht. Anfangs orientierte man sich in Deutschland für beide Mauersteine noch eng an anderen Leichtbetonsteinen und ging von Steindruckfestigkeiten von 20 kg/cm^2 (2 N/mm^2) aus. Daher gab es für die Mauersteine ein nur sehr eingeschränktes Einsatzgebiet in den oberen drei Geschossen von Wohngebäuden. Die unteren Geschosse waren entweder aus Ziegelmauerwerk oder den Vollsteinen aus Ziegelsplittbeton herzustellen. Schnell führten praktische Erfahrungen und kleinere Anpassungen in der Herstellung und Zusammensetzung zu deutlich höheren Steifigkeiten. So wurden bald für die Vollsteine Steindruckfestigkeiten von 40 kg/cm^2 (kleinformatig) bis 50 kg/cm^2 (großformatig) erreicht und zugelassen. Damit konnten die Vollsteine aus Ziegelsplittbeton in allen Bereichen des Wohnungsbaus eingesetzt und verwendet werden.

Darauf aufbauend wurden auch die Hohlblocksteine weiterentwickelt. Anfangs wurden nur die genormten Zweikammersteine mit 20 kg/cm^2 Steindruckfestigkeit hergestellt (Abbildung 5). Später entstanden zur besseren Wärmedämmung Dreikammersteine, welche gleichzeitig Steindruckfestigkeiten von 30 bis 50 kg/cm^2 , manche sogar bis zu 80 kg/cm^2 ermöglichten. Diese weiterentwickelten Mauersteine führten zudem zu höheren Mauerwerksfestigkeiten. Fortan war es möglich, dass diese Mauersteine im Wohnungsbau für die Verwendung in den unteren Geschossen von Gebäuden bis zu 6 Vollgeschossen zugelassen und eingesetzt wurden [13].

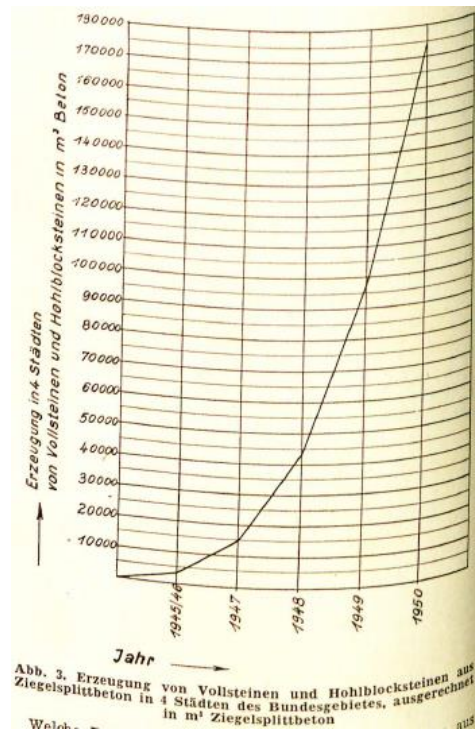


Abbildung 6: Erzeugung von Voll- und Hohlblocksteinen aus Ziegelsplittbeton in vier deutschen Städten in m³ Ziegelsplittbeton (keine Angabe welche Städte erfasst wurden);
Quelle: [12]

Während in den Normen die deutlich höheren Steindruckfestigkeiten und umfangreicheren Anwendungsgebiete erst Ende 1952 mit der Überarbeitung der Normen Einklang fanden (DIN 1053:1952-12 „Mauerwerk – Berechnung und Ausführung“ und DIN 4152:1943 bis DIN 4155:1943, zusammengefasst in der DIN 18151:1952-09 „Hohlblocksteine aus Leichtbeton“), wurden in Darmstadt bereits Ende 1949 erstmals Hohlblocksteine mit höheren Steindruckfestigkeiten zugelassen. Unter der Bezeichnung „Sonderhohlblockstein“ wurden sie in den genormten Steinbreiten von 25 und 30 cm und als Sondermaß mit 38 cm Breite zugelassen und waren mit nur geringen Einschränkungen einem Vollziegelmauerwerk gleichgesetzt. Von dort aus breiteten sich die neuen Mauersteine rasch nach Bayern und Baden-Württemberg aus, wo sie entsprechende Sonderzulassungen erhielten. Ab 1952 wurden in ganz Deutschland höherfeste Hohlblocksteine produziert und es konnten alle Geschosse einheitlich aus Hohlblocksteinen aus Ziegelsplittbeton gemauert werden. Neben einer noch effektiveren und umfassenderen Trümmerverwertung hatte diese Entwicklung außerdem sehr große finanzielle Vorteile. Während 1951 ein Kubikmeter Backsteinmauerwerk in Darmstadt 59 bis 68 DM/m³ kostete, lagen die Kosten für Mauerwerk aus Ziegelsplittbetonsteinen bei nur 46 bis 51 DM/m³ deutlich darunter [14].

Die Produktionszahlen von Mauersteinen aus Ziegelsplittbeton stiegen in den ersten Jahren der Herstellung extrem an. Während 1945 und 1946 lediglich etwa 3.500 m³ Ziegelsplittbeton für Voll- und Hohlblocksteine hergestellt wurde, stieg in den Folgejahren die Produktionsmenge bis auf rund 185.000 m³ im Jahr 1950 an. Die in Abbildung 6 angegebene Produktionsmenge erfasst dabei sogar nur den produzierten Ziegelsplittbeton von vier deutschen Städten (Abbildung 6). Daraus lässt sich eindeutig erkennen, dass diese Bauweise in Deutschland in den Nachkriegsjahren spätestens ab 1949 sehr verbreitet und etabliert war [13].

Durch die vorhandenen Normenwerke verlief in Deutschland die Entwicklung und der technische Fortschritt bedeutend schneller und einheitlicher als in Österreich. In nahezu allen großen deutschen Städten wurde in den Nachkriegsjahren eine Trümmerverwertung mit Ziegelsplittbeton durchgeführt. Die Ziegelsplittbetonsteine wurden zu einem der Hauptbaustoffe in den Nachkriegsjahren beim

Wiederaufbau von zerstörtem Wohnraum. Allein in Frankfurt wurde durch die „Trümmer-Verwertungs-GmbH“ in den 1950er Jahren eine Jahresleistung von über 200.000 m³ Ziegelsplittbeton verarbeitet. Dieses entspricht etwa 23 Millionen Voll- und 6,6 Millionen Hohlblocksteinen, die pro Jahr für den Wiederaufbau von Frankfurt produziert wurden [15]. Währenddessen wurden in Wien noch Versuche zur effizientesten Bauweise im Rahmen des Wiener Schnellbauprogramms durchgeführt.

2.2. Heutige Verwendung

Im Zuge des immer größer werdenden Bedarfs und Interesses an Recyclingmaterial wird mittlerweile wieder vermehrt mit Ziegelsplitt als Gesteinszuschlag in Beton geforscht und gearbeitet. Allerdings hat der Ziegelsplittbeton heutzutage bei weitem keine so hohe Verbreitung wie in den Nachkriegsjahren. Vereinzelt setzen Firmen Ziegelsplitt als Zuschlag für nichttragende Mauersteine oder Kaminsteine ein. Aber auch bei Schüttbetonbauteilen kommen vereinzelt Ziegelsplittbetone zum Einsatz. Die Firma Maba Fertigteileindustrie GmbH produziert und vermarktet zum Beispiel seit einigen Jahren unter dem Namen Ziegelit® tragende Vollbetonwände aus Ziegelsplittbeton für den Hochbau. Der größte Anteil des anfallenden ziegelhaltigen Schutts und Brennbruchs aus der Produktion findet in anderen Bereichen, zum Beispiel als Straßenunterbau, für ungebundene Tragschichten im Wegebau, im Sportplatzbau oder als Vegetationssubstrate Verwendung [16]. In den letzten Jahren sind durch umfangreiche Forschungsarbeiten große Fortschritte in der Entwicklung von Ziegelsplittbetonen mit hohen Festigkeiten erzielt worden. Zahlreiche Forschungsarbeiten laufen derzeit, um den Anteil an rezykliertem Ziegelmaterial in der Baustoffproduktion zu erhöhen.

2.3. Normengrundlage

Eine eigene Norm, welche Ziegelsplittbetonsteine oder Vibrosteine regelte, existierte in Österreich nicht. Die Produktion erfolgte auf Basis von Laboruntersuchungen und baupolizeilichen Zulassungen. Heute wären die Mauersteine als Betonwerksteine nach der *ÖNORM EN 771-3:2011-05 + A1:2015* [17] einzuordnen. Auf dieser Basis und in Verbindung mit den dazugehörigen Teilen der *ÖNORM EN 772* werden die Materialversuche und Berechnungen im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführt. Behandelt werden in dieser Arbeit die folgenden fünf Prüfverfahren:

- *ÖNORM EN 772-1:2015* [18] (Bestimmung der Druckfestigkeit)
- *ÖNORM EN 772-6:2002* [19] (Bestimmung der Biegezugfestigkeit von Mauersteinen aus Beton)
- *ÖNORM EN 772-11:2011* [20] (Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme [...])
- *ÖNORM EN 772-13:2000* [21] (Bestimmung der [...] Trockenrohdichte)
- *ÖNORM EN 772-16:2016* [22] (Bestimmung der Maße)

2.3.1. Vibrosteine - *ÖNORM EN 771-3:2011 bis EN 771-05+A1:2015-08* und die Prüfverfahren der Normenreihe *ÖNORM EN 772-1 bis 772-22*

Die *ÖNORM EN 771* enthält „Festlegungen für Mauersteine“, der hier betrachtete Teil 3 ist für „Mauersteine aus Beton (mit dichten und porigen Zuschlägen)“ [17]. In erster Linie ist dieser informativ und enthält die Merkmale und Anforderungen für Mauersteine aus Beton. Ergänzt wird sie durch die einzelnen Teile der *ÖNORM EN 772-1 bis 772-22*, welche die Prüfverfahren für Mauersteine vorgeben. Die Materialuntersuchungen und in dieser Diplomarbeit behandeln lediglich einen Teil der *ÖNORM EN 771-3:2011 + A1:2015* [17]. Die entsprechenden Kapitel werden im Folgenden unter ihrer Kapitelnummer aus der *ÖNORM EN 771-3:2011 + A1:2015* [17] kurz betrachtet.

Kapitel 5.2 – Maße und Grenzabmessungen

In diesem Kapitel wird die Reihenfolge der Abmessungen vorgegeben, wie der Hersteller seine Mauersteine zu bemaßen hat. Zudem werden vier Abmaßklassen definiert, innerhalb derer sich die Mauersteine in der Produktion bewegen müssen.

Die dazugehörige ÖNORM EN 772-16:2011 [22] gibt das dazugehörige Prüfverfahren vor. Hierzu sind mit einem Messgerät die Abmessungen der Länge, Breite und Höhe auf 0,1 mm genau zu bestimmen. Dabei sind die Messpunkte in der Norm vorgegeben. Bei kleinen Mauersteinen ($l_u \leq 250$ mm, $w_u \leq 125$ mm $h_u \leq 100$ mm) wird nur eine Messung je Seite in der Probekörpermitte vorgenommen, sonst sind zwei Messungen in der Nähe der Kanten der Probekörper vorzunehmen. Bei Hochloch- und Hohlblocksteinen sind zudem an je drei Stellen die Dicke der Außenwandungen und Stege sowie die Tiefe aller Löcher, die nicht durchgehen, an jeweils zwei Stellen zu messen. [22].

Kapitel 5.3 – Form, Ausbildung und Aussehen

Für die Deklaration von Form, Ausbildung und Aussehen der Vibrosteine können nach der ÖNORM EN 771-3:2011 + A1:2015 [17] verschiedene Angaben und Darstellungsformen gewählt werden. Dazu zählen die Darstellung von Form und Ausbildung anhand von Zeichnungen, Angaben zum Einzel- und Gesamtlöchlumen als prozentualer Anteil, prozentualer Volumenanteil von Grifföffnungen und Gesamtlöchlumenschnitt sowie Abmessungen der Innen- und Außenstege. Es sind nicht alle Werte zwingend anzugeben. Die Angaben können wahlweise als oberer oder unterer Grenzwert oder als Wertebereich angegeben werden.

Kapitel 5.4 – Rohdichte

Bei der Angabe der Rohdichte wird zwischen der Brutto-Trockenrohichte (Steinrohichte) und der Netto-Trockenrohichte (Betonrohichte) unterschieden. Dabei werden beim Bruttovolumen nur die Bereiche abgezogen, die mit Mörtel verfüllt werden. Beim Nettovolumen wird zusätzlich das Volumen von allen Lochungen und Löchern abgezogen, die nicht mit Mörtel verfüllt werden. Die Nettorohichte ist dabei nur bei Bedarf anzugeben.

In der ÖNORM EN 772-13:2000 [21] gibt es zwei Wege, nach denen die Brutto-Trockenrohichte bestimmt werden kann. Entweder kann diese am ganzen Mauerstein oder mit Teilproben ganzer Mauersteine (ohne Lochanteil) bestimmt werden. Teilproben müssen dabei mindestens 100 g wiegen und aus jedem Mauerstein sind drei repräsentative Proben zu entnehmen. Diese werden im Trocknungsofen langsam bis zur Massekonstanz getrocknet und durch das Volumen der Proben geteilt. Die Trockenrohichte wird in kg/m^3 angegeben [21].

Kapitel 5.5 – Mechanische Festigkeit

Die mechanische Festigkeit der Mauersteine wird im Rahmen dieser Arbeit in zwei Arten aufgeteilt, die der Druckfestigkeit und die der Biegezugfestigkeit.

Druckfestigkeit: Die Druckfestigkeit wird entweder am ganzen Mauerstein oder an herausgeschnittenen repräsentativen Probekörpern ermittelt. Angegeben wird die Druckfestigkeit entweder als charakteristische Druckfestigkeit f_c (5 %-Quantil) oder als mittlere Druckfestigkeit f_m (50 %-Quantil) in N/mm^2 . In dieser Diplomarbeit werden ausschließlich Druckfestigkeitsprüfungen an aus den Vibrosteinen herausgeschnittenen Prüfkörpern durchgeführt. In der ÖNORM EN 771-3:2011 + A1:2015, Kapitel 5.5.1.2 [17] wird vorgegeben, dass die herausgeschnittenen Kleinprüfkörper dasselbe w/h Verhältnis wie der ganze Mauerstein aufweisen müssen, die Länge nicht kleiner sein darf als die Höhe und der Prüfkörper repräsentativ für den Querschnitt des Mauersteins sein muss. Die Höhe muss mindestens 100 mm betragen. Diese Anforderungen an die Kleinprüfkörper können bedingt durch die Geometrie der vorhandenen Vibrosteine nicht erfüllt werden. Die Prüfkörper können nur aus den Stegbereichen der Mauersteine entnommen werden und sind somit von den Dimensionen her stark eingeschränkt.

Die ÖNORM EN 772-1:2015 [18] enthält zusätzlich noch zahlreiche Anforderungen und Vorgaben zu der Probekörpervorbereitung, zur Lagerung nach der Herstellung und zu den Bedingungen während der Prüfung. Viele der Vorgaben beziehen sich auf Druckprüfungen an den ganzen Mauersteinen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Weiter ist die Geschwindigkeit der Lastaufnahme in Kapitel 8.2 anhand der zu erwartenden Druckfestigkeit vorgegeben [18].

Biegezugfestigkeit: Für den Biegezugversuch der ÖNORM EN 771-3:2011 + A1:2015 [17] gibt es weniger Anforderungen als für die Druckfestigkeit. Die Prüfkörper sollen nach Norm eine Breite $w < 100$ mm haben und ein Verhältnis $l/w > 10$ aufweisen. Darüber hinaus wird von der Prüfnorm ÖNORM EN 772-6:2002 [19] vorgegeben, dass der Versuch mit einer Prüfmaschine mit zwei Rollenauflagern (Abstand 4-fache Höhe des Prüfkörpers) und zwei oberen Rollen in den Drittelpunkten des Prüfkörpers erfolgen soll [19]. Auf Grund der im Labor vorhandenen Prüfmaschinen, wird der Biegezugversuch abweichend zur ÖNORM nur als 3-Punkt-Biegezugversuch durchgeführt. Angegeben wird die Biegezugfestigkeit in N/mm^2 .

Kapitel 5.8 – Wasseraufnahme durch Kapillarität

Die Beprobung von Mauersteinen aus Beton über ihre kapillare Wasseraufnahmefähigkeit erfolgt nur im Bedarfsfall. Die Probenahme erfolgt dabei nach 10 Minuten und wird in $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}$ angegeben.

Die ÖNORM EN 772-11:2011 [20] definiert darüber hinaus nur den Ablauf der Prüfung und die Berechnung des Ergebnisses. Hierzu sind die Prüfkörper in ein Wasserbecken 5 mm tief einzutauchen und nach der vorgegebenen Probezeit zu entnehmen und zu wiegen [20].

Darüber hinaus gibt es in Österreich eine zweite Norm, die ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [23], welche sich ebenfalls mit dem Wasseraufnahmekoeffizienten befasst. Beide Normen haben denselben Versuchsaufbau, unterscheiden sich jedoch in der Prüfdauer, der Berechnung und der Einheit. Daher sind die Ergebnisse nicht direkt miteinander vergleichbar. Detailliert werden die Unterschiede in der dieser Diplomarbeit vorangegangenen Projektarbeit „Materialprüfung von Vibrosteinen – Laboruntersuchungen zum Verhalten von Vibrosteinen im Kontakt mit Wasser anhand von Kleinprüfkörpern“ [24] untersucht und dargestellt. Die Ergebnisse werden in dieser Arbeit zusammengefasst.

2.3.2. Moderner Recyclingbeton

Heutzutage wird unter anderem in Österreich wieder vermehrt Recyclingbeton verwendet. Gerade aus Aspekten des Umweltschutzes und des Schwindens von natürlichen Ressourcen rückt das Thema vermehrt in den Vordergrund. An vielen Faktoren wird in diesem Zusammenhang intensiv geforscht und entwickelt. Die dazugehörigen Normen werden regelmäßig angepasst und aktualisiert. Entsprechend komplex und umfangreich ist das Thema Recyclingbeton. Daher erfolgt nur ein kurzer und allgemeiner Überblick über den aktuellen Stand der Normung von Recyclingbeton in Österreich.

Grundsätzlich muss auch ein Recyclingbeton die Betonnorm ÖNORM B 4710-1:2018 [25] erfüllen. Somit gelten für die rezyklierten Gesteinszuschläge dieselben Rahmenbedingungen wie für natürliche Zuschläge. Zusätzlich sind die rezyklierten Gesteinskörnungen in der ÖNORM B 3140:2020 [26] und der ÖNORM EN 933-11:2011 [27] genauer definiert und klassifiziert. Dabei werden die Bestandteile der rezyklierten Gesteinskörnung in der ÖNORM B 3140:2020 [26] grundsätzlich in vier verschiedenen Grundmaterialien an Gesteinskörnung und drei weiteren Klassen für „Fremdkörper“ in geringen

Mengenanteilen unterteilt (*Kurzbezeichnung laut Norm in Klammern*): Beton bzw. Betonprodukte (R_c), gebundene und ungebundene Gesteinskörnung (R_u), Mauerziegel bzw. Kalksandstein (R_b) und bitumenhaltige Materialien (R_a). Dazu kommen noch Glas (R_g), schwimmendes Material (F) und sonstige Materialien als Klassen für „Fremdkörper“ (X) (vgl. [26]).

Material-bezeichnung	Beispiel	Kategorien nach Bestandteilen					
		R_c	$R_c + R_u$	R_b^a	R_a	$X + R_g$	FL
RB-A1	sortenreiner Betonbruch, z. B. im Fertigteilwerk, Betonstraßen	R_{c90}	R_{cu95}	R_{bNR}	R_{a1-}	XR_{g1-}	$FL_{0,2-}$
RB-A2	Betonbruch	R_{c90}	R_{cuNR}	R_{bNR}	R_{a10-}	XR_{g1-}	FL_{2-}
RG-A3 ^b	wiederaufbereitete, natürliche Gesteinskörnungen, z. B. gebrochener Gleis-schotter	R_{cNR}	R_{cu95}	R_{bNR}	R_{a5-}	XR_{g1-}	$FL_{0,2-}$
RH-B	aufbereiteter Hochbauplitt (mindestens 50 % Betonanteile)	R_{c50}	R_{cu70}	R_{b30-}	R_{a5-}	XR_{g1-}	FL_{2-}
RMH-C	aufbereitete mineralische Hochbaurestmasse	R_{cNR}	R_{cuNR}	R_{bNR}	R_{a10-}	XR_{g1-}	FL_{2-}
^a Masseanteil von glasierter Keramik höchstens 5 %							
^b Masseanteil von R_u mindestens 50 %							

Tabelle 1: Übersicht über die „Kategorien für die Bestandteile von rezyklierten Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM EN 12620“; Quelle: [22] Tabelle 2

In Tabelle 2 der ÖNORM B 3140:2020 [26] (siehe Tabelle 1) werden aus diesen Bestandteilen fünf Recyclingbetonklassen gebildet, wobei der maximale Mengenanteil in der Zuschlagsmischung je nach Klasse begrenzt ist. Gängig sind dabei nur die oberen vier Klassen.

Bei der Betrachtung der Klassen in Tabelle 1 fällt im Hinblick auf den Anteil an gebrochenem Ziegelmaterial in der Gesteinskörnung von Recyclingbeton auf, dass dieser auf maximal 30 % Masseanteil begrenzt ist. Vor diesem Hintergrund ist es in Österreich derzeit auf Basis der Normen nicht möglich, einen Betonstein oder eine Schüttbetonwand aus Ziegelsplittbeton herzustellen und auf den Markt zu bringen. Dahingegen kann (sortenreiner) Betonbruch und wiederaufbereitete natürliche Gesteinskörnung mit bis zu 90 bzw. 95 Masseprozent im Gesteinszuschlag in Österreich eingesetzt werden.

Vom „Interessensverband Beton Dialog Österreich (BDÖ)“ heißt es zusammenfassend zur Einsatz- und Verwendbarkeit von Recyclingbetonen und den Bestandteilen in Österreich:

„Die RB- bzw. RG-Produkte haben einen sehr hohen Anteil an Altbeton bzw. bereits verwendeten natürlichen Gesteinskörnungen. Daher können diese Rezyklate auch bei vielen Betonsorten und für höhere Betongüten wiederverwendet werden.“

Bei der Verwendung von RH-B Produkten liegen in Österreich nur eingeschränkt Erfahrungen vor. Durch den möglichen Ziegelanteil von bis zu 30 % sind die Anwendungsbereiche für Beton mit dieser rezyklierten Gesteinskörnung derzeit noch sehr beschränkt und für niedrigere Betongüten vorgesehen.“ [28]

3. Experimentelle Untersuchungen an Kleinprüfkörpern des Vibrosteins

3.1. Prüfkörpervorbereitung

3.1.1. Zustand der Probekörper

Die Vibrosteine für die Laborversuche wurden von der Stadt Wien für ein Forschungsprojekt des Hochbauinstitutes der TU Wien zur Verfügung gestellt. Entnommen wurden die Mauersteine im Zuge des Abbruchs einer kommunalen Wohnhausanlage im 2. Wiener Gemeindebezirk. Erbaut wurde die Anlage Anfang der 1960er Jahre von der Stadt Wien. Somit stammen die Vibrosteine aus den letzten Produktionsjahren von Vibrosteinen aus Trümmerschutt, da etwa Mitte der 60er Jahre der gesamte Kriegsschutt in Wien geräumt war und demzufolge auch keine Ziegelsplitt- und Vibrosteine mehr aus diesem hergestellt werden konnten [2].

Für diese Diplomarbeit wurden vier ganze und zwei halbe Vibrosteine mit den Probennummern 11, 16, 71 und 72 (ganze Mauersteine) sowie jeweils ein halber Mauerstein der Nummern 74 und 75 verwendet. Alle Mauersteine wurden bereits für Versuche des Forschungsprojektes verwendet und weisen daher verschiedene Vorschädigungen auf, welche zusammengefasst in der untenstehenden Tabelle 2 aufgeführt sind.

Mauerstein Nr.	Verwendeter Steinanteil	Zustand Original	Vorversuch	Zustand Mauersteine nach Vorversuch
11	Ganz	Sehr gut	Steindruckfestigkeit	Ganz mit Abgleichmörtel an Ober- und Unterseite
16	Ganz	Seht gut	Steindruckfestigkeit	
71	Ganz	Mittel	Biegezug	Mauersteine in der Mitte gebrochen. Bruchlinie teils in den Dicken in den Dicken Stegbereichen liegend
72	Ganz	Gut	Biegezug	
74	Halb	Mittel	Biegezug	
75	Halb	Mittel	Biegezug	

Tabelle 2: Übersicht über den Zustand der Vibrosteine, welche für die Versuche verwendet wurden, Quelle: Eigene Darstellung



Abbildung 7: Zustand vom Vibrostein (Probennummer 71) nach dem 3-Punkt-Biegezugversuch; Quelle: Eigene Aufnahme

Die beiden Mauersteine 11 und 16 sind trotz des vorher durchgeführten Steindruckversuchs äußerlich unbeschädigt und weisen keine oder nur kleine oberflächliche Abplatzungen auf.

Die Mauersteine 71 bis 74 wurden im Vorversuch für einen 3-Punkt-Biegezugversuch genutzt. Daher sind die Mauersteine, wie in Abbildung 7 am Beispiel des Mauerstein Nr. 71 zu sehen, in der Mitte gebrochen. Teilweise verläuft der Bruch nur in den dünnen Zwischenstegen, teilweise sind aber auch Bereiche der dicken Hauptstege gebrochen. Diese Stege eignen sich nicht mehr oder nur noch zum Teil

als Kleinprüfkörper. Bei den Mauersteinen Nr. 74 und 75 wird nur je eine Hälfte des Mauersteins für die Versuche in dieser Arbeit verwendet. In Abbildung 7 sind die Vorschädigungen gut zu erkennen, also Bereiche oder Ecken, welche bereits bei der Herstellung oder beim Ausbau weggebrochen sind und zu der Zustandsklassifizierung „Mittel“ geführt haben.

3.1.2. Prüfkörpervorbereitung

Für die weiteren Laborversuche werden Kleinprüfkörper verwendet, welche aus den großen Mauersteinen herausgeschnitten werden. Bedingt durch Form und Struktur der Mauersteine mit den Lochbereichen und den großen Stegen, können die Prüfkörper nur aus den dicken Stegbereichen herausgeschnitten werden und sind so in ihren Dimensionen begrenzt. Dadurch kommt es zu Abweichungen zu den Vorgaben aus der ÖNORM EN 771-3:2015 [17]. Jeder Mauerstein besteht aus 17 breiten Stegen, die für Kleinprüfkörper verwendet werden können (nummeriert von „A“ bis „Q“ in der Prüfkörperbezeichnung). Aus den Mauersteinen werden für die unterschiedlichen Versuche die folgenden drei verschieden dimensionierten Kleinprüfkörper herausgeschnitten:

- | | | | |
|------------|---------------|--------------|------------------------------------|
| • 6x | 3 x 3 x 12 cm | | 3-Prunkt-Biegezug |
| • Max. 11x | 4 x 4 x 4 cm | würfelförmig | Wasseraufnahme und Mörtelfugen |
| • Max. 11x | 4 x 4 x 8 cm | quaderförmig | Wasseraufnahme und Druckfestigkeit |



Abbildung 8: Steintrennmaschine für den Zuschnitt der Kleinprüfkörper; Quelle: Eigene Aufnahme

Der Zuschnitt der Kleinprüfkörper erfolgt auf einer großen Steintrennmaschine mit Wasserkühlung und Diamantsägeblatt (Abbildung 8). Von den Mauersteinen sind alle Abgleichmörtel, Außenkanten, Nuten/Fasen und Ausbrüche bzw. Bruchkanten abzuschneiden. Auf diese Weise bearbeitet, sind die Kleinprüfkörper von allen Seiten geschnitten und weisen ein homogenes Gesamtgefüge auf. Die Kleinprüfkörper werden anschließend beschriftet und auf einem Trockenblech gesammelt. Die Trocknung der Kleinprüfkörper erfolgt in einem Trocknungssofen bei 95° C für mindestens 48 Stunden. Die getrockneten Kleinprüfkörper werden im Anschluss bei einer Raumtemperatur von 22° C $\pm$ 1° C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 55 % $\pm$ 5 % bis zu den Versuchen gelagert. Unter diesen Bedingungen kann davon ausgegangen werden, dass die Kleinprüfkörper annähernd mit Mauersteinen vergleichbar sind, welche in Wiener Wohngebäuden verbaut sind. Nach der ÖNORM EN 771-3:2015 [17] und den dazugehörigen Teilen der ÖNORM EN 772-1 bis 22 sind für die Materialprüfungen Steinfeuchtigkeiten vorgegeben. Da mit den hier durchgeführten Laborversuchen die Materialkennwerte von in bestehenden Gebäuden vermauerten Mauersteinen ermittelt werden sollen, wird von den Normen abgewichen, indem die Versuche bei kontrollierten Raumluftbedingungen durchgeführt werden.

3.1.3. Visuelle Analyse der Mauersteine und Kleinprüfkörper nach dem Zuschnitt

Nach dem oben beschriebenen Zuschnitt der Mauersteine ist eine erste visuelle Analyse möglich. Einerseits werden die Steinstruktur und das Steingefüge im Querschnitt untersucht, andererseits werden die Kleinprüfkörper einer visuellen Begutachtung unterworfen.



Abbildung 9: Vergleich der Querschnittsflächen (von den Stirnseiten) der Steine 11, 71 und 72 mit unterschiedlichen Sieblinien: grob (links, Stein 11), mittel (Mitte, Stein 71) und fein mit einzelnen großen Körnern (rechts, Stein 72); Quelle: Eigene Aufnahme

Bei der Betrachtung und dem Vergleich der Querschnittsflächen der Mauersteine Abbildung 9 fällt deutlich auf, dass bei den vorliegenden Mauersteinen unterschiedliche Sieblinien verwendet wurden. Bereits aus der Untersuchung des historischen Hintergrundes ist bekannt, dass in Wien unterschiedliche Einkorngrößen für die Mauersteine verwendet wurden. Beim Mauerstein Nr. 11 (in Abbildung 9 links) ist ein allgemein sehr grobes Steingefüge zu erkennen. Mittels der visuellen Begutachtung kann im Wesentlichen festgestellt werden, dass die Korngrößen in der Größenordnung zwischen 7 und 15 mm liegen, wobei in geringen Mengen auch Korngrößen zwischen 3 und 7 mm im Gefüge vorhanden sind. Dagegen liegen die Korngrößen beim Mauerstein Nr. 71 größtenteils im Bereich zwischen 3 und 7 mm und weisen nur einen geringen Anteil an Körnern über 7 mm auf. Das Gefüge ist dadurch feiner und besitzt kleinporigere Zwischenräume im Vergleich zum Mauerstein Nr. 11. Der Stein Nr. 72 ist dagegen von den Korngrößen her eher durchmischt und besteht nicht aus einer vorherrschenden Korngröße wie die Mauersteine Nr. 11 und 71. Die Hauptkörnung in Stein Nr. 72 ist aus der Sieblinie 3 bis 7 mm. Aber auch die Größen 1 bis 3 mm und 7 bis 15 mm sind in diesem Stein in kleineren Anteilen vorhanden.

Eine weitere Beobachtung ist bei den Steinen Nr. 11 und 16 zu machen. Bei beiden Steinen wurde im Vorversuch im Rahmen des Forschungsprojektes die Steindruckfestigkeit geprüft. Anders als erwartet ist das Gefüge in den Stegen der Steine noch relativ stabil und intakt. Beim Aufschneiden der Mauersteine in die Kleinprüfkörper sind nur einzelne ausfallende Ziegelkörner zu beobachten. Ansonsten sind diese Kleinprüfkörper optisch nicht von den unbelasteten zu unterscheiden. Inwiefern hier die Struktur in den Stegen geschädigt ist, wird sich in den weiteren Versuchen, vgl. Kapitel 3.4.2 (Druckfestigkeit) und Kapitel 3.6.2 (Biegezugfestigkeit), zeigen.

3.2. Grundlegende Materialparameter

Bevor mit den Versuchen zur Druck- und Biegezugfestigkeit begonnen wird, sind einige grundlegende Materialparameter wie Abmessungen und Rohdichte zu bestimmen und die für die Versuchsreihe untersuchten Vibrosteine näher zu bemaßen.

3.2.1. Form und Abmessungen

Das Thema der Vermaßung und Beschreibung der Form muss in zwei Teile aufgeteilt und unterschieden werden. Zuerst ist der ganze Vibrostein zu begutachten, anschließend die aus den Mauersteinen herausgeschnittenen Kleinprüfkörper. Die Vermaßung der Steine und Prüfkörper erfolgt nach den Regeln und Vorgaben der ÖNORM EN 772-16:2011 [22].

3.2.1.1. Vibrostein

Bei dem Vibrostein handelt es sich um einen Hochlochstein aus Ziegelsplittbeton mit Griffmulden an den Stoßflächen und sechs Reihen an länglichen Hohlräumen zur Wärmedämmung im Mauerstein (Abbildung 10 und Tabelle 3). Der Vibrostein ist dabei an fünf Seiten geschlossen und wurde mit der offenen Seite der Hohlräume nach unten vermauert. Die Hohlräume sind in den Mauerstein hinein leicht konisch geformt und sind nicht vollständig durchgängig. Dadurch entstehen drei verschiedene Stegbereiche. Die Hauptstege liegen zwischen den Hohlräumen und sind etwa $50 \times 50 \text{ mm}^2$ ($F \times C$) groß. Die Randstege mit den Putzrillen haben eine Breite von 25 bis 30 mm und die Zwischenstege in den Überlappungsbereichen der Hohlräume sind etwa 20 mm breit. Für die Prüfkörper aus den Vibrosteinen werden nur die die Hauptstege verwendet. Die Griffmulden wurden nicht mit Mörtel verschlossen und sind als Hohlraum im Mauerwerk verblieben. Die Mauersteinlängsseiten haben zudem Rillen, welche eine bessere Haftfähigkeit des Putzes an den Mauersteinen bewirkt. Das mittlere Gewicht der Vibrosteine liegt bei 14,2 kg.

	Maß [mm]	Bezeichnung
L_u	390 ± 4	Länge Stein
w_u	250 ± 4	Breite Stein
h_u	142 ± 7	Höhe Stein
A	70	Länge Hohlraum Rand
B	80	Länge Hohlraum innen
C	50	Länge Hauptsteg
D	35	Randabstand Löcher
E	10	Breite Hohlräume
F	50	Breite Hauptsteg
G	30	Breite Randsteg
H	50	Breite Stirnfase
I	20	Tiefe Grifftasche
K	8	Dicke Deckschicht
M	134 ± 7	Tiefe Löcher

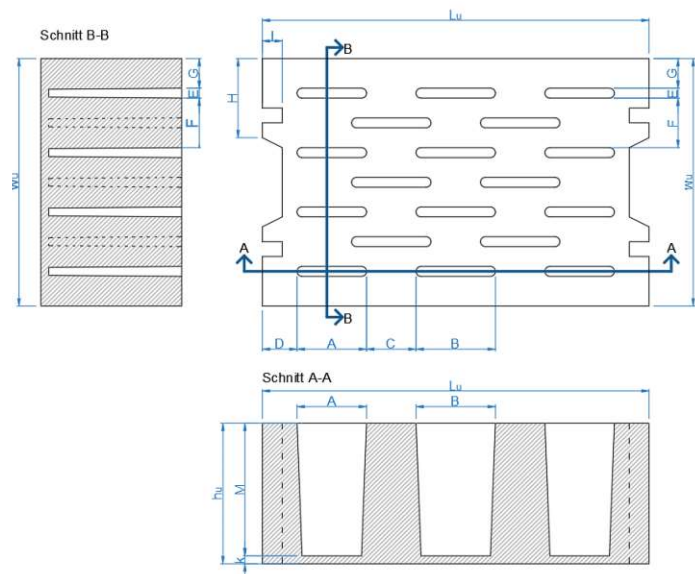


Tabelle 3: Mittlere Abmessungen der vorliegenden Vibrosteine; Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 10: Schematische 2D-Darstellung der vorliegenden Vibrosteine für die Probenentnahme, Betrachtung des Steins von der Unterseite; Quelle: Eigene Darstellung

Die Werte für die Länge, Breite und Höhe der Vibrosteine sowie die Tiefe der Löcher und das Gewicht sind aus den im Forschungsprojekt ermittelten Messwerten entnommen, die für diese Arbeit zur Verfügung gestellt werden und basieren auf der Vermessung von circa 70 Mauersteinen [2]. Die übrigen Abmessungen werden im Rahmen dieser Diplomarbeit ermittelt und haben eine Datengrundlage von drei vermessenen Mauersteinen. Die Werte sind mit Ausnahme der Abmessungen „G“ und „I“ nur sehr geringen Schwankungen von $\pm 1 \text{ mm}$ ausgesetzt.

3.2.1.2. Prüfkörper

Alle Laborversuche im Rahmen dieser Arbeit werden an Kleinprüfkörpern durchgeführt, welche aus den zur Verfügung gestellten Vibrosteinen entnommen werden. Die Bezeichnung der einzelnen Kleinprüfkörper erfolgt nach dem in Abbildung 11 gezeigten Schema. Hier ist die Lage der einzelnen

Kleinprüfkörper in den Vibrosteinen gut zu erkennen. Die Prüfkörper werden in drei verschiedenen Dimensionen zugeschnitten. Aus jedem Mauerstein werden sechs stabförmige Prüfkörper für den Biegezugversuch herausgeschnitten. Die übrigen elf Stege werden in würfel- und vorzugsweise quaderförmige Prüfkörper geschnitten.

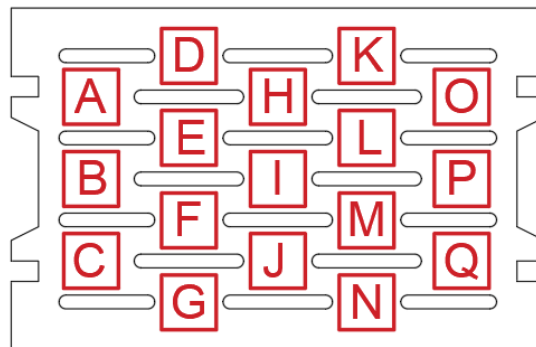


Abbildung 11: Schema für die Prüfkörperbezeichnung und Übersicht über die Verteilung im Stein;
Quelle: Eigene Darstellung

Würfel: Die würfelförmigen Prüfkörper haben an allen Seiten eine Soll-Kantenlänge von $L_w = b_w = h_w = 40 \text{ mm}$ (Abbildung 12 links). Aus jedem Steg werden in der Regel ein Würfel und ein Quader herausgeschnitten.

Quader: Die quaderförmigen Prüfkörper haben eine Soll-Kantenlänge an der Grundfläche von $L_q = b_q = 40 \text{ mm}$ und eine Höhe $h_q = 80 \text{ mm}$ (Abbildung 12 mittig). Aus jedem Stein werden bis zu elf solcher Prüfkörper herausgeschnitten. Diese Prüfkörper werden für die Druckfestigkeitsversuche verwendet.

Stab: Die stabförmigen Prüfkörper haben - anders als die beiden anderen Prüfkörper - nur eine Soll-Kantenlänge von $L_s = b_s = 30 \text{ mm}$ und eine Höhe $h_s = 120 \text{ mm}$ (Abbildung 12 rechts). Verwendet werden sie für die Biegezugprüfung und haben deswegen ein L_s/h_s Verhältnis von 1/3.

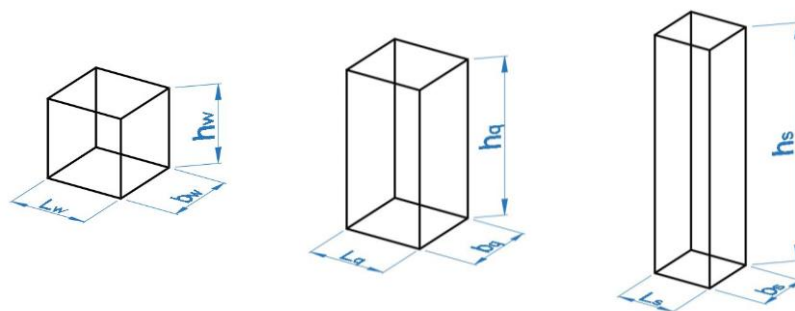


Abbildung 12: Form und Abmessungen der drei Prüfkörpertypen, Quelle: Eigene Darstellung

Auf der nächsten Seite sind in Tabelle 4 die Mittelwerte der Abmessungen aller Prüfkörper aufgeführt sowie die Anzahl der einzelnen Prüfkörpergrößen je Mauerstein aufgelistet. Die Abweichungen vom Mittelwert liegen bei den Außenabmessungen bei etwa $\pm 1 \text{ mm}$. Die Abweichungen beim Gewicht der Probekörper sind deutlich größeren Schwankungen von etwa $\pm 10 \text{ g}$ ausgesetzt. Der Variationskoeffizient $VK = \frac{\text{Standardabweichung}}{\text{Mittelwert}} [\%]$ liegt dabei bei den Abmessungen in der Größenordnung von 0,6 bis 2,0 % und beim Gewicht bei 3,5 bis 5,0 %.

Abmessung	Index i	Anzahl	Mittelwert Breite b_i	Mittelwert Länge L_i	Mittelwert Höhe h_i	Mittelwert Gewicht $m_{dry,p}$
Mauerstein 11						
4x4x4	w	12x	40,47 mm	40,62 mm	40,76 mm	91,44 g
4x4x8	q	10x	40,89 mm	40,67 mm	81,75 mm	182,23 g
3x3x12	s	4x	30,60 mm	30,65 mm	120,88 mm	151,02 g
Mauerstein 16						
4x4x4	w	5x	41,47 mm	41,23 mm	42,11 mm	97,00 g
4x4x8	q	11x	41,78 mm	41,98 mm	81,23 mm	192,91 g
3x3x12	s	6x	32,18 mm	32,08 mm	120,00 mm	164,25 g
Mauerstein 71						
4x4x4	w	11x	41,11 mm	40,97 mm	44,55 mm	99,27 g
4x4x8	q	10x	41,03 mm	41,04 mm	77,05 mm	175,83 g
3x3x12	s	6x	32,33 mm	32,43 mm	121,40 mm	171,65 g
Mauerstein 72						
4x4x4	w	10x	42,05 mm	41,97 mm	41,81 mm	97,50 g
4x4x8	q	11x	41,82 mm	41,98 mm	81,63 mm	193,87 g
3x3x12	s	6x	31,92 mm	31,84 mm	121,27 mm	166,89 g
Mauerstein 74						
4x4x4	w	4x	41,60 mm	41,67 mm	41,35 mm	95,68 g
4x4x8	q	5x	41,92 mm	41,83 mm	80,49 mm	187,60 g
3x3x12	s	2x	31,44 mm	31,30 mm	119,40 mm	160,55 g
Mauerstein 75						
4x4x4	w	4x	45,10 mm	44,19 mm	44,75 mm	121,12 g
4x4x8	q	4x	44,72 mm	44,75 mm	82,38 mm	230,53 g
3x3x12	s	2x	31,41 mm	31,48 mm	122,02 mm	168,65 g
Gesamt (Mauerstein 11 - 74)						
4x4x4	w	42x	41,34 mm	41,29 mm	42,11 mm	96,17 g
VK			1,84 %	1,82 %	1,71 %	4,92 %
4x4x8	q	47x	41,49 mm	41,50 mm	80,43 mm	186,49 g
VK			1,55 %	1,72 %	0,65 %	3,47 %
3x3x12	s	24x	31,69 mm	31,66 mm	120,59 mm	162,87 g
VK			2,04 %	1,99 %	0,61 %	4,33 %

Tabelle 4: Mittelwerte der Prüfkörperabmessungen aufgeteilt nach den einzelnen Vibrosteinen.

Die Werte des Mauersteins 75 sind wegen großer Abweichungen in den Abmessungen nicht im Mittelwert berücksichtigt. Quelle: Eigene Darstellung

3.2.2. Rohdichte des Ziegelsplittbetons

Die Rohdichte der Ziegelsplittbetonproben wird an den entnommenen Kleinprüfkörpern nach der ÖNORM EN 772-13:2000 [21] ermittelt. Dabei wird nur die Bruttotrockenrohichte bestimmt, da die geprüften Kleinprüfkörper nach dem Zuschnitt keine Hohlräume oder Löcher mehr aufweisen. Es sind somit für die Bruttorohdichte keine weiteren Abzüge am Volumen der Prüfkörper zu berücksichtigen. Abweichend zur ÖNORM EN 772-13:2000 [21] erfolgen die Messungen zur Trockenrohichte unter Raumluftbedingungen und nicht direkt nach der technischen Trocknung im Trocknungsöfen. Berechnet wird die Brutto-Trockenrohichte nach der Formel:

$$\rho_{g,p} = \frac{m_{dry,p}}{V_{g,p}} * 10^6 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (3.1)$$

Mit dieser Formel wird die Rohdichte für jeden Kleinprüfkörper berechnet und dann für jeden Vibrostein ein Mittelwert gebildet.

	Mauerstein 11	Mauerstein 16	Mauerstein 71	Mauerstein 72	Mauerstein 74	Mauerstein 75	Gesamt
Rohdichte $\rho_{g,p} \text{ [kg/m}^3\text{]}$	1.350,43	1.344,95	1.339,41	1.341,51	1.338,20	1.382,05	1.350,29
Minimum $\text{[kg/m}^3\text{]}$	1.284,77	1.261,56	1.157,70	1.275,45	1.284,10	1.270,28	1.157,70
Maximum $\text{[kg/m}^3\text{]}$	1.404,92	1.412,80	1.404,82	1.410,31	1.384,13	1.450,48	1.450,48
VK [%]	2,20	3,09	3,40	2,09	2,11	3,64	2,90

Tabelle 5: gemittelte Rohdichten der einzelnen Vibrosteine mit den Kleinprüfkörpern bestimmt;
Quelle: Eigene Darstellung

In der Übersicht in Tabelle 5 ist auf den ersten Blick die deutliche Schwankung der Rohdichte des Ziegelsplittbetons zu erkennen. Bei genauerer Betrachtung des Variationskoeffizienten zeigt sich, dass die Streuung der Messwerte nur bei einer Größe zwischen 2,20 % und 3,64 % liegt. Damit ist die Standardabweichung der bestimmten Werte der Rohdichte relativ klein. Die mittlere Rohdichte kann nach Tabelle 5 mit $\rho_{g,p} = 1.350,29 \text{ kg/m}^3$ angenommen werden.

3.3. Wasseraufnahmekoeffizient

Die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten war das Thema in einer dieser Diplomarbeit vorangegangenen Projektarbeit [24]. Die Ergebnisse und Erkenntnisse daraus werden im Folgenden zusammengefasst dargelegt.

In der Projektarbeit wird das Materialverhalten des Ziegelsplittbetons im Kontakt mit Wasser anhand von Laborversuchen untersucht, insbesondere die kapillare Wasseraufnahme und wie schnell Wasser vom Mauerstein aufgesogen wird. Hierzu wurde der Wasseraufnahmekoeffizient als Materialparameter bestimmt. Dieser gibt an, wie viel Wasser pro Zeiteinheit und Fläche vom Material aufgenommen wird. Bestimmt werden kann der Wasseraufnahmekoeffizient nach zwei unterschiedlichen Normen. Sie haben denselben Versuchsaufbau, unterscheiden sich aber im Wägungszyklus, der Berechnung, der Einheit und letztlich auch im Ergebnis deutlich.

Die ÖNORM EN 772-11:2011 [20] ist ausschließlich für die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Mauersteinen anwendbar. Betonwerksteine werden nach einer Eintauchzeit von 10 Minuten gewogen und damit der Wasseraufnahmekoeffizient $C_{w,p}$ in $\text{g/m}^2 \cdot \text{s}$ berechnet. Bei anderen Mauersteinen unterscheidet sich sowohl die Eintauchzeit als auch die Einheit. Die ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [23] hingegen ist allgemeingültig für alle Baustoffe und Materialien. Der

Wasseraufnahmekoeffizient wird dabei nach einer Tauchzeit von 24 Stunden und einheitlich in $kg/m^2 * \sqrt{h}$ bestimmt. In der Berechnung wird dabei anhand einer Messreihe zwischen einer linearen und einer nichtlinearen Wasseraufnahme unterschieden. Bei der linearen Wasseraufnahme wird auch der Effekt der anfänglichen Wasseraufnahme berücksichtigt, da diese oftmals abweichend ist.

3.3.1. Ablauf des Versuchs

Der Versuchsablauf ist in beiden Normen grundsätzlich gleich, außer dass für die ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [23] eine seitliche Wasseraufnahme durch eine Oberflächenbeschichtung zu vermeiden ist (hier abweichend ohne Oberflächenbeschichtung durchgeführt) und dass anstatt eines einzelnen Messwertes eine Messreihe aufzunehmen ist. Die Wägungen für diesen Versuch werden nach: 1, 2, 5, 10, 15 und 30 Minuten sowie nach 1, 3, 6, 24, 72 und 96 Stunden vorgenommen. Insgesamt wurden zwei Versuchsreihen (Probe 1 und Probe 2) durchgeführt.



Abbildung 13: Prüfkörper auf dem Gitterrost während des Wasseraufnahmeversuchs;
Quelle: Eigene Aufnahme

Die Prüfkörper werden für den Wasseraufnahmeversuch vermessen, gewogen und anschließend auf einen Gitterrost in einen mit Wasser gefüllten Behälter gestellt. Dabei werden die Prüfkörper etwa 5 mm tief ins Wasser eingetaucht. Für die einzelnen Wägungen werden die Prüfkörper zu den Messzeitpunkten aus dem Wasser herausgenommen, mit einem feuchten Tuch das Oberflächenwasser abgetupft und gewogen. Anschließend werden die Prüfkörper direkt zurück ins Wasser gestellt und der Versuch wird fortgesetzt. Die Messwerte werden aufgezeichnet und anschließend gemäß der Berechnung der beiden Normen ausgewertet (siehe Tabellen im Anhang).

3.3.2. Visuelle Beobachtungen

Bereits während des Versuchs können erste Beobachtungen gemacht werden, die auch gut in Abbildung 13 erkennbar sind. Hier sind nach 7 Stunden Tauchzeit die kleinen Prüfkörper bereits vollständig wassergesättigt (Zeitpunkt der optischen Wassersättigung nach etwa 1 Stunde). Die quaderförmigen Prüfkörper dagegen sind erst bis etwas mehr als zur Hälfte feucht geworden (erkennbar in der 2. Reihe von oben, 2. Stein von rechts; 6:45 Stunden Tauchzeit). Zu erkennen ist sehr deutlich, dass die kapillare Wasseraufnahme bei höheren Querschnitten deutlich langsamer vonstattengeht als bei kleinen und flachen Querschnitten.

3.3.3. Ergebnisse nach ÖNORM EN 772-11:2011 [20]

Die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten erfolgt nach der ÖNORM EN 772-11:2011 [20] mit der Formel:

$$C_{w,p} = \frac{m_{so,p} - m_{dry,p}}{A_p * t_{so}} * 10^6 \left[\frac{g}{m^3 * \sqrt{s}} \right] \quad (3.2)$$

Für $m_{so,p}$ wird das Gewicht des Prüfkörpers nach 10 Minuten eingesetzt und für t_{so} die Prüfdauer von 10 Minuten (bzw. in der Formel 600 Sekunden). So wird für jeden untersuchten Prüfkörper der Wasseraufnahmekoeffizient berechnet und dann über die Prüfkörperarten für die würfel- und quaderförmige Prüfkörper jeweils der Mittelwert gebildet.

$C_{w,p} [g/m^2*s]$	Würfel	Quader	Mittelwert Probe
Probe 1	8,79	8,90	8,85
Probe 2	8,65	9,08	8,87
Durchschnitt	8,72	8,99	8,86

Tabelle 6: Mittelwerte Wasseraufnahmekoeffizient, Quelle: [23]

Die Mittelwerte in Tabelle 6 zeigen zum einen, dass sich die Wasseraufnahmekoeffizienten bei den würfel- und quaderförmigen Prüfkörpern kaum unterscheiden. Im Mittelwert liegen die Würfel- und Quaderproben dicht beieinander (8,72 und 8,99 g/m^2*s), weswegen hier der Gesamtmittelwert von 8,86 g/m^2*s als Wasseraufnahmekoeffizient nach ÖNORM EN 772-11:2011 [20] angenommen werden kann. Dieser ist in allen Proben gut eingebettet und ein repräsentativer und gut nachvollziehbarer Wert, wie in Abbildung 14 gut zu erkennen ist (grüne Linie).

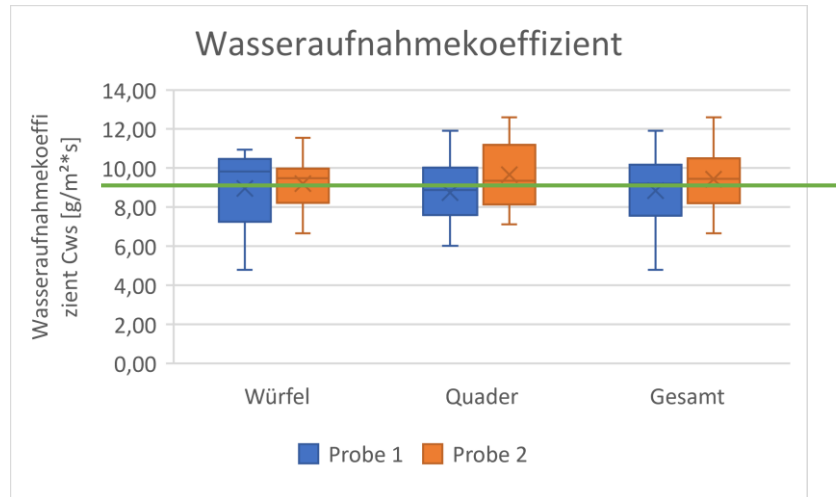


Abbildung 14: Range der Wasseraufnahmekoeffizienten der einzelnen Prüfkörper in den Versuchsreihen; Quelle [23]

Da die ÖNORM EN 772-11:2011 [20] keine Darstellung der Wasseraufnahme über die Zeit enthält, wird für die Beurteilung des Materialverhaltens der Wassergehalt der Prüfkörper in % über die Zeit zur Darstellung herangezogen. Da die genaue maximale Feuchtmasse der Prüfkörper hier nur schwer feststellbar ist, wird für diese Darstellung (Abbildung 15) der Sonderfall des „gravimetrischen Wassergehalts für Bodenbeschaffenheit“ nach ISO 11465:1993 [29] verwendet. Berechnet wird der Wassergehalt zu den Zeitpunkten t_{so} mit der Formel:

$$W_s = \frac{m_{so,s} - m_{dry,s}}{m_{dry,s}} [\%] \quad (3.3)$$

Dargestellt werden die Ergebnisse in Abbildung 15 über die Wurzel der Zeit $\sqrt{t}$ [h]. Abgebildet werden die Verlaufslinien der Mittelwerte der würfel- und quaderförmigen Prüfkörper und das Mittel aus beiden Prüfkörpergrößen.

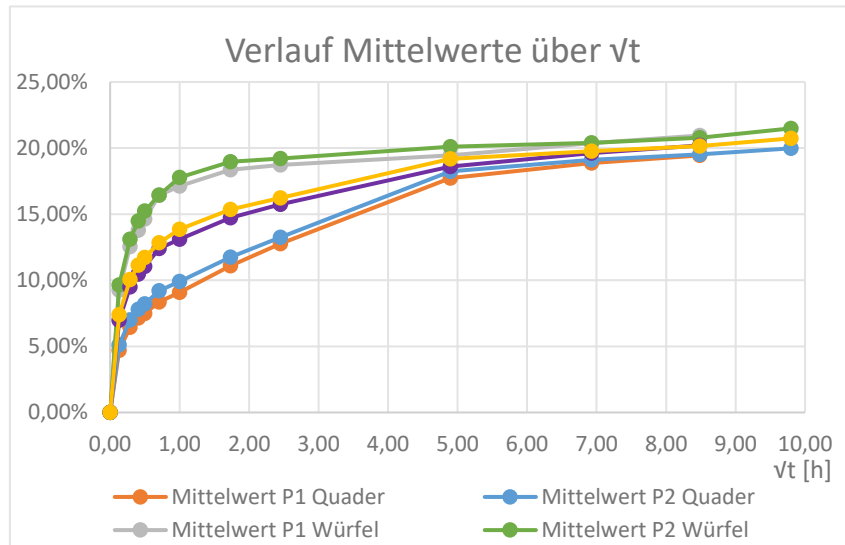


Abbildung 15: Verlauf der Wasseraufnahme über die Zeit; Quelle: [23]

Wenn man sich die Kurvenverläufe in Abbildung 15 anschaut, wird schnell die starke anfängliche Wasseraufnahme und das anschließende Abflachen der Kurve sichtbar. Nach der Sättigung der Prüfkörper flacht die Kurve ein weiteres Mal ab und steigt danach nur noch sehr gering an.

3.3.4. Ergebnisse nach ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [23]

Die Berechnung des Wasseraufnahmekoeffizienten ist nach ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [23] etwas aufwendiger als nach ÖNORM EN 772-11:2011 [20]. Nachdem die Wägungen nach dem festgelegten Messschema erfolgt sind, wird in einem ersten Schritt die normierte Wasseraufnahme berechnet und grafisch dargestellt. Diese wird berechnet mit:

$$\Delta m'_t = \frac{m_t - m_i}{A_p} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right] \quad (3.4)$$

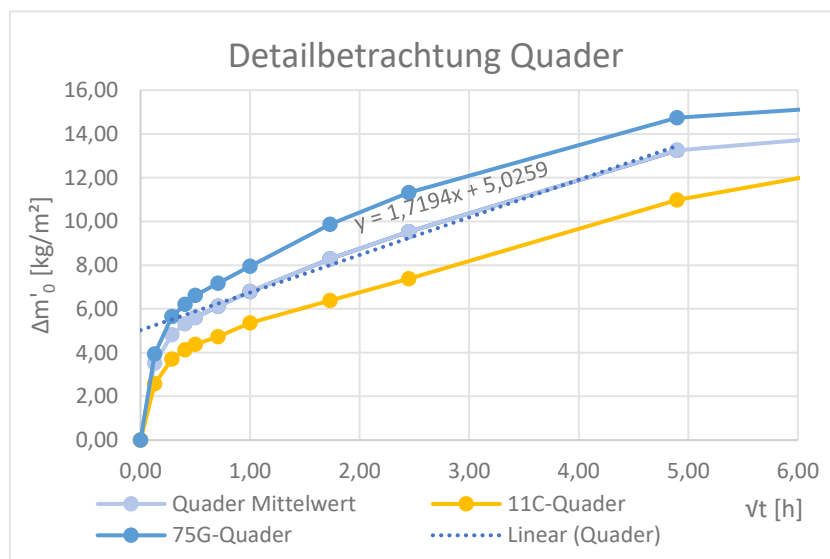


Abbildung 16: Normierte Wasseraufnahme der Mittelwerte nach ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016; Quelle: [23]

Im Diagramm über $\sqrt{t}$ [h] aufgetragen, lässt sich das Materialverhalten der Probe beurteilen und in ein lineares oder nichtlineares Stoffverhalten einteilen. In Abbildung 16 ist die Einordnung bei den quaderförmigen Prüfkörpern als lineares Stoffverhalten klar zu erkennen. Zu Beginn erfolgt eine starke anfängliche Wasseraufnahme, darauffolgend eine lineare Wasseraufnahme. Nach etwa 24 Stunden ist der Prüfkörper weitestgehend gesättigt und die Wasseraufnahme flacht erneut deutlich ab. Bei den würfelförmigen Prüfkörpern ist der Kurvenverlauf sehr ähnlich, jedoch in einem deutlich kürzeren Zeitrahmen von etwa einer Stunde. Zudem wird der Wasseraufnahmeversuch beim Auftreten von Wasser an der Probekörperoberseite (hier nach einer Stunde) beendet und die Berechnung wird abweichend nach der festgestellten Zeit zu diesem Zeitpunkt durchgeführt. Bei den würfelförmigen Prüfkörpern ist somit die Berechnung mit $t_f = 1$ [h] durchzuführen.

In der ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [23] wird bei linearem Stoffverhalten die anfängliche Wasseraufnahme aus dem Wasseraufnahmekoeffizienten herausgerechnet. Hierzu wird im Bereich des linearen Anstiegs eine Trendlinie bestimmt und auf den Schnittpunkt mit der Vertikalachse extrapoliert. Damit wird der Wert $\Delta m'_0$ bestimmt und in der folgenden Berechnung der Wasseraufnahmekoeffizient für die normale Wasseraufnahme des Materials bestimmt. In Abbildung 17 ist das Vorgehen am Beispiel der quaderförmigen Prüfkörper gezeigt. Anhand der Trendlinie lässt sich für $\Delta m'_0 = 5,0259 \frac{kg}{m^2}$ bestimmen.

Im nächsten Schritt wird mit den ermittelten Werten der Wasseraufnahmekoeffizient für den Ziegelsplittbeton berechnet. Bei einer linearen Wasseraufnahme erfolgt das mit:

$$W_w = \frac{\Delta m'_t - \Delta m'_0}{\sqrt{t_f}} \left[\frac{kg}{m^2 * \sqrt{h}} \right] \quad (3.5)$$

Die Berechnung des Wasseraufnahmekoeffizienten erfolgt hier getrennt für die würfel- und quaderförmigen Prüfkörper. Die Quader werden mit einer Prüfdauer von 24 Stunden und die Würfel mit 1 Stunde bestimmt. Somit ergibt sich der Wasseraufnahmekoeffizient nach der ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [23] bei den Quadern zu: $W_{w,q} = 1,65 \frac{kg}{m^2 * \sqrt{h}}$ und bei den Würfeln zu $W_{w,w} = 2,26 \frac{kg}{m^2 * \sqrt{h}}$.

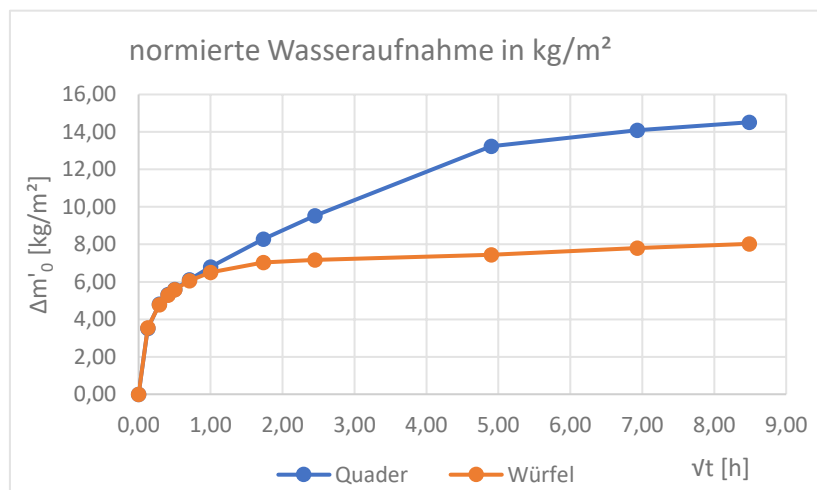


Abbildung 17: Detailbetrachtung der Wasseraufnahme bei den quaderförmigen Prüfkörpern nach ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016; Quelle: [23]

															Kurve Typ A - W _{w,t} [kg/(m²*v·h)]			
															Quader Würfel			
															vt [h]	4,90	1,00	
															t [h]	24	1	
Probennr.	Form	A _s	vt [h]	Δm _{f,t} [kg/m²]														
			0,00	0,13	0,29	0,41	0,50	0,71	1,00	1,73	2,45	4,90	6,93	8,49	9,80	Δm' ₀	86400	3600
			0	1	5	10	15	30	60	180	360	1440	2880	4320	5760			
Mittelwert	Quader	2.596,71 mm²	0,00	3,51	4,81	5,32	5,60	6,12	6,79	8,29	9,53	13,24	14,09	14,52		Quader	5,03	1,68
Mittelwert	Würfel	2.575,57 mm²	0,00	3,54	4,78	5,28	5,58	6,05	6,51	7,03	7,17	7,45	7,80	8,03		Würfel	4,28	2,23
Mittelwert P2	Quader	2.610,89 mm²	0,00	3,81	5,21	5,80	6,11	6,68	7,34	8,73	9,87	13,55	14,21	14,51	14,85	Quader	5,59	1,63
Mittelwert P2	Würfel	2.590,86 mm²	0,00	3,68	5,00	5,53	5,81	6,27	6,78	7,24	7,34	7,68	7,79	7,93	8,20	Würfel	4,49	2,29
																	1,65	2,26

Tabelle 7: Ergebnisse für $\Delta m_{f,t}$, $\Delta m'_0$ und Wasseraufnahmekoeffizient W_w nach ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [9]; Quelle: Eigene Darstellung

3.3.5. Vergleich und Bewertung der Ergebnisse

Beide Normen wollen denselben Wert berechnen, unterscheiden sich aber im Ergebnis deutlich. Während die ÖNORM EN 772-11:2011 [20] den Wasseraufnahmekoeffizienten für würfel- und quaderförmige Proben zusammen zu $C_{w,p} = 8,86 \frac{g}{m^2 \cdot s}$ berechnet, hat die ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [23] mit $W_{w,q} = 1,65 \frac{kg}{m^2 \cdot \sqrt{h}}$ für die Quader und $W_{w,w} = 2,26 \frac{kg}{m^2 \cdot \sqrt{h}}$ für die Würfel zwei einzelne Ergebnisse in einer völlig anderen Größenordnung und Einheit.

Während die ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [23] den tatsächlichen Wert der kapillaren Wasseraufnahme berechnet und darstellt (Herausrechnen der starken anfänglichen Wasseraufnahme), wird in der ÖNORM EN 772-11:2011 [20] der Wasseraufnahmekoeffizient am Ende dieser hier sehr deutlich erhöhten anfänglichen Wasseraufnahme bestimmt. Somit bildet dieser Wasseraufnahmekoeffizient nur die anfängliche Wasseraufnahme ab. Dies wird durch das Aufstellen einer Kontrollrechnung deutlich erkennbar. „Die hier beprobten Prüfkörper haben im Mittel eine mit Wasser in Kontakt stehende Fläche von 0,002586 m², somit wäre die Wasseraufnahme bei 0,023 g/s. Betrachtet man jetzt beispielsweise nur die Quader, so haben diese im Mittel nach 24 Stunden 34,44 g Wasser aufgenommen. Der hier berechnete Wasseraufnahmekoeffizient sagt aber aus, dass dieser Wert bereits nach 1.497 Sekunden bzw. nach etwa 25 Minuten erreicht worden wäre. Die Würfel haben im Versuch nach 1 Stunde 16,96 g Wasser aufgenommen (oberer Knickpunkt). Bei der nach Norm berechneten Wasseraufnahme hätte der Wert bereits nach nur 737 Sekunden bzw. etwa 12:17 Minuten erreicht sein sollen.“ [24] An diesen Rechnungen wird deutlich, wie stark die anfängliche Wasseraufnahme hier den Wert verfälscht.

Baustoff	Rohdichte in kg/m ³	Wasseraufnahmekoeffizient W_w in kg/(m ² *vh)
Vollziegel	1800	20 – 30
Kalksandvollstein	1800	4 – 8
Bimsbeton	600	1,5 – 2,5
Porenbeton	400	4 – 8
Leichtziegel	800	5 – 8
Beton C20/25	2000-2600	0,7

Tabelle 8: Wasseraufnahmekoeffizient W_w einiger Baustoffen im Vergleich; Quelle: [30], [29]

Zwar ist die ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [23] auch nicht ganz akkurat, da die anfängliche Wasseraufnahme hier durch einen theoretischen Anfangswert ersetzt wird, aber der Wasseraufnahmekoeffizient entspricht in etwa dem tatsächlichen Verlauf nach Ende der anfänglichen Wasseraufnahme. Wie die Versuche gezeigt haben, beschränkt sich diese bei dem Ziegelsplittbeton auf die unteren etwa 2 cm der Prüfkörper.

Ein weiterer großer Vorteil der ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [23] ist die Vergleichbarkeit mit anderen Materialien. Möglich ist dies, da die Beprobung und Berechnung unabhängig vom Material immer gleich sind. Im Vergleich mit anderen Mauersteinen bzw. Normalbeton ordnet sich der Ziegelsplittbeton der Vibrosteine in einem vergleichbaren Bereich mit Bimsbetonsteinen ein [30], [31]. Unabhängig von der Norm ist festzuhalten, dass der Ziegelsplittbeton nicht ungeschützt bzw. im Einflussbereich von Wasser verwendet werden sollte. Dafür ist die Wasseraufnahme des Materials zu hoch und kann langfristig zu massiven Bauschäden führen.

3.4. Druckfestigkeit

Für die Laboruntersuchungen zur Druckfestigkeit des Ziegelsplittbetons der Vibrosteine werden die quaderförmigen Prüfkörper nach ÖNORM EN 772-1:2015 [18] untersucht und geprüft. Dabei werden die Mauersteine 71, 72, 74 und 75 zusammen als unbeschädigte Proben betrachtet und die Mauersteine 11 und 16 werden als vorgeschädigte Proben auf ihre Resttragfähigkeit hin untersucht. Die Untersuchungen der Steindruckfestigkeit dieser beiden Vibrosteine wurden zuvor in dem übergeordneten Forschungsprojekt durchgeführt.

Die Prüfung erfolgt mittels einer hydraulischen Prüfpresse. Die Prüfkörper werden einzeln in die Prüfmaschine eingelegt und eine Stahlplatte auf die Oberseite gelegt, um eine gleichmäßige Lastverteilung auf dem Prüfkörper zu erhalten. Die Prüfgeschwindigkeiten sind einheitlich für alle Versuche auf 0,1 N/mm²/s eingestellt. Erwartet wird eine Druckfestigkeit zwischen 4,0 und 6,0 N/mm², womit die Anforderung an eine maximale Versuchsdauer von 1 Minute theoretisch erfüllt wäre. Die Druckversuche enden bei einem Druckabfall von mehr als 10 % gegenüber dem Höchstwert. Das Materialgefüge bricht dabei in der Prüfmaschine nicht völlig auseinander und lässt sich gut analysieren.

Zusätzlich werden während der Druckfestigkeitsprüfung der Elastizitätsmodul und der Querdehnungsmodul mitbestimmt. Dazu werden auf die Prüfkörper Messpunkte aufgeklebt und mit einem Videoextensometer die Längs- und Querverformungen dieser Punkte für die spätere Berechnung des Elastizitätsmoduls und der Querdehnzahl aufgezeichnet.

3.4.1. Unbeschädigte Prüfkörper

Von den unbeschädigten Vibrosteinen Nr. 71 und 72 werden aus allen Stegen Prüfkörper entnommen. Bei den Mauersteinen Nr. 74 und 75 wird jeweils nur etwa der halbe Mauerstein für die Versuche verwendet. Die Mauersteine wurden im Vorfeld im 4-Punkt-Biegezugversuch geprüft und sind dementsprechend etwa in der Mitte gebrochen. Geprüft werden von den Mauersteinen:

- Nr. 71 10 Prüfkörper 40 x 40 x 80 mm
- Nr. 72 11 Prüfkörper 40 x 40 x 80 mm
- Nr. 74 5 Prüfkörper 40 x 40 x 80 mm
- Nr. 75 4 Prüfkörper 40 x 40 x 80 mm

3.4.1.1. Bruchverhalten

Das Bruchverhalten wird im Folgenden exemplarisch an einzelnen Prüfkörpern gezeigt und analysiert. Bei den Versuchen haben sich bei den Prüfkörpern immer wieder ähnliche Bruchmuster eingestellt.

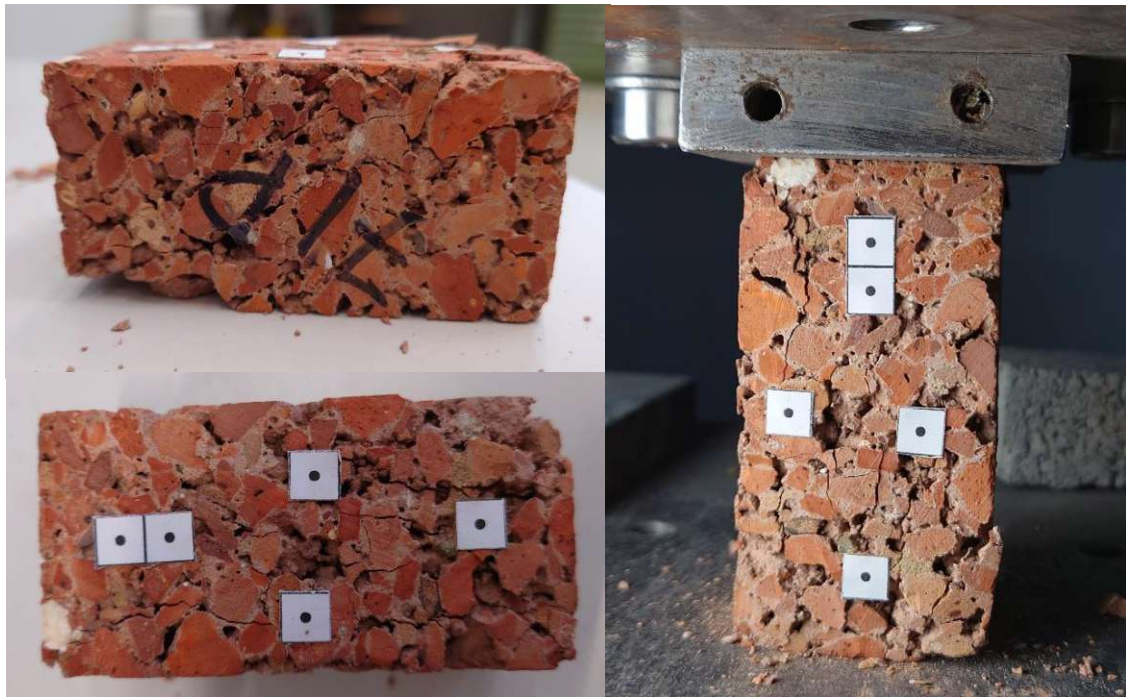


Abbildung 18: Bruchverhalten bei dem Prüfkörper 71P

Oben: Ansicht von der Seite mit der Erhebung an der Vorderseite

Unten: Rissbild an der Vorderseite des Prüfkörpers

Rechts: Prüfkörper in der Prüfmaschine nach Versuchsende

Quelle: Eigene Aufnahmen

Am in Abbildung 18 abgebildeten Prüfkörper „71P“ ist deutlich das bei den Kleinprüfkörpern übliche Bruchverhalten zu sehen. Der Prüfkörper weist nach Ende der Versuche fast gradlinige, von oben nach unten durch den Prüfkörper laufende Risse auf. Teilweise bricht das Gefüge in den Kontaktflächen zwischen dem Splitt und teilweise bricht der Ziegelsplitt selbst. Im oberen Bild der Abbildung 18 ist im mittleren Bereich des Prüfkörpers gut zu erkennen, wie der Prüfkörper leicht nach außen gewölbt ist und dass sich das Gefüge im Inneren gegeneinander verschoben haben muss. Im rechten Bild kann man zudem erkennen, wie die untere rechte Ecke des Prüfkörpers bereits abgeplatzt ist und die Risse durch das Gefüge und den Ziegelsplitt laufen.

Bezeichnung	Grundfläche [mm ²]	Max. Belastung [N]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
71P	1.625,23	11.799,60	7,26

Tabelle 9: Zusammenfassung der Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Prüfkörper 71P

Quelle: Eigene Darstellung



Abbildung 19: Bruchverhalten bei dem Prüfkörper 71B

Oben: Zustand nach der Entnahme aus der Prüfmachine

Unten: Blick in die Bruchfuge des Prüfkörpers nach dem Auseinanderbrechen

Rechts: Prüfkörper nach dem Druckversuch in der Prüfmachine

Quelle: Eigene Aufnahme

Der zweite näher betrachtete Prüfkörper ist der in Abbildung 19 gezeigte Nr. „71B“. Dieser Prüfkörper zeigt nach dem Druckversuch einen sehr deutlichen offenen Riss und ein Teil des Prüfkörpers hat sich bereits in der Prüfmachine gelöst (Abbildung 19 rechts). Dieser Riss verläuft vollständig durch den Prüfkörper und die beiden Teile lassen sich ohne Kraftaufwand auseinandernehmen (Abbildung 19 unten). Bei diesem Prüfkörper kann man gut das Bruchverhalten im Inneren erkennen. Die Risse bzw. die Bruchkante ziehen sich sowohl durch die Ziegelsplittkörner als auch durch die Zementmatrix in den Kontaktflächen. Es ist somit augenscheinlich zu einem Gesamtversagen des Ziegelsplittbetons gekommen und nicht zum Versagen einer einzelnen Komponente.

Bezeichnung	Grundfläche [mm ²]	Max. Belastung [N]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
71B	1.711,47	10.888,50	6,36

Tabelle 10: Zusammenfassung der Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Prüfkörper 71B

Quelle: Eigene Darstellung

Bei fast allen Prüfkörpern ist zu beobachten, dass das Versagen des Prüfkörpers schlagartig und ohne klare Anzeichen auftritt. Vereinzelt haben sich bei Prüfkörpern bereits einzelne kleine Risse an der Oberfläche gebildet, wobei der Bruch der Prüfkörper aber nicht unmittelbar danach erfolgt. Zum Teil treten diese Risse bereits in der Anfangsphase auf, zum Versagen der Prüfkörper kommt es erst viel später und unter deutlich höherem Druck.

Die meisten Prüfkörper versagen mit einem knirschenden Geräusch. Einzelne Prüfkörper hingegen versagen mit einem leichten hörbaren Knall. Dies ist insbesondere bei Prüfkörpern mit besonders hohen Druckfestigkeiten der Fall.



Abbildung 21: Prüfkörper „74F“ ist nach der Druckfestigkeitsprüfung in der Mitte gestaucht;
Quelle: Eigene Aufnahme



Abbildung 20: Prüfkörper „74G“ mit einzelnen Abplatzungen nach der Druckfestigkeitsprüfung im unteren Bereich
Quelle: Eigene Aufnahme

In Abbildung 21 und Abbildung 20 sind zwei weitere Bruchverhalten zu erkennen. Hier werden vor allem die Unterschiede deutlich, wie die Prüfkörper im Gefüge versagen. Während der Prüfkörper in Abbildung 21 nach der Druckbelastung im mittleren Bereich gestaucht ist und sich nach außen ausdehnt, treten am Prüfkörper in Abbildung 20 durch das Versagen im unteren Bereich nur einzelne Abplatzungen an den Kanten auf. Der übrige Prüfkörper scheint unbeschädigt zu sein und weist nur dünne Risse an der Rückseite auf.

3.4.1.2. Ergebnisse

Die Druckfestigkeit wird als Quotient der Höchstlast und der Grundfläche gebildet und in N/mm^2 angegeben. Die Mittelwerte der einzelnen Prüfkörper sind in **Tabelle 11** angeführt. Die Angabe des Variationskoeffizienten VK zeigt deutlich, dass die Druckfestigkeiten in den einzelnen Prüfungen großen Schwankungen unterworfen sind. Aus den hier geprüften Proben ergibt sich bei Betrachtung aller Messungen eine mittlere Druckfestigkeit von $f_{cm}=5,68 \text{ N/mm}^2$ bzw. eine charakteristische Druckfestigkeit von $f_{ck}=3,86 \text{ N/mm}^2$. Bei den Prüfkörpern „74F“ ($3,82 \text{ N/mm}^2$) und „75G“ ($3,28 \text{ N/mm}^2$) ist die Druckfestigkeit allerdings deutlich geringer als bei den übrigen Prüfkörpern. Beide Prüfkörper wurden an der Bruchkante des Biegezugversuches entnommen. Aufgrund der deutlichen Abweichung besteht bei diesen Prüfkörpern der Verdacht, dass das Gefüge Vorschädigungen aufweist. Sie werden daher für die Bestimmung der Druckfestigkeit nicht berücksichtigt. Mit den korrigierten Werten ergeben sich die Druckfestigkeiten zu $f_{cm}=5,91 \text{ N/mm}^2$ und $f_{ck}=4,59 \text{ N/mm}^2$.

Mauerstein Nr.	Grundfläche [mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	Höchstlast [N]	Druckfestigkeit		
				f_{cm} [N/mm ²] alle Werte	f_{cm} [N/mm ²] korrigiert	f_{ck} [N/mm ²] korrigiert
71	1.687,47	1.339,41	10.437,35	6,20	6,20	4,89
VK		3,40 %	14,12 %	14,53 %	14,53 %	
72	1.755,40	1.341,51	10.774,65	6,39	6,39	4,32
VK		2,09 %	29,55 %	25,38 %	25,38 %	
74	1.753,52	1.338,20	8.625,87	4,90	5,17	4,66
VK		2,11 %	20,50 %	18,24 %	15,89 %	
75	2.001,42	1.382,05	10.452,49	5,24	5,89	4,73
VK		3,64 %	27,80 %	28,30 %	25,17 %	
Gesamt		1.350,29	10.072,59	5,68	5,91	4,59
VK		3,05 %	8,40 %	11,03 %	7,81 %	

Tabelle 11: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung der unbeschädigten Prüfkörper in der Übersicht
Quelle: Eigene Darstellung

3.4.2. Vorgeschädigte Prüfkörper

Die Untersuchungen für die Prüfkörper aus den vorgeschädigten Vibrosteinen Nr. 11 und 16 werden in derselben Weise durchgeführt wie zuvor bei den unbeschädigten Prüfkörpern. Die beiden hier untersuchten Mauersteine wurden im Vorfeld dieser Diplomarbeit bereits als ganzer Mauerstein auf ihre Steindruckfestigkeit untersucht und sind somit bereits einmal bis zum Druckversagen belastet gewesen. Daher werden die beiden Prüfkörperserien getrennt von den übrigen betrachtet und auf ihre Resttragfähigkeit hin untersucht. Geprüft werden von den Mauersteinen:

- Nr. 11 10 Prüfkörper 40 x 40 x 80 mm
- Nr. 16 11 Prüfkörper 40 x 40 x 80 mm

3.4.2.1. Bruchverhalten



Abbildung 22: Bruchverhalten vom vorgeschädigten Prüfkörper "16N".

Oben: Vorderseite mit nur wenigen schwachen Rissen.

Unten: Seitenansicht mit einzelnen sichtbaren Rissen und Abplatzungen an den Kanten.

Rechts: Prüfkörper in der Prüfmaschine nach Versuchsende

Quelle: Eigene Aufnahme

Das Bruchverhalten verhält sich bei den Kleinprüfkörpern der beiden Vibrosteine aus dem Versuch zur Steindruckprüfung analog zu dem Verhalten der unbeschädigten Prüfkörper. Bei dem in Abbildung 22 betrachteten Prüfkörper „16N“ sind an der Oberfläche nur einzelne dünne Risse erkennbar, die sich wieder nahezu senkrecht durch das Material ziehen (Vergleichbar mit Prüfkörper 71P). Zudem sind einzelne kleine Abplatzungen an den Mauersteinkanten und -ecken zu sehen. Dieser Prüfkörper hat die geringste Druckfestigkeit der Prüfkörper aus dem Vibrostein Nr. 16. Im direkten Vergleich dazu weist der Prüfkörper „16Q“ in Abbildung 23 ein sehr ähnliches Bruchverhalten auf, hat aber gleichzeitig die höchste Druckfestigkeit der Kleinprüfkörper des Steins Nr. 16.

Bezeichnung	Grundfläche [mm ²]	Max. Belastung [N]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
16N	1.798,75	7.452,30	4,14
16Q	1.772,72	16.275,90	9,18

Tabelle 12: Zusammenfassung der Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Prüfkörper 16N und 16Q;

Quelle: Eigene Darstellung



Abbildung 23: Bruchverhalten vom vorgeschädigten Prüfkörper "16Q"

Oben: nahezu rissfreie Vorderseite

Unten: mehrere senkrechte Risse an der Seite des Prüfkörpers

Rechts: Prüfkörper in der Prüfmaschine nach Versuchsende

Quelle: Eigene Aufnahme

3.4.2.2. Ergebnisse

Entgegen der Annahme, dass die vorgeschädigten Prüfkörper niedrigere Druckfestigkeiten aufweisen, sind bei der Betrachtung der Ergebnisse nur wenige niedrigere Werte festzustellen. Die Ergebnisse der Prüfkörperserie 16 liegen bei der charakteristischen Druckfestigkeit mit einem $f_{ck}=4,30 \text{ N/mm}^2$ am unteren Ende des Wertebereichs der unbeschädigten Prüfkörper bzw. mit einem $f_{cm}=6,05 \text{ N/mm}^2$ gut eingebettet in der Mitte. Die Prüfserie 11 hat im direkten Vergleich mit der Serie 16 etwas schlechtere Werte und mit $2,95 \text{ N/mm}^2$ beim Prüfkörper „11P“ den insgesamt niedrigsten Wert aller Prüfungen. Bis auf drei Werte liegen jedoch alle Messungen über einer Druckfestigkeit von $4,0 \text{ N/mm}^2$. Sie liegt mit einem $f_{cm}=5,17 \text{ N/mm}^2$ und einem $f_{ck}=3,17$ aber auch nur geringfügig unterhalb der niedrigsten Werte der unbeschädigten Prüfkörper. Zusammen kommen die vorgeschädigten Prüfkörper somit auf eine mittlere Druckfestigkeit von $f_{cm}=5,91 \text{ N/mm}^2$ und eine charakteristische Druckfestigkeit von $3,45 \text{ N/mm}^2$.

Mauerstein Nr.	Grundfläche [mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	Höchstlast [N]	Druckfestigkeit	
				f _{cm} [N/mm ²]	f _{ck} [N/mm ²]
11	1.663,13	1.350,43	8.583,33	5,17	3,17
VK		2,20 %	29,45 %	29,82 %	
16	1.753,93	1.344,95	10.631,96	6,05	4,30
VK		3,09 %	31,13 %	30,26 %	
Gesamt		1.350,29	10.072,59	5,61	3,45
VK		2,90 %	10,66 %	7,86 %	

Tabelle 13: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung der vorgeschädigten Prüfkörper in der Übersicht;
Quelle: Eigene Darstellung

3.4.3. Zusammenfassung

Vergleicht man die gemittelten und charakteristischen Druckfestigkeitswerte der unbeschädigten mit den der vorgeschädigten Prüfkörper, lässt sich ein geringer Unterschied in den Druckfestigkeitswerten feststellen (Tabelle 14). Die Resttragfähigkeit der Prüfkörper zeigt, dass noch große Tragreserven nach dem Druckversagen des Vibrosteins in den Hauptstegen vorhanden sind. Daraus lässt sich ableiten, dass das Druckversagen des Vibrosteins konzentriert in den dünnen Stegbereichen aufgetreten sein muss und nicht verteilt über den Steinquerschnitt. Einem Aufsatz aus dem Forschungsprojekt ist dazu zu entnehmen: „Nach Prüfungsende waren äußerlich kaum Risse oder Abplatzungen zu sehen und die Mauersteine konnten im Ganzen aus der Prüfvorrichtung genommen werden. Die Steine wurden im Anschluss in mehrere Teile geschnitten. Im Vergleich zu einem noch nicht geprüften Vibrostein wurden beim Zerschneiden der Steine v. a. im Bereich der dünneren Stege kleine Risse festgestellt. Diese führten bei weiterer Auftrennung des Steins zu einem Zerfall des Gefüges in diesem Bereich.“ [32] Um zu der tatsächlichen Resttragfähigkeit in den Hauptstegen der Vibrosteine eine wirklich belastbare Aussage treffen zu können, ist der Umfang der Prüfung mit nur zwei vorgeschädigten Mauersteinen allerdings zu gering. Gerade angesichts der großen Streuung der Messwerte bei der Druckfestigkeit sind hierzu weitere umfangreiche Prüfungen an einer größeren Stichprobe erforderlich, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Ergebnisse des Mauersteins Nr. 16 zu hohe oder die des Mauersteins Nr. 11 deutlich zu geringe Werte aufweisen.

Mauerstein Nr.	Grundfläche [mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	Höchstlast [N]	Druckfestigkeit	
				f _{cm} [N/mm ²]	f _{ck} [N/mm ²]
unbeschädigt		1.350,29	10.072,59	5,91	4,59
VK		3,05 %	8,40 %	7,81 %	
vorgeschädigt		1.350,29	10.072,59	5,61	3,45
VK		2,90 %	10,66 %	7,86 %	

Tabelle 14: Zusammenfassung der gemittelten Ergebnisse der unbeschädigten und vorgeschädigten Kleinprüfkörper; Quelle: Eigene Darstellung

3.4.4. Vergleich mit der Steindruckfestigkeit der Vibrosteine

Aus dem Forschungsprojekt werden die dort gemessenen Steindruckfestigkeiten zur Verfügung gestellt. Dazu werden die ganzen Vibrosteine in der Prüfmaschine mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von 6 kN/s bis zum Druckversagen geprüft. Der Probenumfang beträgt zwölf Mauersteine. Der Vergleich der Ergebnisse der mittleren Druckfestigkeit erfolgt zwischen der Steindruckfestigkeit und der mittleren Druckfestigkeit der unbeschädigten Kleinprüfkörper.

	Kleinstwert	Höchstwert	Mittelwert	VK [%]
Steindruckfestigkeit [N/mm ²]	8,13	11,29	9,88	9,8
Druckfestigkeit Kleinprüfkörper f_{cm} [N/mm ²]	5,17	6,39	5,91	7,81
Differenz [%]	63,59	56,60	59,82	-

Tabelle 15: Steindruckfestigkeit und mittlere Druckfestigkeit Kleinprüfkörper im Vergleich;

Quelle: Eigene Darstellung, Daten Steindruckfestigkeit aus [32]

Im direkten Vergleich der Werte in Tabelle 15 ist klar ersichtlich, dass die hier entnommenen und untersuchten Kleinprüfkörpern eine deutlich niedrigere Druckfestigkeit erreichen als die tatsächliche Steindruckfestigkeit. Bei der mittleren Druckfestigkeit werden nur etwa 60 % der Steindruckfestigkeit erreicht. Die Verhältnisse bei den Kleinst- und Höchstwerten sind ähnlich.

Eine analytische Bestimmung der Steindruckfestigkeit von Vibrosteinen nur anhand von Kleinprüfkörpern ist mit diesen Ergebnissen nicht möglich. Allerdings können diese Werte als auf der sicheren Seite liegende Rechenwerte für die Nachrechnung des Mauerwerks verwendet werden. Da sie deutlich unter der Steindruckfestigkeit liegen, bieten sie einen hohen Sicherheitsfaktor.

3.5. Elastizitätsmodul und Querdehnzahl

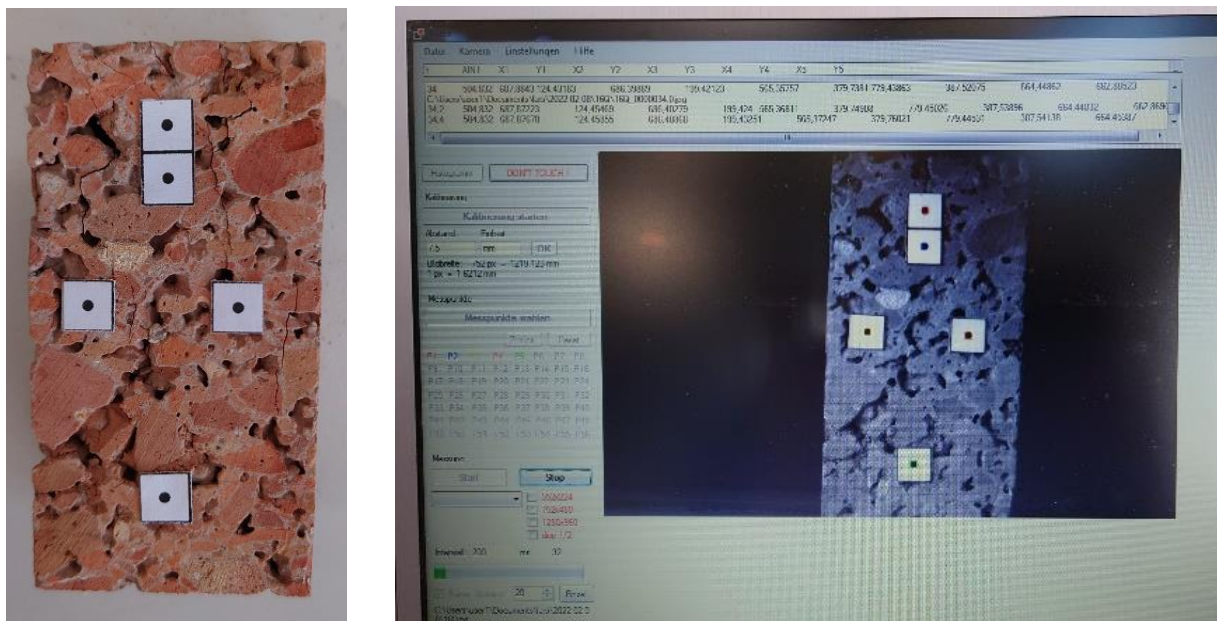


Abbildung 24 (links): Ansicht der auf den Kleinprüfkörpern aufgeklebten Messpunkte
(rechts): Bildschirmfoto des Videoextensometerprogramms (Videx) während der Messung

Quelle: Eigene Aufnahme

Zusammen mit der Druckfestigkeitsprüfung werden gleichzeitig der Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl bestimmt. Dazu werden die Verformungen an der Oberfläche mithilfe eines Videoextensometers und auf den Prüfkörpern aufgeklebten Messpunkten gemessen. Auf jeden Prüfkörper werden die Messpunkte nach dem in Abbildung 24 (links) gezeigten Schema jeweils mit einem Abstand von 1/6 der Prüfkörperbreite bzw. der Prüfkörperhöhe von der Außenkante angebracht. Auf der jeweils zweiten Achse liegen die Punkte in Prüfkörpermitte. Der doppelte Punkt an der oberen Kante dient zum Kalibrieren des Videoextensometers vor der Messung. Während der Druckbelastungsprüfung werden die Punkte konstant alle 0,2 Sekunden gemessen. Aus dem Messprotokoll kann später die Lageänderung der Punkte zueinander bestimmt werden und somit auch der Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl. Die Verwendung von Dehnmessstreifen ist bei dem

porösen Ziegelsplittbeton nicht zielführend, da durch das Aufkleben mit Klebstoff eine größere lokale Verfestigung in der Oberfläche erfolgt und die Messwerte verfälscht werden. Auch die hier angewendete Messmethode führt ebenso zu einem höheren Anteil an fehlerhaften Ergebnissen. Zurückzuführen ist dieses auf das Materialverhalten in dem ungleichmäßigen Gefüge und der inkonstanten Porenraumverteilung. Hierdurch kommt es teilweise zu negativen oder deutlich vom Mittelwert abweichenden Messungen und Ergebnissen, vgl. [32].

3.5.1. Elastizitätsmodul

Bestimmt wird der Elastizitätsmodul bei 1/3 der Höchstlast. In der Auswertung der Ergebnisse müssen alle berechneten Elastizitätsmodule einzeln geprüft werden. Bedingt durch die ungleichmäßig poröse Struktur des Ziegelsplittbetons und dem daraus resultierenden Materialverhalten kommt es bei einigen Werten wie erwähnt zu unplausiblen Ergebnissen. Diese Werte werden aus der Mittelwertbildung herausgenommen und nicht berücksichtigt. In der Einzelübersicht der Prüfkörperergebnisse im Anhang sind die Werte dennoch angeführt.

Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Anzahl	Kleinstwert	Höchstwert	Mittelwert	VK [%]
Mauerstein 11	8	1.405,22	6.891,59	2.647,44	63,79
Mauerstein 16	4	2.277,13	4.718,10	3.815,69	24,57
Gesamt				3.231,57	18,08
Mauerstein 71	7	1.665,88	6.524,75	4.295,17	41,17
Mauerstein 72	8	2.583,55	9.606,68	4.487,46	50,36
Mauerstein 74	3	2.631,05	5.230,87	3.974,18	26,75
Mauerstein 75	2	6.982,26	7.016,41	(6.999,34)	0,24
Gesamt				4.252,27	4,98

Tabelle 16: Zusammenfassung der Ergebnisse der Bestimmung des Elastizitätsmoduls mit Kleinprüfkörpern; Quelle: Eigene Darstellung

In Tabelle 16 wird bei der Mittelwertbildung der unbeschädigten Prüfkörper der Mauerstein 75 nicht berücksichtigt, da das Ergebnis zu stark von den übrigen abweicht und einen zu geringen validen Stichprobenumfang enthält. Im Mittelwert ergibt sich der Elastizitätsmodul für die unbeschädigten Prüfkörper zu $E = 4.252,27 \text{ N/mm}^2$ und bei den vorgeschädigten Prüfkörpern zu $E = 3.231,57 \text{ N/mm}^2$. Bei Nichtberücksichtigung von Mauerstein Nr. 75 weisen die unbeschädigten Prüfkörperserien nur eine sehr geringe Streuung auf. Bei den vorgeschädigten Prüfkörpern ist die Streuung größer, deckt sich aber mit den Unterschieden in der Druckfestigkeit der Prüfkörperserien.

3.5.2. Querdehnzahl

Die Querdehnzahl wird über die Querdehnung zwischen den beiden seitlichen Messpunkten im Verhältnis mit der Längsdehnung an den Kleinprüfkörpern bei 2/3 der Höchstlast bestimmt. Die Querdehnzahl ergibt sich dabei zu:

$$\nu = \frac{\Delta d/d}{\Delta l/l} \quad (3.6)$$

Der Ablauf bei der Messung und Prüfung der Werte ist identisch mit dem Vorgehen beim Elastizitätsmodul. Alle Ergebnisse werden einzeln geprüft. Die gebildeten Mittelwerte je Prüfkörperserie sind in Tabelle 17 zusammengefasst.

Querdehnzahl [-]	Anzahl	Kleinstwert	Höchstwert	Mittelwert	VK [%]
Mauerstein 11	6	0,11	0,39	0,30	37,05
Mauerstein 16	4	0,21	0,54	0,31	44,81
Gesamt vorgeschädigt				0,34	8,74
Mauerstein 71	4	0,32	0,50	0,39	16,33
Mauerstein 72	3	0,21	0,28	0,25	12,23
Mauerstein 74	1	0,24		0,24	-
Mauerstein 75	-			-	
Gesamt ungeschädigt				0,29	24,72
Gesamtmittelwert				0,31	20,23

Tabelle 17: Zusammenfassung der Ergebnisse der Bestimmung der Querdehnzahl mit Kleinprüfkörpern; Quelle: Eigene Darstellung

Während sich die Werte beim Elastizitätsmodul bei den unbeschädigten und vorgeschädigten Prüfkörpern unterscheiden, so liegen die Werte bei der Querdehnzahl in dieser Probe dicht beieinander. Daher kann für die Querdehnzahl ein Gesamtmittelwert von 0,31 gebildet und als maßgebender Wert herangezogen werden.

3.6. Biegezugfestigkeit

Zum Abschluss der Materialuntersuchungen an den Kleinprüfkörpern aus Ziegelsplitt soll die Biegezugfestigkeit ermittelt werden. Hierzu werden die stabförmigen Kleinprüfkörper in einem 3-Punkt-Biegezugversuch auf Biegung bis zum Bruch geprüft. Grundlage für die Versuche ist die ÖNORM EN 771-3:2015 [17] und die ergänzende Prüfnorm ÖNORM EN 772-6:2002 [19]. Abweichend von diesen Normen werden die Versuche als 3-Punkt-Biegezugversuch nach der ÖNORM EN 12390-5:2019 Anhang A [33] mit nur einem drückenden Rollenlager durchgeführt. Diese Anpassung ist erforderlich, da im Labor keine geeignete Prüfeinrichtung vorhanden ist. Zudem entsprechen die Prüfkörper mit einer Abmessung von $3 \times 3 \times 12 \text{ cm}^3$ nicht dem in der ÖNORM EN 771-3:2015 [17] geforderten Verhältnis $l_p/w_p > 10$. Diese Anforderung kann aus Gründen der Geometrie und der Gefügestruktur nicht eingehalten werden. Die Prüfkörper für die Biegezugversuche sind quer zur normalen Belastungsrichtung aus den Vibrosteinen herausgeschnitten. Die Rollenaufleger sind in einem Abstand von 10 cm angeordnet. Aufgrund der Steingeometrie ist es nicht möglich, die Anforderung an einen Auflagerabstand in 4-facher Prüfkörperhöhe einzuhalten.

Nach der ÖNORM EN 12390-5:2019 [33] berechnet sich die Biegezugfestigkeit zu:

$$f_{ct,fl} = \frac{3 * F_{ct} * l}{2 * w_p * h_p^2} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (3.7)$$

Dabei ist:

l Abstand der Rollenaufleger

Der Biegezug wird für die vorgeschädigten und die unbeschädigten Prüfkörper im folgenden Abschnitt nach der Formel (3.7) getrennt betrachtet und ausgewertet.

3.6.1. Unbeschädigte Prüfkörper

3.6.1.1. Bruchverhalten



Abbildung 25: Bruchbild von Prüfkörper "71J" unter Biegezugbelastung;

Quelle: Eigene Aufnahme

Das Bruchbild bei den unbeschädigten Prüfkörpern im Biegezugversuch ist allgemein sehr ähnlich. Die meisten Prüfkörpern zeigen vor dem Bruch keine sichtbaren Risse und brechen ohne Vorwarnung mit einem leisen und teils gut hörbaren Knacken. Die meisten Prüfkörper halten nach dem Bruch auf dem Prüfstand noch zusammen, wie in Abbildung 25 beim Prüfkörper „71J“ zu erkennen ist. Einzelne Prüfkörper geben beim Bruch ein lautes und schlagartiges Knacken von sich.

In der Bruchstelle ist bei den meisten Proben ersichtlich, dass der Bruch zum Großteil in der Zementleimfuge geschieht und nur einzelne Ziegelsplittkörner in der Bruchfuge brechen. Bei einzelnen Prüfkörpern hat sich das Bruchbild vollständig auf die Zementleimfuge beschränkt, andere haben einen etwas höheren gebrochenen Ziegelanteil in der Bruchfuge.

3.6.1.2. Ergebnisse

Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Anzahl	Kleinstwert	Höchstwert	Mittelwert	VK [%]
Mauerstein 71	5	2,35	2,53	2,46	2,97
Mauerstein 72	6	2,26	2,99	2,51	10,23
Mauerstein 74	2	2,36	2,57	2,47	4,24
Mauerstein 75	2	2,59	3,00	2,79	7,26
Gesamt $f_{ct,fl}$ (mit Mauerstein 75)				2,56	5,39
Gesamt $f_{ct,fl}$ (ohne Mauerstein 75)				2,48	0,97

Tabelle 18: Ergebnisse Biegezugfestigkeit von den unbeschädigten Prüfkörperserien;

Quelle: Eigene Darstellung

An den Ergebnissen in Tabelle 18 erkennt man gut die geringe Streuung der Biegezugfestigkeit. Einzig ein Prüfkörper bei der Steinserie Nr. 71 musste aus der Auswertung herausgenommen werden. Bedingt durch die inhomogene porige Materialstruktur des Ziegelsplittbetons kann es in einzelnen Proben zu deutlich vom Mittel abweichenden Porenraumanteilen kommen. Diese führen zu einer Zu- bzw. Abnahme der Prüfergebnisse. Daher werden in der Versuchsauswertung Prüfergebnisse, die vom Mittelwert klar abweichen, aus der Auswertung herausgenommen, da diese Proben für das Material nicht repräsentativ sind.

Für den Gesamtmittelwert werden zwei leicht unterschiedliche Ergebnisse ausgegeben, da die Steinserie Nr. 75 eine höhere Biegezugfestigkeit erreicht als die übrigen Prüfserien. Bedingt durch den geringen Probenumfang bei dieser Steinserie kann nicht sicher festgestellt werden, ob der im Vergleich zu den übrigen Steinen höhere Mittelwert von $2,79 \text{ N/mm}^2$ nur aus der Beprobung von höherfesten Proben heraus resultiert oder ob der Stein allgemein eine höhere Biegezugfestigkeit aufweist. Die Streuung ist bei beiden Ergebnissen nur gering. Für den unbeschädigten Ziegelsplittbeton wird daher auf der sicheren Seite liegend im Mittel eine Biegezugfestigkeit von $f_{ct,fl} = 2,48 \text{ N/mm}^2$ angenommen.

3.6.2. Vorgeschädigte Prüfkörper

3.6.2.1. Bruchverhalten

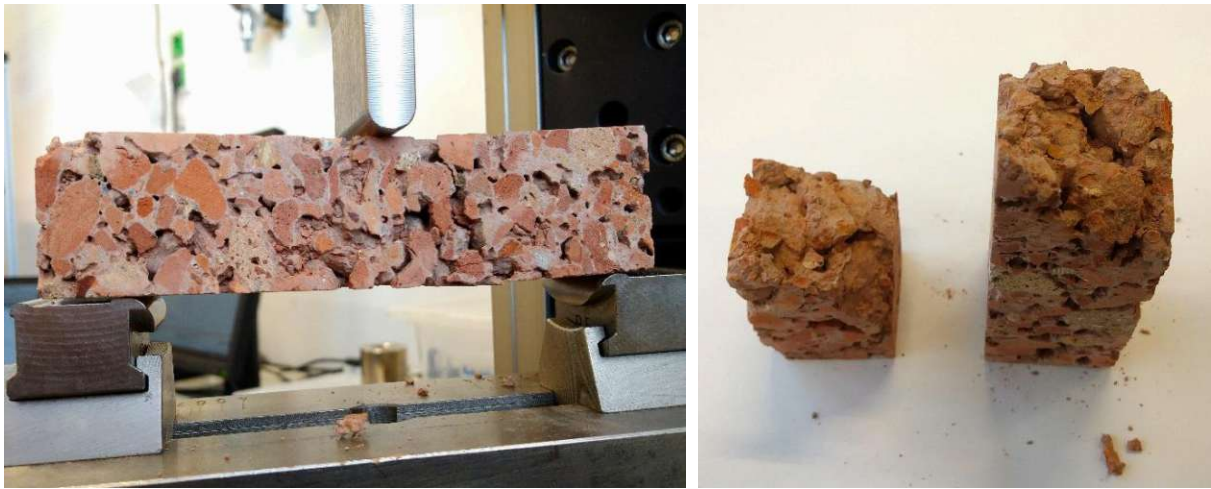


Abbildung 26: Bruchbild von Prüfkörper "11Q" unter Biegezugbelastung

Quelle: Eigene Aufnahme

Bei den vorgeschädigten Prüfkörpern sieht das Bruchbild deutlich anders aus als zuvor bei den unbeschädigten Prüfkörpern. Während die unbeschädigten Prüfkörper mittig und mit hörbarem Knacken brechen, liegt bei den vorgeschädigten Prüfkörpern der Bruch meistens außermittig näher zu den Auflagern hin, wie in Abbildung 26 zu erkennen ist. Zudem ist beim Bruch bei den meisten Prüfkörpern eher ein knirschendes Geräusch zu hören. Einzelne Prüfkörper haben sogar mehrere Risse, die sich in dem Prüfkörper ausbreiten (siehe an den roten Pfeilen in Abbildung 27).



Abbildung 27: Prüfkörper "16E" nach der Biegezugprüfung mit mehreren sichtbaren Rissen in der Bruchfuge; Quelle: Eigene Aufnahme

Die Ausbildung der Bruchfugen ist vergleichbar mit den Prüfkörpern der unbeschädigten Ziegelsplittbetonproben. Auch hier verläuft der Bruch hauptsächlich durch den Zementleim zwischen den einzelnen Ziegelsplittkörnern und nur vereinzelt sind Ziegelkörner in der Bruchfuge gebrochen.

3.6.2.2. Ergebnisse

Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Anzahl	Kleinstwert	Höchstwert	Mittelwert	VK [%]
Mauerstein11	3	0,87	1,36	1,20	30,85
Mauerstein 16	4	1,04	2,17	1,86	27,68
Gesamt $f_{ct,fl}$				1,53	27,59

Tabelle 19: Ergebnisse Biegezugfestigkeit von den vorgeschädigten Prüfkörperserien

Die Ergebnisse der Biegezugfestigkeit der vorgeschädigten Prüfkörper (Tabelle 19) ist deutlich niedriger und größeren Schwankungen ausgesetzt als die unbeschädigten Prüfkörperserien. Bedingt durch die porige Materialstruktur kann es lokal zu deutlichen Abweichungen beispielsweise im Grad der Vorschädigung kommen, welche jedoch nicht für die Grundstruktur des Ziegelsplittbetons repräsentativ sind. Bei den Versuchen an Kleinprüfkörpern führen diese in der Auswertung zu deutlich vom Mittelwert abweichenden Versuchsergebnissen. Einzelne sehr niedrige Werte bzw. hohe Ergebnisse werden daher bei der Auswertung herausgenommen. Dennoch weisen die Werte eine vergleichsweise hohe Streuung auf. Die Biegezugfestigkeit wird für die vorgeschädigten Prüfkörper im Mittel zu $f_{ct,fl} = 1,53 \text{ N/mm}^2$ angenommen.

3.6.3. Zusammenfassung

Über die Biegezugfestigkeit lässt sich zusammenfassend sagen, dass der Unterschied zwischen den unbeschädigten und den durch den Steindruckfestigkeitsversuch vorgeschädigten Prüfkörpern deutlich ist. Im Materialverhalten sind ein anderes Bruchmuster und Rissbild zu beobachten. Auch bei den Messwerten und Ergebnissen gibt es große Abweichungen. Die vorgeschädigten Prüfkörper haben im Mittel eine etwa 1 N/mm^2 geringere Biegezugfestigkeit als die unbeschädigten Prüfkörper und weisen außerdem eine viel größere Streuung bei den Messwerten auf.

3.7. Druckversuche mit Leichtmörtelfugen



Abbildung 28: Fertig vorbereitete und vermörtelte Prüfkörper

Quelle: Eigene Aufnahme

In diesem Kapitel soll der Einfluss der Mörtelfuge auf das Gesamttragverhalten des Ziegelsplittbetons im Mauerwerk untersucht werden. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Untersuchung, ob unterschiedliche Fugendicken einen merkbaren Einfluss auf die Druckfestigkeit des Baukörpers haben. Die Prüfungen werden nicht in einer Norm geregelt und der Versuchsablauf ist an die

Druckfestigkeitsprüfung der Kleinprüfkörper angelehnt. Für die Mörtelfugenversuche werden würfelförmige Kleinprüfkörper mit einem Leichtmörtel aufeinandergesetzt. Insgesamt entstehen auf diese Weise zwölf Prüfkörper mit zwei unterschiedlichen Mörtelschichtstärken. Verwendet wird hierzu ein moderner industrieller Leichtmörtel, welcher ähnliche Festigkeitswerte aufweist wie der Kalkmörtel der Nachkriegsjahre. Der hier verwendete „Baumit DuoLight Mörtel“ hat eine Druckfestigkeit von $> 3 \text{ N/mm}^2$ [34].

3.7.1. Prüfkörpervorbereitung

Mit dem Mauermörtel werden Fugenstärken von 10 mm und 15 mm zwischen zwei würfelförmigen Prüfkörpern mit etwa $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ hergestellt. Diese Fugenbreiten entsprechen den gängigen Lagerfugenstärken, die bei Wänden aus Vibrosteinen hergestellt wurden. Der Mörtel wird dazu nach Packungsanleitung [34] angemischt. Das Mischungsverhältnis beträgt dabei 500 g trockener Mörtel und 400 g Wasser und wird mit einem Quirl für 3 bis 5 Minuten vermischt. Die Prüfkörper werden mit einer Sprühflasche mit Wasser angesprüht und so angefeuchtet, um zu verhindern, dass die Prüfkörper dem Mörtel übermäßig viel Wasser entziehen und er nicht seine volle Festigkeit erreicht. Anschließend wird der Mörtel auf die beiden zu verbindenden Prüfkörper an jeweils einer Seite vollflächig aufgetragen und die Prüfkörper werden mit den Mörtelflächen aneinandergedrückt, bis die gewünschte Fugenstärke erreicht ist. Der überschüssige Mörtel wird von der Oberfläche entfernt, die vermörtelten Prüfkörper auf einer ebenen Unterlage abgelegt und die Ober- und Unterseite noch einmal parallel zueinander ausgerichtet (Abbildung 28). Die vermörtelten Prüfkörper werden nach Fertigstellung mit einem feuchten Tuch für 24 Stunden abgedeckt und anschließend 28 Tage bis zur Prüffestigkeit bei Raumluftbedingungen gelagert.

3.7.2. Druckversuche

Die hergestellten Prüfkörper werden wie zuvor die Ziegelsplittprüfkörper zuvor in der Prüfmaschine auf ihre Druckfestigkeit geprüft. Gleichzeitig wird versucht, mit dem Videoextensometer die Längsverschiebung der beiden Prüfkörper zueinander zu messen.

Druckfestigkeit Mörtelfuge [N/mm ²]	Anzahl	Kleinstwert	Höchstwert	Mittelwert	VK [%]
Fugenstärke 15 mm	6	2,53	4,43	3,47	16,75
Fugenstärke 10 mm	6	2,92	4,97	4,01	15,26

Tabelle 20: Übersicht Ergebnisse Druckfestigkeit der Mörtelfugen; Quelle: Eigene Darstellung



Abbildung 29: Prüfkörper Nr. 6 mit 15 mm Mörtelfuge nach der Druckbelastungsprüfung mit deutlich sichtbaren Rissen durch den gesamten Prüfkörper; Quelle: Eigene Aufnahme

Die Prüfungen mit den Mörtelfugen zeigen klar, dass durch die Ausbildung einer Mörtelfuge eine geringere Druckfestigkeit als bei reinen Ziegelsplittbetonprüfkörpern erreicht wird (**Tabelle 20**). Allgemein sind die Druckfestigkeiten bei der 10 mm Fuge im Mittel etwa $0,5 \text{ N/mm}^2$ kleiner als bei den reinen Ziegelsplittbetonprüfkörpern. Die Prüfkörper mit 15 mm Fuge haben eine im Mittel nochmals um $0,5 \text{ N/mm}^2$ reduzierte Druckfestigkeit. Die Ergebnisse bilden nicht die Mauerwerksdruckfestigkeit ab, sondern sollen die Auswirkung beziehungsweise den Einfluss von unterschiedlichen Fugenstärken auf die Druckfestigkeit zeigen. Erkennbar ist bei den untersuchten Prüfkörpern, dass sich die Risse und Abplatzungen durch den gesamten Prüfkörper ziehen und sowohl die Ziegelsplittbetonwürfel als auch die Mörtelfuge betreffen (Abbildung 29 und Abbildung 30). Anders als bei üblichem Mauerwerk, bei dem das Versagen im Mauerstein infolge Querkzugspannungen auftritt [35], ist hier während der Versuche deutlich erkennbar, dass die Prüfkörper zuerst in der Mörtelfuge versagen. Durch die Stauchung in diesem Bereich breiten sich die Kräfte in die Ziegelsplittbetonprüfkörper aus und führen zu weiteren Schäden am Ziegelsplittbetonstein. In Abbildung 31 ist bei dem Mörtelprüfkörper Nr. 5 die Mörtelfuge beim Druckversagen von vormals 15 mm auf nur noch etwa 8 mm Reststärke gestaucht worden. Die darauffolgende schlagartige Druckverteilung hat im unteren Ziegelsplittbetonwürfel (in Abbildung 31 der rechte Würfel) zu Rissen geführt. Teilweise, wie zum Beispiel in Abbildung 31, liegen vermutlich auch Vorschädigungen im Gefüge der würfelförmigen Kleinprüfkörper oder der Mörtelfuge vor, die zu einem lokalen Versagen geführt haben.



Abbildung 30: Prüfkörper 11 mit 10 mm Mörtelfuge nach der Druckbelastungsprüfung mit großen Abplatzungen am unteren Ziegelsplittbetonwürfel und dem Mörtel;
Quelle: Eigene Aufnahme



Abbildung 31: Prüfkörper 5 mit klar erkennbarer Stauchung der vormals 15 mm starken Mörtelfuge auf nur noch ca. 8 mm;
Quelle: Eigene Aufnahme

3.8. Zusammenfassung der experimentellen Materialuntersuchungen

Nach Abschluss aller Materialuntersuchungen an dem Ziegelsplittbeton der Vibrosteine werden die Ergebnisse zusammengefasst und mit einem Normalbeton C20/25 verglichen. Die Ergebnisse können auf diese Weise eingeordnet und interpretiert werden.

Bezeichnung	Rohdichte	Wasseraufnahme	
	$\rho_{g,p}$ [kg/m ³]	$C_{w,s}$ [g/m ² *s]	$W_{q,w}$ [kg/m ² Vh]
Ziegelsplittbeton	1.350,29	9,14	1,65 - 2,26
Beton C20/25 [36]	2.400 – 2.600	-	0,70 [31]

Tabelle 21: Übersicht und Zusammenfassung der Ergebnisse Rohdichte und Wasseraufnahme;
Quelle: Eigene Darstellung, Daten Beton C25/30 aus [36]

Im Vergleich der Rohdichten liegt der Ziegelsplittbeton mit $\rho_{g,p} = 1.350,29 \text{ kg/m}^3$ deutlich im Bereich der Leichtbetone (Grenze für Leichtbetone bei 2.000 kg/m^3). Ein Beton C25/30 (Normalbeton) liegt mit einer Rohdichte von 2.400 bis 2.600 kg/m^3 deutlich darüber (Tabelle 21). Allerdings ist der Porenraumanteil im Normalbeton deutlich geringer und beschränkt sich auf Mikroporen im Beton. Grobe Poren im Gefüge wie beim Ziegelsplittbeton sind unerwünscht. Im Vergleich der Wasseraufnahmen gibt es nur bei dem Wasseraufnahmekoeffizienten nach ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [23] eine Vergleichsmöglichkeit mit anderen Materialien. Ziegelsplittbeton liegt mit einem $W_w=2,26 \text{ kg/m}^2\text{Vh}$ bei den kleinen würfelförmigen und einem $W_q=1,65 \text{ kg/m}^2\text{Vh}$ bei den quaderförmigen Prüfkörpern deutlich höher als der Normalbeton mit einem $W_w=0,70 \text{ kg/m}^2\text{Vh}$. Beide Materialien sind als saugfähige Baustoffe zu deklarieren und sollten nicht ungeschützt im Kontakt mit Wasser eingesetzt werden.

Bezeichnung	Druckfestigkeit		Biegezugfestigkeit	Elastizitätsmodul	Querdehnzahl
	f_{cm} [N/mm ²]	f_{ck} [N/mm ²]	f_{ctm} [N/mm ²]	E [N/mm ²]	ν [-]
unbeschädigt	5,91	4,59	2,48	4.252,27	0,29
vorgeschädigt	5,61	3,45	1,53	3.231,57	0,34
Ganzer Mauerstein [32]	9,88	8,23	1,48 (Nettoquerschnitt)	-	-
Beton C20/25 [36]	28	20	2,20	30.000	0,20 (Annahme)

Tabelle 22: Übersicht und Zusammenfassung der Ergebnisse Druckfestigkeit, Biegezug, Elastizitätsmodul und Querdehnzahl;
Quelle: Eigene Darstellung, Daten Beton C25/30 aus [36]

Während die zuvor betrachteten Werte der Rohdichte und Wasseraufnahmekoeffizienten unabhängig von der Belastungsgeschichte der Prüfkörper ist, müssen bei den Werten aus Tabelle 22 zwischen den unbeschädigten und den vorgeschädigten Prüfkörpern im Ergebnis unterschieden werden. Zusätzlich werden die Ergebnisse aus den Versuchen mit den ganzen Steinen zum Vergleich herangezogen. Die Werte werden intern vom Forschungsprojekt für die Diplomarbeit zur Verfügung gestellt und hierfür ausgewertet [2].

In den hier durchgeführten Laborversuchen an den Kleinprüfkörpern hat sich die mittlere Druckfestigkeit bei den unbeschädigten Prüfkörpern zu $f_{cm}=5,91 \text{ N/mm}^2$ und bei den vorgeschädigten zu $f_{cm}=5,61 \text{ N/mm}^2$ ergeben. Damit beträgt die Druckfestigkeit der Kleinprüfkörper nur etwa 60 % der

tatsächlichen mittleren Steindruckfestigkeit. Bei der charakteristischen Druckfestigkeit ist das Verhältnis ähnlich. Berechnet wird die Steindruckfestigkeit mit dem Bruttoquerschnitt der Vibrosteine. Hieraus lässt sich ableiten, dass die Steinstruktur mit den zahlreichen Hohlräumen im Mauerstein und die Anordnung der Stege eine deutliche Verbesserung der Tragfähigkeit des Ziegelsplittbetons bewirkt. Aus den hier ermittelten Ergebnissen ergibt sich ein Umrechnungsfaktor von 1,65 [-] bei der mittleren Druckfestigkeit und von 1,80 [-] bei den charakteristischen Druckfestigkeitswerten. Allerdings hat der Umrechnungsfaktor keine allgemeine Gültigkeit, da er von vielen Faktoren wie zum Beispiel Ziegeldruckfestigkeit, Form, Zementzuschlag und Wasser-Zement-Wert abhängig ist. Er kann aber als Vergleichsfaktor zu anderen Vibrosteintypen herangezogen werden. Dazu sind weitere Versuchsreihen erforderlich.

Im Vergleich zum Ziegelsplittbeton liegt die Druckfestigkeit eines Normalbetons C20/25 bei einem Wert von $f_{cm}=28 \text{ N/mm}^2$ bzw. $f_{ck}=20 \text{ N/mm}^2$.

Bei der Biegezugfestigkeit konnte mit den Kleinprüfkörpern eine mittlere Biegezugfestigkeit von $f_{ctm} = 2,48 \text{ N/mm}^2$ für die unbeschädigten Kleinprüfkörper ermittelt werden. Aus den Biegezugversuchen der ganzen Mauersteine ergibt sich jedoch nur eine Biegezugfestigkeit von $f_{ctm} = 1,48 \text{ N/mm}^2$ im Nettoquerschnitt. Eine Umrechnung ist aus vielerlei Gründen nicht möglich. Zum einen sind die Versuche an den ganzen Mauersteinen mit einem 4-Punkt-Biegezugversuch durchgeführt worden, zum anderen spielen verschiedene Faktoren der Lochverteilung, eventuelle Vorschädigungen der Mauersteine und Besonderheiten im Materialverhalten von Leichtbeton eine Rolle. Zudem sind in beiden Versuchsreihen unterschiedliche w/h Verhältnisse vorhanden gewesen. Daher ist eine Umrechnung hier nicht möglich bzw. kann kein Umrechnungsfaktor gebildet werden, vgl. [32].

Bei den Werten der vorgeschädigten Kleinprüfkörper liegt die mittlere Biegezugfestigkeit mit $f_{ctm} = 1,53 \text{ N/mm}^2$ deutlich unter denen der unbeschädigten. Hier ist deutlich eine Vorschädigung der Prüfkörper erkennbar [32].

Bei der Bestimmung des Elastizitätsmoduls und der Querdehnzahl unterscheiden sich die Werte ebenfalls deutlich voneinander. Der Elastizitätsmodul liegt bei den unbeschädigten Prüfkörpern im Mittel bei $E=4.252,27 \text{ N/mm}^2$, während es die vorgeschädigten Prüfkörper nur ein $E = 3.231,57 \text{ N/mm}^2$ erreichen. Im direkten Vergleich dazu liegt der Elastizitätsmodul bei Normalbeton C20/25 bei etwa $E = 30.000 \text{ N/mm}^2$. Der große Porenraum im Ziegelsplittbeton lässt große elastische Verformungen im Materialgefüge zu, was zu dem im Vergleich niedrigen Elastizitätsmodul führt. Die Querdehnzahl ergibt sich bei den Proben zu $\nu = 0,29$ [-] für die unbeschädigten und $\nu = 0,34$ [-] für die vorgeschädigten Prüfkörper. Bei Normalbeton wird vereinfacht für umgerissene Querschnitte eine Querdehnzahl von 0,20 [-] angenommen. Zu bedenken ist aber, dass die mit dem Videoextensometer ermittelten Verformungen einer hohen Fehlerrate unterworfen und daher viele Werte ungültig bzw. fehlerhaft waren. Dieses hängt mit der Materialstruktur und den großen ungleichmäßigen Porenräumen zusammen, die die Messung mit diesem Messverfahren erheblich beeinflusst haben.

4. Reproduktion des Ziegelsplittbetons

Die genaue Zusammensetzung der hier untersuchten Vibrosteine ist nicht mehr bekannt und kann nur durch detaillierte Untersuchungen ermittelt werden. Neben der Zusammensetzung und dem Verhältnis zwischen Porenanteil, Ziegelsplittzuschlägen und Bindemittelgehalt spielt auch der Wasser-Zement-Wert eine große Rolle bei der Druckfestigkeit des Ziegelsplittbetons. Der Wasser-Zement-Wert kann allerdings nicht nachträglich ermittelt beziehungsweise auf ihn rückgeschlossen werden. Daher ist selbst mit detaillierten Untersuchungen nur eine Annäherung an den Ziegelsplittbeton der Vibrosteine möglich.

Betrachtet man die Querschnitte in Abbildung 9 (Seite 18), so bekommt man den Eindruck, dass die Zusammensetzung des Ziegelsplittbetons damals nicht ganz so einheitlich und gleichmäßig war, wie es heute bei Beton und Mauersteinen der Fall ist. Gleichzeitig stellt sich die Frage, welchen Einfluss die einzelnen Materialparameter wie Sieblinie, Korngrößenzusammensetzung und Zementgehalt auf den Ziegelsplittbeton haben. Um der Rezeptur der hier untersuchten Vibrosteinen näher zu kommen und ein Gefühl für den Einfluss der einzelnen Materialparameter zu bekommen, soll sich der Zusammensetzung auf experimentellem Wege angenähert werden.

4.1. Vergleich der Zusammensetzung verschiedener Ziegelsplittbetone

Aus den bisherigen Recherchen zu den Vibrosteinen ist bekannt, dass beim Ziegelsplittbeton vielfach Einkorngrößen als Zuschlag verwendet wurden [6] und die Vibrosteine einen großen Spielraum bei der verwendeten Zementmenge zwischen 130 und 200 kg/m³ hatten. In anderen Quellen wiederum wird für Ziegelsplittbetonsteine eine Zusammensetzung aus verschiedenen Korngrößen verwendet. Solche Sieblinien wurden auch bei den zuvor untersuchten Vibrosteinen verwendet, die die Basis der Reproduktionsversuche bilden. Die weiteren Versuche sind auf Grundlage von visuellen Beobachtungen und zwei Textquellen entstanden, die Fachzeitschrift „Der Aufbau“, herausgegeben von der Stadtbauverwaltung Wien und die Veröffentlichung „Ziegelsplittbeton – Festigkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung“ des deutschen Ausschusses für Stahlbeton aus dem Jahr 1952 [37].

Neben Berichten zum allgemeinen Wiederaufbau Wiens wurden in der Fachzeitschrift „Der Aufbau“ auch einige der Versuchs- und Forschungsergebnisse bezüglich der Ziegelsplittbetonsteine in Wien veröffentlicht. Die Informationen und Erkenntnisse aus den Veröffentlichungen sind bereits in Kapitel „2.1.2.3 Herstellung“ dargelegt. Aus diesen Publikationen ist bekannt, dass in Wien für Ziegelsplittbeton vorzugsweise Einkorngrößen in den Siebungen 1 bis 3 mm, 3 bis 7 mm und 7 bis 15 mm verwendet wurden. Für Mauersteine nach dem schwedischen Patent wurde hingegen eine Sieblinie von 1 bis 10 mm verwendet. Der Zementanteil soll allgemein bei 130 bis 200 kg/m³ gelegen haben [6]. Allerdings ist nicht vollumfänglich bekannt, von welchen Faktoren die verwendete Zementmenge abhängig war. Dabei beeinflusst der Zementgehalt im Ziegelsplittbeton maßgeblich die Festigkeit des Materialgefüges. Über den tatsächlich verwendeten Zementgehalt enthalten die vorliegenden Zulassungen von Ziegelsplittbetonsteinen aus Wien keine weiteren Hinweise oder Informationen.

In Berlin wurden im Auftrag des deutschen Ausschusses für Stahlbeton in den Jahren 1949 bis 1951 umfangreiche Versuche zu den Festigkeitseigenschaften von Ziegelsplittbeton in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung durchgeführt und 1952 veröffentlicht, vgl. [37]. In dieser Veröffentlichung wurde jedoch kein poriger Ziegelsplittbeton untersucht, stattdessen lag der Fokus der Untersuchungen auf Betonen mit einem dichten Gefüge. Diese Betone sind in ihrer Struktur vergleichbar mit Normalbeton. In den Untersuchungen der Veröffentlichung wurden die einzelnen Komponenten des Ziegelsplittbetons variiert und miteinander verglichen. Dazu wurde eine Vielzahl an Sieblinien mit verschiedenen Zementgehalten und Wasser-Zement-Gehalten beprobt, um detailliertere Erkenntnisse

über den genauen Einfluss der einzelnen Parameter auf die Festigkeit zu bekommen. Insgesamt wurden im Hauptversuch sieben Sieblinien und fünf unterschiedliche Zementgehalte kombiniert und an Prüfkörpern (Würfel $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$) untersucht. Damit wurden mittlere Druckfestigkeiten zwischen 45 und 211 kg/cm^2 (bzw. $4,5$ und $21,1 \text{ N/mm}^2$) erreicht. Darüber hinaus wurden verschiedene Zusammensetzungen der Zuschlagsstoffe aus unterschiedlichen Ziegelsplittsorten mit Quarzsand oder Trümmersand untersucht. Diese sind für die folgenden Versuche jedoch nicht relevant.

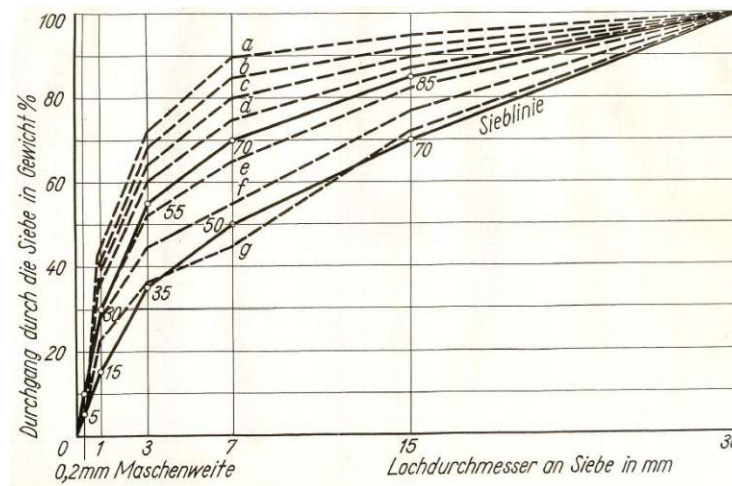


Abbildung 32: in Berlin untersuchte Sieblinien für Ziegelsplittbeton mit dichtem Gefüge; Quelle: [36]

4.2. Versuche zur Herstellung des Ziegelsplittbetons

Vorbereitend für die Herstellung des Ziegelsplittbetons muss zuerst Ziegelsplitt hergestellt werden. Hierzu wurden vom Hochbauinstitut alte Vollziegel zur Verfügung gestellt, welche im Zeitraum zwischen 1870 und 1890 hergestellt und in einem Wiener Gründerzeithaus verbaut wurden. Damit sind sie mit jenen Ziegeln vergleichbar, die in den Nachkriegsjahren für die Herstellung von Ziegelsplittbeton Verwendung fanden.

Für die Versuchsreihen werden die Ziegel mit einem Hammer grob zerkleinert und anschließend in einem Backenbrecher mit einem Größtkorn von etwa 20 mm gebrochen. Der Ziegelbruch wird im nächsten Schritt von Hand in die einzelnen Korngrößen gesiebt. Hierzu werden Siebe mit $1, 2, 4, 8, 11$ und 16 mm Korndurchgang verwendet. Der gesiebte Ziegelsplitt wird nach Korngrößen bis zum Zusammenstellen der Sieblinien getrennt gelagert.



Abbildung 33: Siebung des selbstgebrochenen Ziegelsplitts;
Quelle: Eigene Aufnahme

Der letzte vorbereitende Schritt ist die Ermittlung der Schüttdichte der einzelnen Korngrößen. Hierzu werden in einem Messglas mit 300 ml Volumen (Leergewicht 125,69 g) aus jeder Sieblinie drei Proben mit einem locker geschütteten Volumen von 200 ml abgemessen. In der zweiten Wägungsserie wird das Prozedere im selben Glas mit einem Volumen von 300 ml wiederholt. Die Proben werden gewogen und damit die jeweilige Schüttdichte berechnet (Tabelle 23).

[kg/dm ³]	0-1 mm	1-2 mm	2-4 mm	4-8mm	8-11 mm	11-16 mm	>16mm
Rohdichte	1,013	0,733	0,733	0,705	0,695	0,695	0,638

Tabelle 23: Schüttdichten vom gebrochenen Ziegelsplitt in kg/dm³ bzw. g/cm³

In den Versuchen wird ein Portlandzement CEM I 42,5 R der Firma Probau® [38] verwendet. Der Wasser-Zementgehalt beträgt in allen Versuchsserien $w/z=0,60$ [-]. Zusätzlich wird der Ziegelsplitt mit 22 Masseprozent Wasser vorgenässt. Der Wert ist aus den in Berlin durchgeführten und dokumentierten Versuchsreihen, vgl. [37] Tafel 7, ermittelt worden und wird hier für alle folgenden Versuche festgelegt. Das Anmachwasser soll verhindern, dass die stark saugenden Ziegel dem Zement das Hydrationswasser entziehen und dadurch ein Vertrocknen des Betons verursachen. Gleichzeitig führt das Vorwässern zu einer besseren Verbindung zwischen dem Zement und dem Ziegelsplitt.

4.2.1. Serie 1

4.2.1.1. Zusammensetzung, Sieblinie und Herstellung

Auf Basis der Recherchen wird die erste Serie eng an die Versuche und Sieblinien aus Berlin angelehnt. Hergestellt werden drei Probekörper mit 15 x 15 x 15 cm³ Außenabmessung mit drei unterschiedlichen Sieblinien. Die Sieblinien sollen dabei an die verschiedenen Querschnitte in Abbildung 9 angepasst werden. Daher werden eine feinere, eine mittlere und eine grobe Kornverteilung mit den prozentualen Anteilen aus Tabelle 24 und der Sieblinie in Abbildung 34 gebildet. In der Serie 1 wird der Ziegelsplittbeton mit 200 kg/m³ Zement angemischt.

	0-1 mm	1-2 mm	2-4 mm	4-8mm	8-11 mm	11-16 mm	>16mm	Gesamt
101	10,0%	20,0%	25,0%	20,0%	15,0%	10,0%	0,0%	100%
102	10,0%	17,5%	15,0%	17,5%	20,0%	15,0%	5,0%	100%
103	5,0%	10,0%	12,5%	15,0%	22,5%	25,0%	10,0%	100%

Tabelle 24: Prozentuale Zusammensetzung der Sieblinien für Serie 1; Quelle: Eigene Darstellung

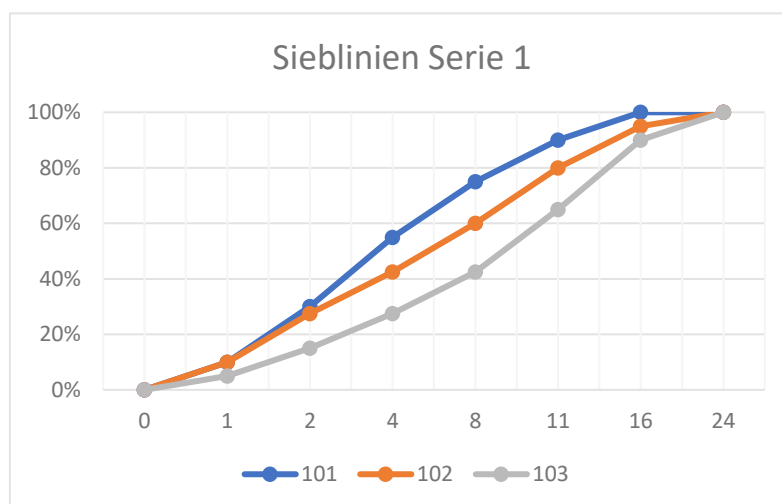


Abbildung 34: Sieblinien der Serie 1 grafisch dargestellt;
Quelle: Eigene Darstellung

Das Anmischen des Ziegelsplittbetons läuft in drei Schritten ab. Zuerst werden die Sieblinien aus den einzelnen Komponenten zusammengemischt. Hierzu werden die einzelnen prozentualen Anteile mit dem zu betonierenden Volumen (Würfel $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$), einem Erhöhungsfaktor zum Berücksichtigen des Zusammenwirkens der einzelnen Korngrößen im Korngerüst und dem Rohgewicht der jeweiligen Korngröße multipliziert (4.1). Das Volumen der hergestellten Probewürfel beträgt dabei $V_p = 3,4 \text{ dm}^3 = 0,0034 \text{ m}^3$. Der Erhöhungsfaktor, um das Zusammenspiel der einzelnen Korngrößen beim Mischen und Verdichten zu berücksichtigen, ermittelt sich empirisch zu $Q_p = 1,40 [-]$ (in der ersten Probe 103 nur zu 1,30 angenommen). Zusammen berechnet sich das jeweilige Massegewicht der einzelnen Korngrößen zu:

$$M_{p,i} = V_p * Q_p * V_i * \rho_{sch,p,i} [kg] \quad (4.1)$$

Die so berechneten Massen der einzelnen Anteile der Sieblinie werden abgewogen und vermischt. Zu dem Ziegelsplitt wird das Anmachwasser (22 Masseprozent) hinzugegeben. Nach gutem Durchmischen wird der feuchte Ziegelsplitt 15 Minuten zum Durchziehen stehen gelassen.



Abbildung 35: Links: Ziegelsplittbeton der Serie 1 nach dem Anmischen

Rechts: Ziegelsplittbeton in den Probewürfelformen nach dem Einfüllen.

Linke Form: Sieblinie 103, rechte Form: Sieblinie 102

Quelle: Eigene Aufnahmen

In der Zwischenzeit wird in einem extra Gefäß für den zweiten Schritt die Zementmenge abgewogen und mit Wasser zu einem Zementleim angemischt und verrührt, bis sich der Zement vollständig im Wasser löst. Der homogene Zementleim wird dann zu dem angefeuchteten Ziegelsplitt gegeben und von Hand gut vermengt. Dabei wird darauf geachtet, dass alle Ziegelkörner allseitig von Zementleim ummantelt sind und keine Klumpen von Ziegelsplitt ohne Zementleim in der Mischung übrig sind (Abbildung 35 links).

Im dritten und letzten Schritt wird der Ziegelsplitt in die vorbereiteten Schalungen eingefüllt und auf einem Vibrationstisch gut verdichtet. Das Befüllen der Formen erfolgt in drei Stufen. Zuerst wird die untere Hälfte eingefüllt und verdichtet, dann die Form bis etwa $\frac{3}{4}$ aufgefüllt und anschließend der Rest in die Form bis zur Oberkante eingefüllt und verdichtet. Am Ende wird die Oberfläche geglättet und die Formen mit einem feuchten Tuch abgedeckt. Bei dem Probekörper Nr. 103 reicht die hergestellte Ziegelsplittbeton-Mischung nicht aus, um die Formen vollständig zu füllen. Daher ist dieser Probewürfel etwas kleiner als die übrigen (Abbildung 35 rechts).

Die erste Serie wird nach 24 Stunden ausgeschalt und anschließend weitere 6 Tage unter einem feuchten Tuch gelagert. Die weitere Lagerung bis zum Erreichen der Prüffestigkeit nach 28 Tagen erfolgt bei Raumluftbedingungen.

Die Probewürfel werden nach 28 Tagen Lagerung in zwei Prüfkörpermaße zugeschnitten, $3 \times 3 \times 12 \text{ cm}^3$ für die Biegezugversuche und $4 \times 4 \times 8 \text{ cm}^3$ für die Druckfestigkeitsversuche. Dabei

werden die Außenseiten der Probewürfel mindestens 5 mm breit abgeschnitten, um keine direkten Schalungskanten zu haben. An der Oberseite wird etwa 1 cm abgeschnitten, damit alle Prüfkörper für den Ziegelsplittbeton repräsentativ und vergleichbar sind. An den Schal- und Oberkanten kann es zu geringerer oder erhöhter Verdichtung oder zu einem schlechten Gefügeverbund kommen.

Aus den Probewürfeln der Serie 1 werden geprüft:

- 101	6x	4 x 4 x 8 cm ³	- 102	6x	4 x 4 x 8 cm ³
	3x	3 x 3 x 12 cm ³		3x	3 x 3 x 12 cm ³
- 103	6x	4 x 4 x 8 cm ³			

4.2.1.2. Optisches Ergebnis und Zuschnitt



Abbildung 36: Probewürfel 102 (links) und 101 (rechts) nach dem Ausschalen;

Quelle: Eigene Aufnahme

Nach dem Ausschalen der Prüfkörper erfolgt eine erste optische Analyse. In Abbildung 36 sind die beiden Probewürfel 102 (links) und 101 (rechts) kurz nach dem Ausschalen zu sehen. Der Probewürfel 102 hat äußerlich eine gleichmäßige porige Struktur, so wie sie beim Ziegelsplittbeton erwünscht ist. Bei dem Probewürfel 101 erkennt man äußerlich bereits, dass sich im unteren Steinbereich Feinanteile abgesetzt haben und hier offenbar ein dichtes Betongefüge entstanden ist. Der Probewürfel 103 (hier nicht abgebildet) ist äußerlich vergleichbar mit dem Probewürfel 101.



Abbildung 37: Querschnitt durch die drei Proben der Serie 1. Links: 101, Mitte: 102, Rechts: 103;

Quelle: Eigene Aufnahme

Nach dem Anschnitt der drei Probewürfel ist deutlich erkennbar, dass bei allen drei Probewürfeln der ersten Serie ein dichtes Gefüge entstanden ist (Abbildung 37). Im Inneren der Probewürfel entsprechen die Proben nicht dem gewünschten Ziel der porösen Ziegelsplittbetonsteine. Die kleinen Poren im Inneren der Probewürfel stammen von einem nicht vollständigen Verdichten des Betons. An diesem Beispiel ist gut zu erkennen, warum die Randbereiche der Probewürfel abgeschnitten werden und die zugeschnittenen Prüfkörper bei der Prüfung frei von Außen- oder Schalkanten sein sollen. Das Gefüge kann an den Außenkanten eine andere Struktur als im Inneren der Steine aufweisen. Bei der visuellen Begutachtung ist ersichtlich, dass die Bereiche zwischen den groben Ziegelsplittkörnern überwiegend mit Zement ausgefüllt sind und nur geringe Mengen an Ziegelbrechsand enthalten.

4.2.1.3. Druckfestigkeit

Die Prüfkörper der Serie 1 werden dennoch auf ihre Druck- und Biegezeigenschaften hin untersucht und dienen als Vergleichswert, welche Festigkeitswerte mit einem dichten Schüttbeton mit dem hier vorliegenden Ziegelsplitt erreicht werden können. Zusätzlich zur Druckfestigkeit der Kleinprüfkörper wird auch für den reproduzierten Ziegelsplittbeton der Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl mit demselben Verfahren wie zuvor in Kapitel 3.5 bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 25 aufgeführt.

Serie 1	Rohdichte [kg/m ³]	Höchstlast [N]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Elastizitätsmodul 1/3 Last [N/mm ²]	Querdehnzahl 2/3 Last [-]
Mittelwert Serie 101	1,43	26.389,25	16,90	7.639,48	0,27
VK	3,07 %	6,44 %	6,11 %	43,52 %	32,85 %
Mittelwert Serie 102	1,34	16.216,03	10,64	4.400,89	0,36
VK	1,81 %	9,57 %	9,64 %	48,55 %	26,97 %
Mittelwert Serie 103	1,39	20.840,88	13,47	2.712,56	0,32
VK	0,57 %	16,51 %	17,07 %	6,92 %	20,15 %

Tabelle 25: Ergebnisse der Prüferserie 1 für Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul und Querdehnzahl;

Quelle: Eigene Darstellung



Abbildung 38: reproduzierte Prüfkörper der ersten Serie nach der Druckfestigkeitsprüfung.

Links: Nr. 101A; Mitte: Nr. 102E; Rechts: Nr. 103F;

Quelle: Eigene Aufnahmen

Im Vergleich der drei Prüfkörper in Abbildung 38 sind neben den erkennbaren Unterschieden in den Sieblinien der einzelnen Prüfkörper auch leichte Unterschiede beim Porenraumanteil in den Prüfkörpern zu erkennen. Bei den Prüfkörpern der Serie 102 sind deutlich mehr kleine Luftporen erkennbar als bei den Serien 101 und 103. Im direkten Vergleich ist der Porenanteil in der Serie 101 der geringste. Das Ergebnis spiegelt sich auch in der Druckfestigkeit wider. Hier liegt die Serie 101 mit einer mittleren Druckfestigkeit $f_{cm} = 16,90 \text{ N/mm}^2$ an der Spitze, gefolgt von der Serie 103 mit einem $f_{cm} = 13,47 \text{ N/mm}^2$ und der Serie 102 mit einem $f_{cm} = 10,64 \text{ N/mm}^2$. Die Bruchbilder und das allgemeine Bruchverhalten sind hingegen bei allen drei Serien durchaus vergleichbar. Alle Prüfkörper sind von senkrechten Rissen durchzogen und weisen kleinere und vereinzelt größere Abplatzungen an den Kanten oder den Seitenflächen der Prüfkörper auf. Bei der Serie 102 sind deutlich mehr diagonale, zueinander versetzte und horizontale Risse in den Prüfkörpern zu finden als bei den beiden anderen Prüfserien. Es ist eindeutig ein Zusammenhang mit der Betondichte festzustellen. Je geringer der Porenraum im Prüfkörper ist, umso höher ist die Druckfestigkeit und umso regelmäßiger das Rissbild im Prüfkörper.

Bei der Querdehnzahl ist in der Serie 1 dieselbe Verteilung zu sehen wie bei der Druckfestigkeit. Abhängig vom Anteil der Luftporen im Beton wird die Querdehnzahl mit steigendem Porenanteil ebenfalls größer. Ein Zusammenhang mit dem Luftporenanteil liegt ebenfalls nahe.

Bei den ermittelten Elastizitätsmodulen haben sich in den Versuchen bei allen drei Probserien zwei Cluster an Elastizitätsmodulen ausgebildet, ein Cluster mit Werten zwischen 2.500 und 3.500 N/mm² und ein zweiter mit Werten zwischen 7.000 und 10.000 N/mm². Diese Aufteilung tritt bei allen drei Probserien in jeweils unterschiedlichen Anteilen auf (Tabelle 26). Eine Erklärung hierfür ergibt sich aus den Beobachtungen und den übrigen Messwerten nicht.

Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Serie 101	Serie 102	Serie 103
A	9.001,38	2.777,38	8.783,47
B	10.685,31	2.599,34	2.936,15
C	11.177,37	2.967,92	2.793,67
D	3.843,45	3.241,52	2.511,08
E	3.489,88	7.365,23	2.469,16
F	32.189,14	7.453,92	2.852,74
Mittelwert	7.639,48	4.400,89	2.712,56

Tabelle 26: Übersicht über die einzelnen ermittelten Elastizitätsmodule der Prüfkörper aus Serie 1.

Rote Zahlen sind aus der Mittelwertbildung herausgenommen worden.

Quelle: Eigene Darstellung

4.2.1.4. Biegezugfestigkeit

Neben der Druckfestigkeit werden auch die reproduzierten Proben aus Ziegelsplittbeton im 3-Punkt-Biegezugversuch auf ihre Biegezugfestigkeit geprüft. Aus den drei Serien können nur aus den Serien 101 und 102 Prüfkörper für den Biegezugversuch herausgeschnitten werden. Aus beiden Serien werden je drei Prüfkörper im selben Verfahren und Vorgehen geprüft wie zuvor die alten Ziegelsplittbetonproben der Vibrosteine in Kapitel 3.6.

Biegezug [N/mm^2]	Serie 101	Serie 102
G	3,07	3,31
H	3,82	2,97
I	4,50	3,12
Mittelwert	3,79	3,13
Variationskoeffizient	15,44 %	4,55 %

Tabelle 27: Ergebnisse Biegezugversuch Serie 1; Quelle: Eigene Darstellung

Bei der Biegezugprüfung fehlt zur vollständigen Auswertung und Bewertung der Ergebnisse die Serie 103. Die Ergebnisse zeigen keine eindeutige Tendenz bei der Biegezugfestigkeit hin zu einem Wertebereich (Tabelle 27). Sie variieren und streuen hingegen zum Teil deutlicher. Wie zuvor bei der Druckfestigkeit nehmen auch beim Biegezug die Werte bei der größeren Sieblinie deutlich ab. Anhand der beiden vorliegenden Serien und den Erkenntnissen aus der Begutachtung und der Druckfestigkeitsuntersuchung der Probeserien kann dennoch abgeleitet werden, dass die Unterschiede in der Biegezugfestigkeit vor allem auf den höheren Luftporenanteil in der Serie 102 zurückzuführen sind. Inwiefern die unterschiedlichen Sieblinien einen Einfluss haben, kann mit diesen Ergebnissen nicht beurteilt werden. Die Materialquerschnitte sind in Abbildung 39 exemplarisch in den gezeigten Prüfkörpern 101G und 102G zu erkennen.

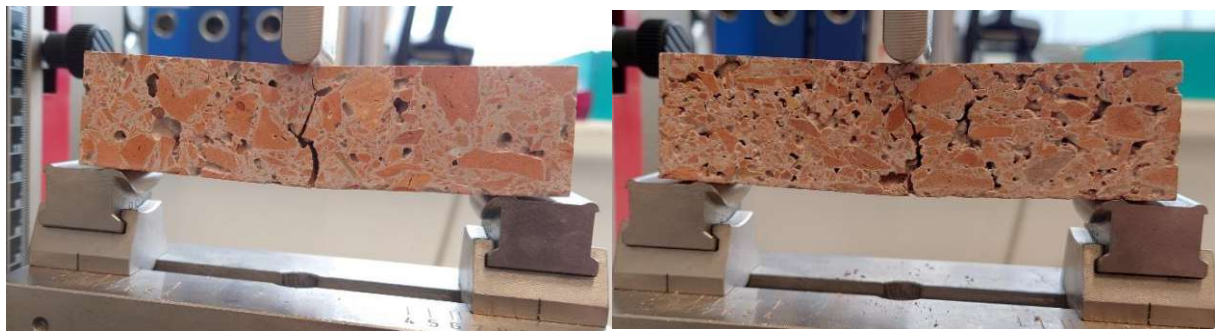


Abbildung 39: Prüfkörper 101G (links) und 102G (rechts) nach dem Biegezugversuch im Vergleich. Erkennbar ist der höhere Luftporenanteil im Prüfkörper 102G; Quelle: Eigene Aufnahmen

Das Bruchverhalten ist bei beiden Probeserien vergleichbar. Der Bruch erfolgt bei jedem Versuch mit einem lauten und schlagartigen Knacken und kündigt sich im Vorfeld nicht durch Risse oder Geräusche an. Teilweise brechen die Prüfkörper vollständig durch und teilweise, wie in Abbildung 39 zu sehen, halten sie noch leicht zusammen.

4.2.1.5. Zusammenfassung der Prüfergebnisse

Zusammenfassend lässt sich als Ergebnis der Serie 1 festhalten, dass die Sieblinien nicht denen des ursprünglichen porigen Ziegelsplittbetons entsprechen. Der Feinkornanteil ist viel zu hoch und führt auf diesem Wege zu einem dichten Gefüge und einem Verschließen der erwünschten Luftporen. Mit Blick auf die Druckfestigkeit kann man deutlich erkennen, dass ein reiner Ziegelsplittbeton durchaus Werte von einem einfachen Normalbeton erreichen kann. An den Kleinprüfkörpern konnte eine maximale mittlere Druckfestigkeit von $16,90 \text{ N/mm}^2$ erreicht werden. Die maximale mittlere Biegezugfestigkeit liegt bei $f_{ct,fl} = 3,79 \text{ N/mm}^2$. Beide Werte liegen somit deutlich über den Werten des ursprünglichen Ziegelsplittbetons. Um einen sicheren Vergleich mit einem Normalbeton C25/30 anstellen zu können, müssten zusätzlich Probewürfel von $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ auf ihre Druckfestigkeit hin untersucht werden.

4.2.2. Serie 2

Für die zweite Versuchsserie werden die Sieblinien angepasst. Insbesondere der Anteil an Feinsanden wird deutlich gesenkt. Zusätzlich wird der Zementanteil im Ziegelsplittbeton reduziert mit dem Ziel, den Porenanteil im Ziegelsplittbeton deutlich zu erhöhen.

4.2.2.1. Sieblinie und Zusammensetzung

Aus den Erkenntnissen der Probeserie 1 werden drei neue Sieblinien für die Serie 2 zusammengestellt (Tabelle 28, Abbildung 40). Zudem werden andere Probewürfelformen als in der Serie 1 verwendet, deren Abmessungen identisch sind mit den Formen aus Serie 1. Die hier verwendeten Stahlschalungen bieten Vorteile beim Ausschalen, da sich die Seitenplatten einzeln abnehmen lassen und der Probewürfel einfach entnommen werden kann. Die Schalungen werden mit Rapsöl, einem natürlichen Trennmittel, behandelt. Die Eigenschaften sind mit denen herkömmlicher Schalöle vergleichbar und haben keinen bekannten Einfluss auf den Beton [39].

	0-1 mm	1-2 mm	2-4 mm	4-8mm	8-11 mm	11-16 mm	>16mm	Gesamt
201	3,0%	6,0%	20,0%	30,0%	25,0%	16,0%	0,0%	100%
202	2,0%	4,0%	15,0%	27,5%	25,0%	19,5%	7,0%	100%
203	1,0%	2,0%	10,0%	25,0%	27,5%	22,5%	12,0%	100%

Tabelle 28: Prozentuale Zusammensetzung der Sieblinien für Serie 2

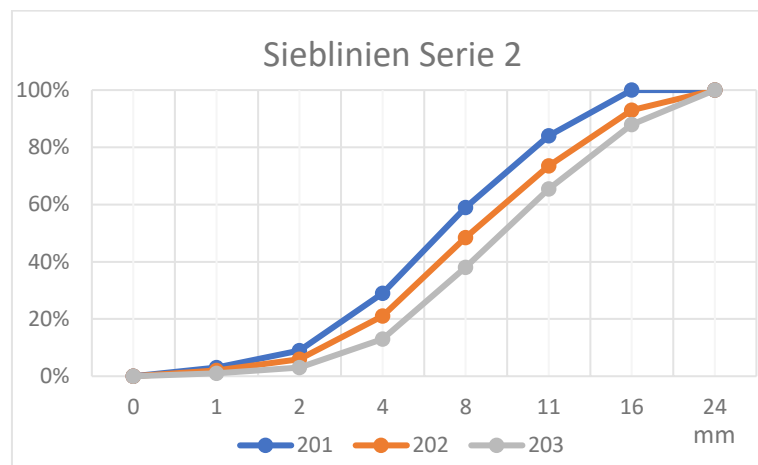


Abbildung 40: Sieblinien der Serie 2 grafisch dargestellt; Quelle: Eigene Darstellung



Abbildung 41: Probewürfel Nr. 201 (links) und 202 (rechts) nach dem Betonieren in den Stahlschalungen; Quelle: Eigene Aufnahme

In den Sieblinien in Abbildung 40 ist der nur noch sehr geringe Anteil an Feinsanden in der Mischung (nur noch 1 bis 3 %) deutlich zu erkennen. Im Vergleich dazu enthalten die Mischungen der Serie 1 bis

zu 10 % Feinsand. Der größte Anteil der Körner liegt in der Serie 2 zwischen 4 und 16 mm. Zusätzlich wird der Zementgehalt im Ziegelsplittbeton auf 100 kg/m^3 verringert. Der w/z Wert und die prozentuale Menge an Anmachwasser werden nicht verändert.

Der Ablauf bei der Herstellung der Probewürfel ist identisch mit dem Ablauf in Serie 1. Die fertig betonierten Probewürfel sind in Abbildung 41 zu sehen. Nach dem Ausschalen und einer siebentägigen Lagerung unter feuchten Tüchern werden die Probewürfel unter Raumluftbedingungen bis zum Erreichen der Prüffestigkeit nach 28 Tagen gelagert. Anschließend werden die Probewürfel aufgeschnitten und eine erste visuelle Begutachtung der Probekörper erfolgt.



Abbildung 42: Probewürfel der Serie 2 nach dem Ausschalen. Die drei Sieblinien sind auch von außen deutlich erkennbar.

Links Probewürfel Nr. 201; **Mittig** Nr. 202; **Rechts** Probewürfel Nr. 203

Quelle: Eigene Aufnahmen

Nach dem Ausschalen ist der erste Eindruck von den drei Probewürfeln positiv. In Abbildung 42 ist gut zu erkennen, dass insbesondere der Probewürfel 201 gleichmäßige und eher feinporige Außenkanten aufweist. Der Probewürfel 203 hingegen ist im Vergleich zu den Vibrosteinen in seiner Struktur zu grob. Bei allen drei Probewürfeln sind nur geringe Mengen an abgesetztem Feinkornmaterial zu erkennen.



Abbildung 43: Probewürfel der Serie 2 im Querschnitt

Links Probewürfel Nr. 201; **Mittig** Nr. 202; **Rechts** Probewürfel Nr. 203

Quelle: Eigene Aufnahme

Nach dem Anschnitt der Probewürfel zeigt sich ein deutlich gleichmäßigeres Bild, wie in Abbildung 43 gut zu sehen ist. Alle Probewürfel haben einen deutlich ausgeprägten Luftporenraum. Im Vergleich zu den Schnittflächen der Vibrosteine sind die Porenräume und die Ziegelsplittkörner allerdings gröber und größer. Anders als zuvor in der ersten Serie sind keine größeren Bereiche mit abgesetzter feiner Körnung oder reinem Zement zu erkennen. Beim Zuschnitt der Kleinprüfkörper ist auffällig, dass der Ziegelsplittbeton der zweiten Serie deutlich instabiler ist als bei den Vibrosteinen. Dünnere Abschnitte

am Rand der Probewürfel lassen sich mit sehr wenig Kraftaufwand auseinanderbrechen oder zerfallen teilweise bereits beim Schneiden.

4.2.2.2. Druckfestigkeit

Aus dem brüchigeren Materialverhalten und dem grobporigeren Materialgefüge der Serie 2 sind deutlich niedrigere Druckfestigkeitswerte zu erwarten. Dafür werden von jedem der drei Probewürfel der Serie 2 neun Prüfkörper mit $4 \times 4 \times 8 \text{ cm}^3$ auf ihre Druckfestigkeit hin untersucht.

Serie 2	Rohdichte [kg/m ³]	Höchstlast [N]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Elastizitätsmodul 1/3 Last [N/mm ²]	Querdehnzahl 2/3 Last [-]
<i>Mittelwert Serie 201</i>	1,08	3.383,97	2,08	1.709,05	0,53
VK	1,60 %	16,46 %	15,89 %	41,12 %	18,92 %
<i>Mittelwert Serie 202</i>	1,05	2.592,17	1,62	1.077,21	0,33
VK	2,76 %	15,98 %	15,93 %	23,78 %	50,87 %
<i>Mittelwert Serie 203</i>	1,04	3.290,70	1,97	2.061,34	0,06
VK	2,50 %	30,09 %	30,92 %	35,33 %	23,94 %

Tabelle 29: Ergebnisse der Prüfsérie 2 für die Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul und Querdehnzahl;
Quelle: Eigene Darstellung

Bei Betrachtung der Ergebnisse der Druckfestigkeitsuntersuchung (**Tabelle 29**) ist erneut auffällig, dass die mittlere Sieblinie die niedrigsten Werte aufweist. Die Streuung befindet sich bei allen drei Druckfestigkeiten mit etwa 15 bzw. 30 % im niedrigeren Rahmen. Bei der Serie 203 weist eine Prüfung deutlich schlechtere Werte auf und führt im direkten Vergleich zu der erhöhten Streuung. Mit einer mittleren Druckfestigkeit zwischen 1,62 und 2,08 N/mm² schneiden die Prüfkörper der Serie 2 deutlich schlechter ab. Mit dem Ergebnis wird, auf die Steindruckfestigkeit hochgerechnet, die in der Zulassung der Vibrosteine geforderte Steindruckfestigkeit von 40 kg/cm² bzw. 4,0 N/mm² nicht erreicht. Auch alle übrigen Ergebnisse der Prüfungen und Untersuchungen an diesen Prüfkörpern ergeben deutlich geringere Werte als die Vergleichswerte der Prüfkörper aus den Vibrosteinen.

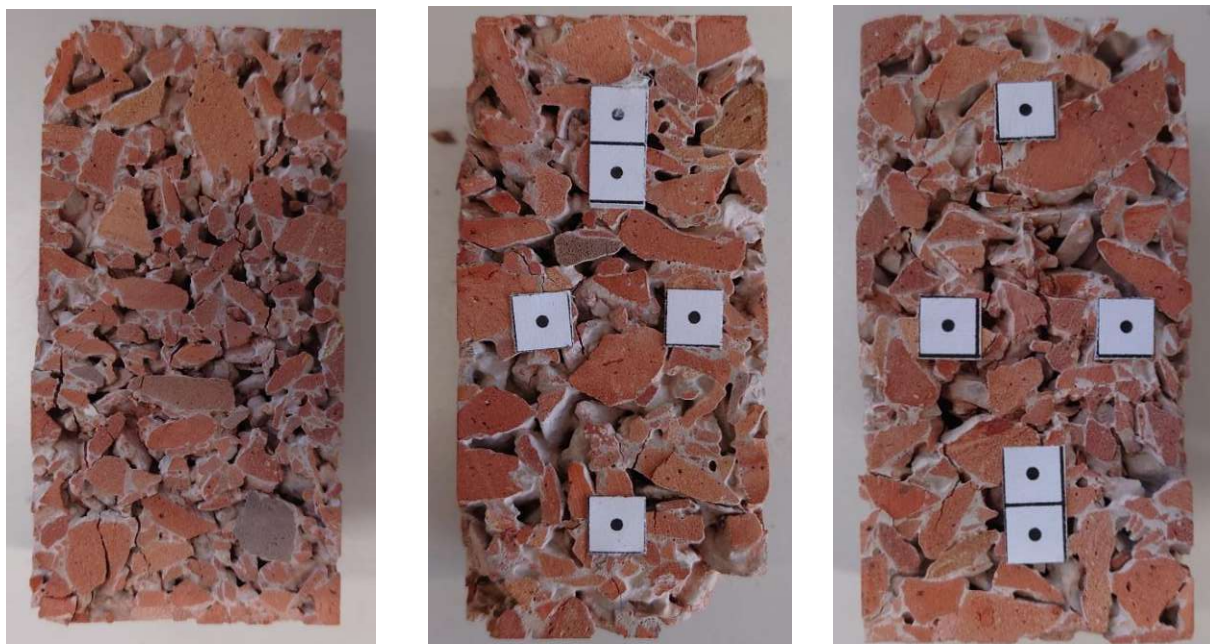


Abbildung 44: Prüfkörper nach der Druckprüfung

Links Prüfkörper 201F; **Mitte:** Prüfkörper 202D; **Rechts:** Prüfkörper 203B

Quelle: Eigene Aufnahmen

Alle Prüfkörper zeigen nach den Druckprüfungen kaum äußerliche Schäden. Vereinzelt sind bei den Prüfkörpern kleine Ecken abgeplatzt. Bei genauerer Begutachtung sind durchgängig einige feine Risse zu erkennen. Exemplarisch sind in Abbildung 44 die drei Prüfkörper 201F, 202D und 203B (von links nach rechts) gezeigt. Die Prüfkörper sind dennoch schwer geschädigt und lassen sich mit der Hand in der Mitte leicht aufbrechen. In der Bruchfläche ist gut erkennbar, dass der Ziegelsplittbeton in der Zementfuge aufgebrochen ist und nur wenige und vor allem kleine Ziegelkörner gebrochen sind (Abbildung 45).



Abbildung 45: Prüfkörper 202B nach der Druckprüfung. Prüfkörper wurde von Hand auseinandergebrochen und die Bruchfuge auf das Bruchversagen hin untersucht;

Quelle: Eigene Aufnahmen

4.2.2.3. Biegezugfestigkeit

Nach den Erkenntnissen aus den Druckfestigkeitsversuchen ist bereits zu erwarten, dass die Prüfkörper auch im 3-Punkt-Biegezugversuch keine guten Ergebnisse erzielen werden. Aus jedem Prüfkörper werden vier stabförmige Prüfkörper herausgeschnitten und wie zuvor beschrieben im 3-Punkt-Biegezugversuch geprüft.

<i>Biegezug [N/mm²]</i>	<i>Serie 201</i>	<i>Serie 202</i>	<i>Serie 203</i>
<i>G</i>	1,08	1,11	0,88
<i>H</i>	0,62	1,06	0,91
<i>I</i>	1,12	1,35	0,60
<i>J</i>	1,27	1,24	0,63
<i>Mittelwert</i>	1,02	1,19	0,75
<i>Variationskoeffizient</i>	23,87 %	9,29 %	18,74 %

Tabelle 30: Ergebnisse der mittleren Biegezugfestigkeit der Probekörperserie 2;

Quelle: Eigene Darstellung

Die mittleren Werte der Biegezugfestigkeit der Kleinprüfkörper liegen zwischen $f_{ct,fl} = 0,75 \text{ N/mm}^2$ bis $1,19 \text{ N/mm}^2$ (Tabelle 30). Damit sind die Ergebnisse schlechter als die Biegezugfestigkeit der vorgeschädigten Prüfkörper. Das Bruchverhalten der Prüfkörper aus der Serie 2 ist vergleichbar mit dem Bruchverhalten der vorgeschädigten Prüfkörper aus den Vibrosteinen. Der Bruch erfolgt mit einem leisen Knirschen oder Knacken in den Prüfkörpern. Die Risse nach dem Bruch kann man von außen kaum erkennen, da sie in den Porenräumen und Kontaktflächen zwischen den Ziegelkörnern verlaufen, wie in Abbildung 46 links zu sehen ist.

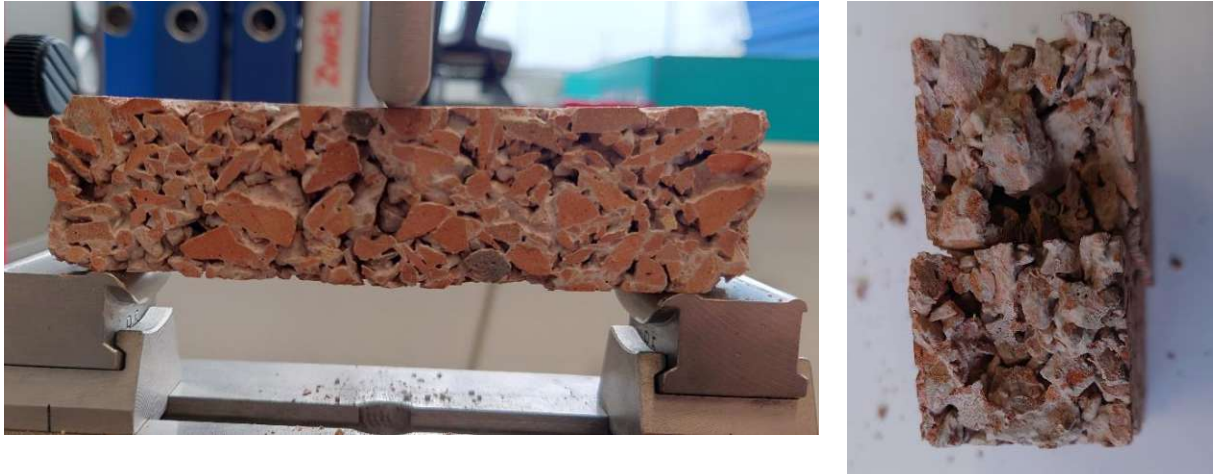


Abbildung 46: Links: Prüfkörper 201L nach dem Biegezugversuch. Die Bruchfuge und Risse sind mittig in den Porenräumen zu erahnen

Rechts: Bruchfuge des Prüfkörpers 201L nach dem Biegezugversuch

Quelle: Eigene Aufnahmen

In der Bruchfuge selbst sind nur einzelne kleine gebrochene Ziegelsplittkörner zu erkennen. Das Versagen hat hauptsächlich in der Zementleimfuge in der Kontaktfläche stattgefunden. Zum Teil ist der Zement von der Ziegeloberfläche abgerissen (Abbildung 46 rechts). Die Prüfkörper brechen beim Biegezugversagen in der Prüfmaschine nicht ganz auseinander, zusammengehalten werden sie nur noch von der inneren Reibung. Die beiden Teile lassen sich in der Bruchfuge leicht voneinander trennen. Das Bruchverhalten und das Bruchbild sind bei allen drei Proben der Serie 2 sehr ähnlich und unabhängig von der Sieblinie.

4.2.2.4. Zusammenfassung der Prüfergebnisse

Die Festigkeitswerte der Serie 2 sind zusammenfassend deutlich zu niedrig. Die erzielten Druckfestigkeiten mit einer Größenordnung von $f_{cm} = 1,62$ bis $2,08 \text{ N/mm}^2$ unterschreiten die Mindestanforderung der Zulassungen um mehr als 50 %. Im Bruchbild der Prüfkörper ist eindeutig erkennbar, dass das Druckversagen vor allem in der Kontaktfläche zwischen den Ziegelsplittkörnern und dem Bindemittel Zement erfolgt. Nach dem Druckversagen bleibt nur eine geringe Festigkeit im Gefüge übrig und die Prüfkörper lassen sich mit geringem Kraftaufwand von Hand auseinanderbrechen.

Im direkten Vergleich zu den Prüfkörpern aus den Vibrosteinen sind die hier verwendeten Sieblinien noch zu grob gestaffelt. Die Sieblinie der Probe 201 bildet eine gute Basis für die weiteren Versuche und wird in der Sieblinie der Serie 3 weiter angepasst. Vor dem Hintergrund der deutlich geschwächten und offensichtlich zu dünnen Zementmatrix in den Kontaktflächen zwischen den Ziegelsplittkörnern wird der Zementgehalt in der nächsten Probesserie wieder erhöht.

4.2.3. Serie 3

4.2.3.1. Sieblinie und Zusammensetzung

Aus den Erkenntnissen der Serie 1 und 2 wird in der dritten Serie eine neue Sieblinie zusammengestellt (Abbildung 47, Tabelle 31) und mit einem gemittelten Zementgehalt zwischen der Serie 1 und 2 gemischt. Die Sieblinie wird dazu weiter in den feinkörnigeren Bereich verschoben. Die Korngrößen 0 bis 1 mm und 1 bis 2 mm werden dazu leicht erhöht, während die Korngröße 11 bis 16 mm verringert wird. Ziegelsplittkörner > 16 mm entfallen vollständig aus der Sieblinie. Der Zementgehalt wird in der Serie 3 auf 150 kg/m^3 Beton festgelegt. Der Anteil des Anmachwassers und der w/z Gehalt bleiben unverändert. Dadurch ist eine höhere Festigkeit des Ziegelsplittbetons und eine insgesamt etwas feinere Kornverteilung im Querschnitt zu erwarten.

	0-1 mm	1-2 mm	2-4 mm	4-8mm	8-11 mm	11-16 mm	>16mm	Gesamt
201	3,0%	6,0%	20,0%	30,0%	25,0%	16,0%	0,0%	100%
301	4,0%	8,0%	20,0%	30,0%	25,0%	13,0%	0,0%	100%

Tabelle 31: Sieblinie der Serie 3 im Vergleich mit der Basissieblinie aus Serie 2; Quelle: Eigene Darstellung

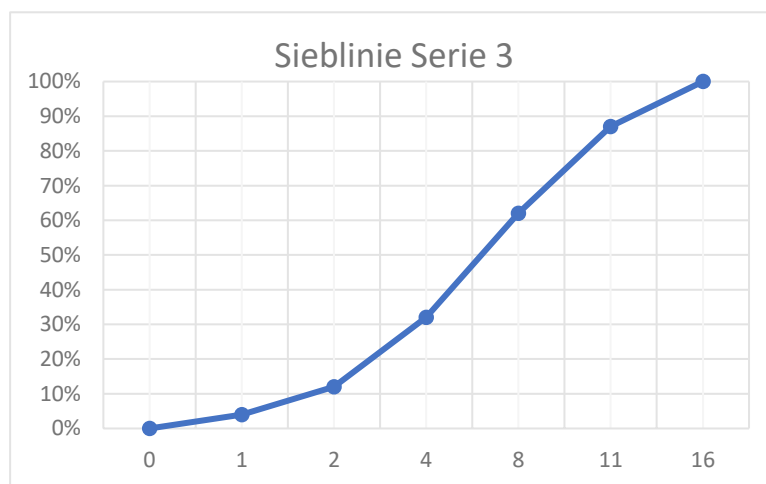


Abbildung 47: grafische Darstellung der Sieblinie der Serie 3;

Quelle: Eigene Darstellung

Der erste Eindruck nach dem Ausschalen ist sehr gut (Abbildung 48). Die Ähnlichkeit zu den Außenkanten der Vibrosteine wird optisch größer. Auffällig ist, dass das sichtbare Größtkorn deutlich größer ist als bei den Vibrosteinen. Ansonsten sind kaum reine Zement- oder Feinkornablagerungen an den Außenflächen zu entdecken. Dagegen sind im Querschnitt (Abbildung 48) einzelne kleinere Bereiche zu erkennen, in denen kaum bis gar keine Poren enthalten sind.



Abbildung 48: Links: Probewürfel 301 nach dem Ausschalen

Rechts: Probewürfel 301 im Querschnitt;

Quelle: Eigene Aufnahmen

4.2.3.2. Druckfestigkeit

Nachdem die vorherige Sieblinie 201 schon nah an den Ziegelsplittbeton der Vibrosteine heranreicht, wird diese im Rahmen der Serie nur wenig angepasst. Der Zementgehalt wird wieder deutlich erhöht und lässt höhere Druckfestigkeitswerte als zuvor erwarten. Aus dem Probewürfel 301 werden neun Prüfkörper für die Druckfestigkeitsversuche (301A bis 301F) und vier Prüfkörper für die Biegezugprüfung herausgeschnitten (301G bis 301J).

Serie 2	Rohdichte	Höchstlast	Druckfestigkeit	Elastizitätsmodul	Querdehnzahl
	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]	1/3 Last [N/mm ²]	2/3 Last [-]
Mittelwert Serie 301	1,14	5.519,59	3,59	1.803,12	0,24
VK	1,82%	10,72%	10,55%	41,92%	23,57%

Tabelle 32: Ergebnisse der Prüfserie 3 für die Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul und Querdehnzahl;
Quelle: Eigene Darstellung

Die mittleren Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung zeigen deutlich die erwarteten höheren Werte (Tabelle 32). Die Höchstlast und die Druckfestigkeit sind doppelt so hoch als zuvor bei der Serie 2. Mit einem $f_{cm} = 3,59 \text{ N/mm}^2$ sind die Proben jedoch noch weit von den Werten der Kleinprüfkörper aus den Vibrosteinen ($f_{cm} = 5,91 \text{ N/mm}^2$ [Tabelle 22]) entfernt. Der Elastizitätsmodul hingegen hat sich kaum erhöht und liegt im bekannten Schwankungsbereich der Messungen.



Abbildung 49: Prüfkörper 301F nach der Druckfestigkeitsprüfung;
Quelle: Eigene Aufnahme

Das Bruchbild der Kleinprüfkörper nach der Druckfestigkeitsprüfung ist bei allen neun Prüfkörpern in etwa vergleichbar mit dem in Abbildung 49 gezeigten Prüfkörper 301F. An der Oberfläche der Prüfkörper sind leichte Risse und einzelne kleinere Abplatzungen an den Kanten zu sehen. Das Versagen kündigt sich wie bei den Vibrosteinen auch hier nicht vorher an, sondern tritt plötzlich mit einem kurzen, hörbaren Knirschen auf.

4.2.3.3. Biegezugfestigkeit

Die Prüfungen zur Biegezugfestigkeit werden an den vier stabförmigen Prüfkörpern 301G bis 301J (interne Nummerierung 3-10 bis 3-13, siehe Abbildung 50) vorgenommen.

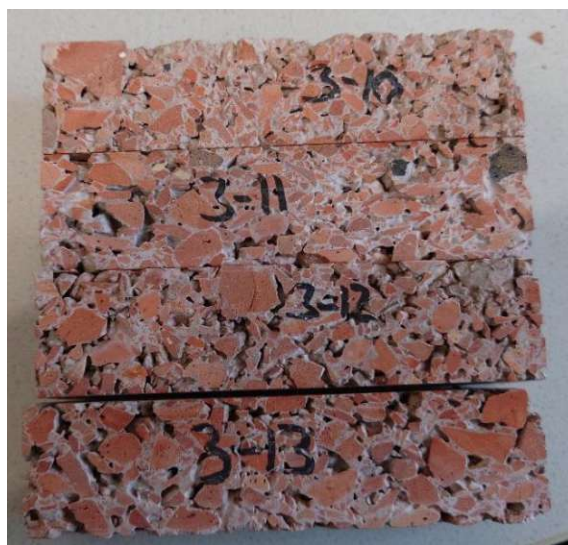


Abbildung 50: Übersicht Prüfkörper Biegezug Serie 3 mit der internen Bezeichnung;

Quelle: Eigene Aufnahme

Die Biegezugwerte (Tabelle 33) verbessern sich ebenfalls im Vergleich zur Serie 2. Die Probe 301 liegt bei der Biegezugfestigkeit mit einem $f_{ct,fl} = 1,80 \text{ N/mm}^2$ etwa gleichauf mit der stärkeren der beiden vorgeschädigten Prüfserien. Zu den Ergebnissen der unbeschädigten Prüfkörper besteht noch ein großer Unterschied. Diese liegen bei einem $f_{ct,fl} = 2,45$ bis $2,50 \text{ N/mm}^2$.

Biegezug [N/mm^2]	Serie 301
G	1,53
H	2,33
I	1,57
J	1,77
Mittelwert	1,80
Variationskoeffizient	17,73 %

Tabelle 33: Ergebnis Biegezugfestigkeit Probeserie 3;

Quelle: Eigene Darstellung

Das Bruchverhalten der Prüfkörper verändert sich leicht. Der Bruch ist nur leise hörbar und äußert sich in einem kurzen Knacken, teilweise aber auch nur mit einem Knirschen wie bei der Serie 2. Das Bruchbild hingegen ist deutlich anders und zeigt eine gute Mischung aus gebrochenem Ziegelsplitt und Zement. Die Bruchfuge verläuft bei der Serie 3 in der Regel wieder entlang größerer Porenräume, wie in Abbildung 51 gut zu erkennen ist.



Abbildung 51: Links: Bruchfuge des Prüfkörpers 301K nach dem Biegezugversuch

Rechts: Prüfkörper 301K nach dem Biegezugversuch mit dem Bruch in der Mitte

Quelle: Eigene Aufnahmen

Die Bruchfuge orientiert sich weniger an den Porenräumen und ist daher nach dem Biegezugversuch deutlich gradliniger und senkrechter als zuvor bei der Serie 2. Der Anteil an gebrochenem Ziegelsplitt in der Fuge ist deutlich erhöht und macht ungefähr ein Viertel der Bruchfläche aus (**Abbildung 51** rechts).

4.2.3.4. Zusammenfassung der Prüfergebnisse

Das optische Ergebnis der dritten Probeserie kommt dem zuvor untersuchten Ziegelsplittbeton der Vibrosteine deutlich näher. Im visuellen Vergleich entspricht der Zementanteil im Ziegelsplittbeton in etwa dem der Vibrosteine. Bei den ermittelten Druck- und Biegezugfestigkeiten sind noch größere Unterschiede zwischen dem ursprünglichen und dem reproduzierten Ziegelsplittbeton festzustellen.

Bei der vierten Serie ist mehr auf eine gute Durchmischung aller Komponenten zu achten. Nach Möglichkeit soll vermieden werden, dass größere zusammenhängende Ziegelsplittklumpen entstehen, um ein gleichmäßigeres Porenbild im Beton zu bekommen.

4.2.4. Serie 4

4.2.4.1. Sieblinie und Zusammensetzung

Aus den Erkenntnissen der dritten Probeserie wird die Sieblinie für die vierte Serie noch einmal leicht angepasst. Dazu wird der Anteil der Korngrößen > 8 mm verringert und die Korngrößen 1 – 2 mm und 2 – 4 mm leicht erhöht. Damit ergeben sich die folgenden Massenanteile (Tabelle 34) und Sieblinie (Abbildung 52):

	0-1 mm	1-2 mm	2-4 mm	4-8mm	8-11 mm	11-16 mm	>16mm	Gesamt
301	4,0%	8,0%	20,0%	30,0%	25,0%	13,0%	0,0%	100,0%
401	4,0%	10,0%	22,0%	30,0%	24,0%	10,0%	0,0%	100,0%
402								

Tabelle 34: Korngrößenverteilung der Probewürfel 401 und 402; Quelle: Eigene Darstellung

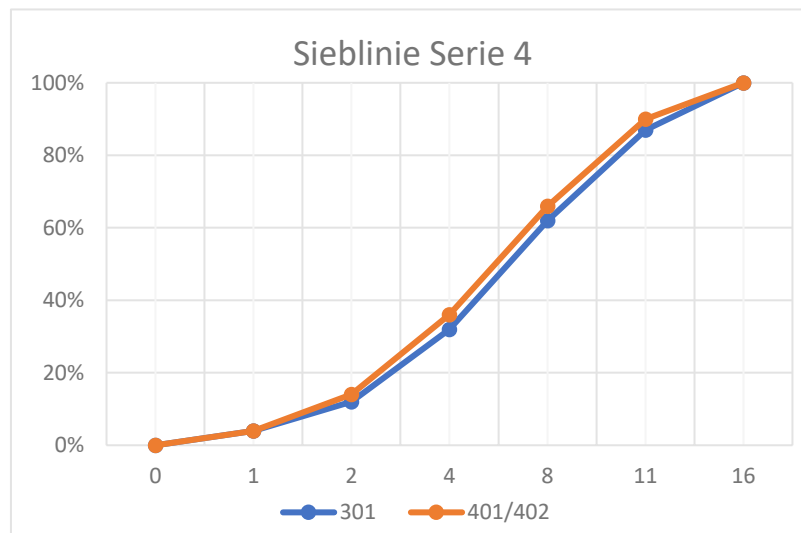


Abbildung 52: Sieblinie 401/402 im Vergleich mit der Sieblinie 301; Quelle: Eigene Darstellung

Ziel der leichten Verschiebung in der Sieblinie ist, das Gefüge gleichmäßiger und mit weniger großen Poren auszubilden, um mehr und stabilere Kontaktflächen zwischen den einzelnen Ziegelsplittkörnern zu schaffen. In Abbildung 52 ist die leichte Verschiebung der Sieblinie im direkten Vergleich zur Sieblinie 301 zu erkennen.

Da die vorhergehende Versuchsreihe den Festigkeitseigenschaften des zu reproduzierenden Ziegelsplittbetons bereits sehr nahekommt, wird die Serie 4 als finale Probekörperserie im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführt. Um einen größeren Stichprobenumfang zu erhalten und die Ergebnisse zu verifizieren, werden von dieser Sieblinie zwei Probewürfel hergestellt. Die beiden Probewürfel werden einzeln angemischt und hergestellt, sodass eine Vergleichbarkeit gegeben ist und eine gegenseitige Einflussnahme ausgeschlossen werden kann.



Abbildung 53: Probewürfel 401 nach dem Ausschalen;
Quelle: Eigene Aufnahme

Nach dem Ausschalen kommt die Oberfläche der Probewürfel (Abbildung 53) dem der Vibrosteine sehr nahe. Es ist eine gleichmäßige Korngrößenverteilung ohne größere Hohlräume an den Außenseiten zu erkennen. Vereinzelt gibt es kleinere Bereiche in der Oberfläche, an denen sich Feinkornmaterial und Zement abgesetzt haben.

An den Schnittflächen in Abbildung 54 ist erkennbar, dass das Gefüge im Inneren des Probewürfels durch die nur kleine Anpassung hin zu einer etwas feineren Sieblinie ein deutlich dichteres Gefüge ergibt. Im Vergleich zum feinsten Vibrostein ist eine klare Ähnlichkeit zu erkennen. Dennoch ist der Porenraum in dieser Probserie für das gewünschte Materialgefüge zu gering.



Abbildung 54: Links: Probserie 402 im Querschnitt. Hier die Schnittfläche unterhalb der stabförmigen Biegezugprüfkörper.

Rechts: Zum Vergleich das Gefüge vom Vibrostein Nr. 72

Quelle: Eigene Aufnahmen

4.2.4.2. Druckfestigkeit

Durch das dichtere Gefüge der Probeserie 4 sind im Vergleich zur Serie 3 höhere Druckfestigkeitswerte zu erwarten. Die Versuche werden wieder an Kleinprüfkörpern mit $4 \times 4 \times 8 \text{ cm}^3$ durchgeführt. Aus jedem Probewürfel werden neun Prüfkörper herausgeschnitten und geprüft, womit für die Serie 4 insgesamt 18 Druckfestigkeitsprüfungen durchgeführt werden und daraus der Mittelwert gebildet wird.

Serie 2	Rohdichte	Höchstlast	Druckfestigkeit	Elastizitätsmodul	Querdehnzahl
	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]	1/3 Last [N/mm ²]	2/3 Last [-]
Mittelwert Serie 401	1,25	9.866,45	6,06	2.380,60	0,24
VK	1,53%	12,75%	12,45%	42,56%	26,69%
Mittelwert Serie 402	1,26	9.672,42	5,96	2.419,01	0,54
VK	2,01%	11,33%	11,23%	20,66%	24,89%
Mittelwert	1,26	9.769,43	6,01	2.399,81	0,39

Tabelle 35: Ergebnisse der Prüfserie 3 für die Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul und Querdehnzahl;

Quelle: Eigene Darstellung

Bei der Druckfestigkeit haben sich die Ergebnisse durch die kleine Änderung deutlich verändert und die mittlere Druckfestigkeit liegt mit einem $f_{cm} = 6,01 \text{ N/mm}^2$ (Tabelle 35) bei fast dem doppelten Wert der Druckfestigkeit der Prüfkörper der Serie 3 und erreicht vergleichbare Werte wie die Kleinprüfkörper aus den Vibrosteinen ($f_{cm} = 5,91 \text{ N/mm}^2$ [Tabelle 22]). Zudem ist der Elastizitätsmodul in der Probe 4 angestiegen und liegt jetzt bei $E = 2.399,81 \text{ N/mm}^2$. Die Querdehnzahl ist hier allerdings größeren Schwankungen unterworfen, wie an den Mittelwerten der beiden Probeserien zu erkennen ist. Eine klare Aussage, welche der Werte richtig und welche Messfehler sind, lässt sich anhand dieser Stichprobe nicht beurteilen.

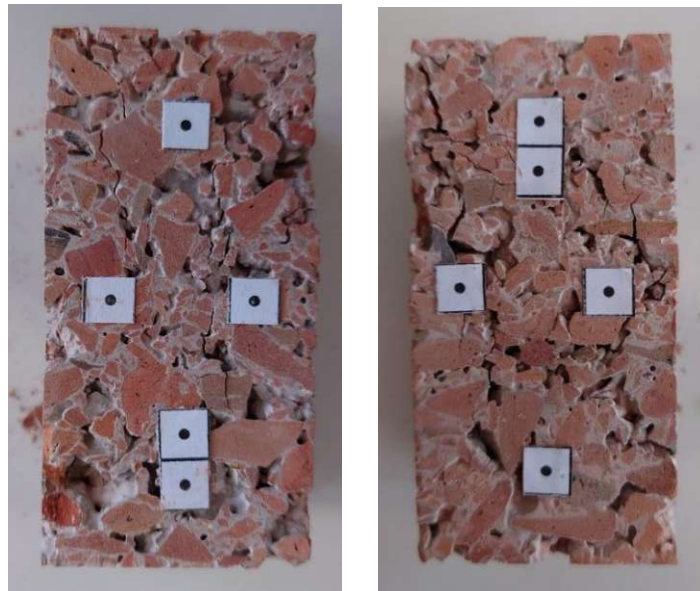


Abbildung 55: Prüfkörper 401B (links) und 401E (rechts) nach der Druckfestigkeitsprüfungen mit nur dünnen Rissen in der Oberfläche

Quelle: Eigene Aufnahmen

Das Bruchbild der Prüfkörper hingegen ist vergleichbar mit den vorherigen Serien. Es sind meist nur dünne Risse an der Oberfläche der Prüfkörper zu erkennen und es treten nur wenige kleine Abplatzungen an den Ecken und Kanten der Kleinprüfkörper auf. Der Prüfkörper 401E in Abbildung 55 weist im direkten Vergleich etwas gröbere Risse im Gefüge an der Oberfläche auf. Der Prüfkörper ist

noch immer stabil und fällt nicht auseinander. In allen Prüfkörpern sind die Risse und Bruchlinien nicht auf die Kontaktflächen beschränkt, sondern ziehen sich gleichmäßig durch alle Bestandteile des Ziegelsplittbetons. Wie in Abbildung 55 bei dem Prüfkörper 401B in der oberen linken Ecke zu erkennen ist, geht die Tendenz deutlich dahin, dass die Risse der Kontaktfläche zwischen Ziegel und Zement folgen.

4.2.4.3. Biegezugfestigkeit

Für die Biegezugfestigkeit werden aus jedem Probekörper jeweils vier stabförmige Prüfkörper mit einer Abmessung von $3 \times 3 \times 12 \text{ cm}^3$ herausgeschnitten und geprüft. Die Ergebnisse sind im Detail in **Tabelle 36** zusammengefasst.

<i>Biegezug [N/mm²]</i>	<i>Serie 401</i>	<i>Serie 402</i>
<i>G</i>	2,40	2,77
<i>H</i>	3,24	3,17
<i>I</i>	3,64	3,31
<i>J</i>	3,75	4,32
<i>Mittelwert</i>	3,26	3,39
<i>Variationskoeffizient</i>	16,31 %	16,91 %
<i>Gesamtmittelwert</i>	3,32	
<i>Gesamtvariation</i>	16,76 %	

Tabelle 36: Ergebnis Biegezugfestigkeit Probeserie 4 mit dem Gesamtmittelwert der Probewürfel
Quelle: Eigene Darstellung

Wie die Druckfestigkeit ist auch die Biegezugfestigkeit der Prüfkörper deutlich angestiegen und hat sich annähernd verdoppelt. Im Gesamtmittel liegt die Biegezugfestigkeit bei $f_{ct,fl} = 3,32 \text{ N/mm}^2$. Mit einem Variationskoeffizienten von 16,76 % über alle Messungen sind die Schwankungen relativ gering und bestätigen den Wert als repräsentativen Kennwert für diesen Ziegelsplittbeton.



Abbildung 56: Links: Prüfkörper 402K nach dem Biegezugversuch mit dem mittigen Bruch
Rechts: Bruchfuge des Prüfkörpers 402K nach dem Biegezugversuch;
Quelle: Eigene Aufnahmen

Der Biegezugversuch führt bei den Prüfkörpern zu einem zentrischen und fast senkrechten Bruch direkt an oder nahe der Krafteinleitungsstelle, wie in Abbildung 56 links gezeigt. Der Bruch selbst ist gut zu hören und tritt abrupt mit einem Knacken auf, teilweise sogar relativ laut. Einige der Prüfkörper, wie der abgebildete Prüfkörper 402K, halten noch zusammen, andere brechen in der Prüfmaschine direkt auseinander. Die Bruchfuge zieht sich fast senkrecht durch das Materialgefüge. Der Anteil an gebrochenem Ziegel in der Fuge ist dabei sehr hoch, sodass von einem Biegezugversagen im Ziegelsplitt ausgegangen werden kann (Abbildung 56 rechts).

4.3. Ergebnisse und Erkenntnisse der Reproduktionsversuche

Neben der Annäherung an die Sieblinie und an das Mischungsverhältnis des Ziegelsplittbetons der Vibrosteine haben die Versuche erste wichtige Erkenntnisse über Abhängigkeiten und Zusammenhänge im Zusammenspiel der einzelnen Komponenten des Ziegelsplittbetons aufgezeigt. Der Stichprobenumfang im Rahmen dieser Diplomarbeit ist allerdings zu gering, um qualitative und sichere Aussagen treffen zu können.

Zementgehalt: Der Zementgehalt im Ziegelsplittbeton hat größere Auswirkungen auf die Festigkeit.

In der Serie 2 wurde mit einem geringeren Zementgehalt gearbeitet als das in der Literatur angegebene Minimum für die Vibrosteine (130 kg/m^3 als Minimum, 100 kg/m^3 in Serie 2). In den Versuchsergebnissen hat diese Serie nur schwache Werte bei der Druck- und Biegezugfestigkeit geliefert. Das Versagen der Prüfkörper ist dabei hauptsächlich im Zementleim in der Kontaktfuge zwischen den einzelnen Ziegelsplittkörnern aufgetreten. In den Serien mit höherem Zementgehalt konnten deutlich bessere Ergebnisse erzielt werden und die Risse und Bruchfugen haben sich mehr auf den Zementleim und den Ziegelbruch verteilt.

Um hierzu noch genauere Erkenntnisse und Aussagen treffen zu können, müssten weitere Probeserien mit gleichen Sieblinien und variiertem Zementgehalt durchgeführt werden. Zudem sollten in weiteren Versuchen der Einfluss des Wasser-Zement-Gehalts auf die Festigkeit des Ziegelsplittbetons untersucht und mit verschiedenen w/z Werten gearbeitet werden.

Sieblinien: Die Ergebnisse der Serien 3 und 4 zeigen sehr deutlich, wie groß der Einfluss der verwendeten Sieblinien und insbesondere der Korngrößenverteilung auf die Festigkeit ist. Der einzige Unterschied zwischen den beiden Serien ist die leichte Verschiebung der Sieblinie in den feineren Bereich. Dazu wurden die unteren Korngröße um 1 bis 2 Masseprozent erhöht und gleichzeitig die oberen in derselben Größenordnung verringert. Diese kleine Verschiebung hat bereits zu einer Verdopplung der Druckfestigkeitswerte geführt. Gerade hinsichtlich der Ziegelsplittbetone mit dichtem Gefüge sollte dies weiter untersucht werden. Anzumerken ist, dass die zuvor untersuchten Vibrosteine unterschiedliche Sieblinien aufgewiesen haben, jedoch kaum Unterschiede in der Druckfestigkeit feststellbar sind. Daher ist diese Erkenntnis über den Einfluss der Sieblinie auf die Druckfestigkeit mit Vorsicht zu betrachten und bedarf weiterer umfangreicher Versuchsreihen.

In den Probeserien für diese Diplomarbeit wurden nur gemischte Sieblinien untersucht und geprüft. Bekanntermaßen wurden für die Vibrosteine vielfach auch Einkorngrößen verwendet, die dem geometrischen Reihenfaktor 2 folgen. Dazu gehörten damals die Korngruppen 1/3, 3/7, 7/15 mm [6]. In weitergehenden Testreihen sollten neben Versuchen mit gemischten Sieblinien auch solche mit Ziegelsplittbeton aus Einkorngrößen durchgeführt und die Ergebnisse direkt verglichen werden.

Unter der Betrachtung des Ziels der Reproduktion des Ziegelsplittbetons konnte festgestellt werden, dass eine Reproduktion der Vibrosteine nur bei Durchführung von zahlreichen Prüfreiheiten möglich ist. Selbst dann ist nur eine gute Annäherung an den ursprünglichen Ziegelsplittbeton möglich. Es konnten allerdings unterschiedliche Einflussparameter aufgezeigt und eine gute Annäherung an die Festigkeitseigenschaften des Ziegelsplittbetons erreicht werden. Da die Wechselwirkung von geänderten Eingangsparametern einen großen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften hat, sind für aussagekräftige Ergebnisse weitere umfangreiche Versuchsreihen erforderlich.

Dem vorliegenden Ziegelsplittbeton konnte sich in den Versuchsreihen im Rahmen dieser Diplomarbeit deutlich angenähert werden. Das Gefüge in der finalen Serie 4 ist allerdings noch etwas dichter als das

der Vibrosteine. Die Druckfestigkeit der Prüfkörper hingegen hat fast genau die Werte der hier untersuchten Kleinprüfkörper aus den Vibrosteinen erreicht.

Mit Blick auf den Einfluss der einzelnen Materialparameter des Ziegelsplittbetons konnten einige wichtige Erkenntnisse gewonnen werden. So ist bei gemischten Sieblinien die Zusammensetzung der Korngrößen im Gefüge ein ausschlaggebender Punkt für die Druckfestigkeit der Steine aber auch für die Gleichmäßigkeit der Porenverteilung. Die Feinkornanteile < 1 mm hingegen führen in erster Linie zu einem dichter werdenden Materialgefüge und verschließen die hier gewünschten Luftporen. Der Zementgehalt scheint ebenfalls einen direkten Einfluss auf die Größe der Luftporen zu haben. Bei steigendem Zementgehalt erhöht sich einerseits die Festigkeit, andererseits verringert sich der Porenraum.

5. Vergleich von altem und neuem Ziegelsplittbeton

Abschließend zum Versuch der Reproduktion des Ziegelsplittbetons der Vibrosteine werden im Folgenden die einzelnen hier untersuchten Parameter mit denen der Serie 4 verglichen. Betrachtet werden das Materialgefüge, die Rohdichte, die Druck- und Biegezugfestigkeit, der Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl.

5.1. Materialgefüge

Das Materialgefüge des Ziegelsplittbetons wird nur visuell miteinander verglichen zum Beispiel über den Porenraumanteil oder den Zementgehalt. Verglichen werden der Vibrostein Nr. 72 und die Probeserie 4, da diese am ehesten miteinander vergleichbar sind. Eine messtechnische Untersuchung wird hier nicht durchgeführt.

Vibrostein Nr. 72



Probeserie 4



Abbildung 57: Links: Ziegelsplittbeton vom Vibrostein Nr. 72

Rechts: Ziegelsplittbeton von Serie 4

Quelle: Eigene Aufnahmen

Im direkten Vergleich (Abbildung 57) fällt deutlich auf, dass der Porenraumanteil bei der Probeserie 4 deutlich geringer ist als bei dem Vibrostein. Zudem ist der Zement bei der Probe 4 optisch auffälliger und der Anteil höher als beim Vibrostein. Der Vibrostein Nr. 72 ist von der Korngrößenverteilung mehr im feineren Korngrößenbereich angesiedelt. Er weist nur einzelne große Ziegelkörner auf und lässt die mittleren Korngrößen fast gänzlich vermissen. Das Ziegelsplittgefüge in der Probe 4 dagegen hat einen höheren Anteil bei den mittleren Korngrößen und weniger bei den kleineren Korngrößen. Verglichen mit den beiden anderen Kornzusammensetzungen der Vibrosteine ordnet sich die Probe 4 zwischen dem feinen (rechts) und dem mittleren Vibrostein in Abbildung 58 ein.



Abbildung 58: Vergleich der drei Korngrößenzusammensetzungen der Vibrosteine von grob (links, Nr. 11) über mittel (Mitte, Nr. 71) zu fein (rechts, Nr. 72);

Quelle: Eigene Aufnahme

5.2. Rohdichte

Im direkten Vergleich der Rohdichte (Tabelle 37) liegt der reproduzierte Ziegelsplittbeton etwa 90 kg/m^3 unter dem Wert der Vibrosteine. Erst der Ziegelsplittbeton der Serie 1 mit dem dichten Materialgefüge erreicht Werte in der Größenordnung der Vibrosteine. Hierbei ist zu bedenken, dass die Rohdichte der alten Mauerziegel einen sehr großen Einfluss auf die Rohdichte des Ziegelsplittbetons hat und je nach Herkunft ebenfalls Schwankungen unterworfen ist. Daher ist es kaum möglich, die Rohdichte zu reproduzieren. Bei der Entwicklung der Vibrosteine in Österreich war man von einem Raumgewicht von $1200\text{--}1400 \text{ kg/m}^3$ [10] ausgegangen. Innerhalb dieser Spannweite liegen beide hier betrachteten Proben.

<i>Rohdichte</i>	<i>Vibrostein</i>	<i>Probeserie 4</i>
Mittelwert	1.349,42 kg/m^3	1.261,91 kg/m^3
Variationskoeffizient	2,90 %	1,82 %

Tabelle 37: Vergleich der Rohdichte des Ziegelsplittbetons; Quelle: Eigene Darstellung

5.3. Druck- und Biegezugfestigkeit

Nicht nur die Rohdichte unterliegt größeren Schwankungen infolge des verwendeten Ziegelmateri- als. Auch die Druck- und Biegezugfestigkeit ist stark davon betroffen und variiert je nach verwendetem Ziegelbruch. Bei den Untersuchungen in Wien und Graz 1946 konnten bei „*absichtlich ausgewählten alten verwitterten Ziegeltrümmern [...] eine Druckfestigkeit bei Mauerziegelbruch von 23 kg/cm^2 [$2,3 \text{ N/mm}^2$, Anm.d.Verf.], bei Dachziegelbruch von $78\text{--}105 \text{ kg/cm}^2$ [$7,8\text{--}10,5 \text{ N/mm}^2$, Anm.d.Verf.] erhalten. Mit besseren Ziegeln als Ausgangsmaterial oder höherem Zementzusatz steigen die Werte entsprechend, wie die Versuche mit Grazer und Klagenfurter Ziegelbruch zeigen. In Wien wird man bei Mauerziegelbruch trotz sparsamer Mischung die eben für Dachziegelbruch angegebenen Festigkeiten erhalten.*“ [10]

<i>Druckfestigkeit f_{cm}</i>	<i>Vibrostein</i>	<i>Probeserie 4</i>
Mittelwert	5,91 N/mm^2	6,01 N/mm^2
Variationskoeffizient	7,81 %	11,90 %

Tabelle 38: Vergleich der Druckfestigkeit des Ziegelsplittbetons; Quelle: Eigene Darstellung

Die mit dem reproduzierten Ziegelsplittbeton erzielten Druckfestigkeitswerte entsprechen fast genau den Druckfestigkeitswerten des Ziegelsplittbetons der Vibrosteine (Tabelle 38). In beiden Proben ist die Streuung der Ergebnisse nur gering. Hier ist zu beachten, dass der Variationskoeffizient bei den Vibrosteinen nur die Mittelwerte der vier unbeschädigten Vibrosteine umfasst und bei der Probeserie 4 alle 18 Kleinprüfkörper. Die Streuung innerhalb der einzelnen Vibrosteine ist bei den Kleinprüfkörpern deutlich ausgeprägter und liegt bei den einzelnen Steinen zwischen 15 und 25 %.

<i>Biegezugfestigkeit $f_{ct,fl}$</i>	<i>Vibrostein</i>	<i>Probeserie 4</i>
Mittelwert	2,48 N/mm^2	3,32 N/mm^2
Variationskoeffizient	0,97 %	16,76 %

Tabelle 39: Vergleich der Biegezugfestigkeit des Ziegelsplittbetons; Quelle: Eigene Darstellung

Im Vergleich der Biegezugfestigkeit sind deutliche Unterschiede zwischen der Probeserie 4 und den Vibrosteinen zu sehen (Tabelle 39). So ist die Biegezugfestigkeit in den reproduzierten Proben um fast 1 N/mm^2 höher als bei dem Ziegelsplittbeton der Vibrosteine. Mögliche Gründe dafür sind das dichtere Gefüge und ein höherwertiger Zement (hier verwendet ein Portlandzement Cem I 42,5R [38]). Diese Faktoren können die Biegezugfestigkeit eines Materials deutlich beeinflussen. Weitere mögliche Gründe sind bereits entfestigtes Bindemittel bei den Vibrosteinen und schlechterer Kontakt zwischen Ziegelsplitt.

5.4. Elastizitätsmodul und Querdehnzahl

Der Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl hängen ebenso stark von den Materialeigenschaften der verwendeten Ziegel ab wie die Druckfestigkeit. Abhängig von der Herstellungsart und dem verwendeten Ton oder Lehm können Mauerziegel in harte und weiche Mauerziegel, welche unterschiedliche Verformungs- und Elastizitätsmodule haben, unterteilt werden. Dabei sind die Grenzen zwischen den Kategorien fließend.

<i>Elastizitätsmodul E</i>	<i>Vibrostein</i>	<i>Probeserie 4</i>
<i>Mittelwert</i>	4.252,27 N/mm ²	2.399,81 N/mm ²
<i>Variationskoeffizient</i>	Probe: 4,98 % Prüfkörper: 47,54 %	33,30 %

Tabelle 40: Vergleich der Elastizitätsmodule des Ziegelsplittbetons; Quelle: Eigene Darstellung

Beim Elastizitätsmodul ist der Unterschied deutlich größer als zuvor bei der Biegezugfestigkeit. Hier ist der Elastizitätsmodul der Vibrosteine fast doppelt so groß wie bei dem reproduzierten Ziegelsplittbeton der Serie 4 (Tabelle 40). Die Schwankung der Mittelwerte der hier untersuchten Vibrosteine ist mit etwa 5 % nur sehr gering, wohingegen die Schwankungen bei der Gesamtbetrachtung aller gültigen Messungen bei etwa 47,50 % liegen. Die Messschwankungen der Probeserie 4 liegen insgesamt mit 33,30 % etwas niedriger auf einem dennoch hohen Niveau. Zurückzuführen ist diese deutliche Abweichung wahrscheinlich auf die eingangs erläuterten Unterschiede in der Härte der verwendeten Mauerziegel.

<i>Querdehnzahl ν</i>	<i>Vibrostein</i>	<i>Probeserie 4</i>
<i>Mittelwert</i>	0,30 [-]	0,39 [-]
<i>Variationskoeffizient</i>	Mauersteine: 18,97 % Prüfkörper: 30,68 %	45,86 %

Tabelle 41: Vergleich der Querdehnzahl des Ziegelsplittbetons; Quelle: Eigene Darstellung

Bei der Querdehnzahl liegen die Ergebnisse der Vibrosteine und der Probeserie 4 näher beieinander (Tabelle 41). Allerdings ist der Mittelwert der Probeserie 4 nicht als validiert anzusehen, da die beiden Einzelproben bei ihren Mittelwerten einen sehr großen Unterschied aufweisen. Dies ist auch an dem Variationskoeffizienten zu erkennen, der bei den 18 Prüfkörpern bei fast 46 % liegt. Die Mittelwerte der beiden Probewürfel liegen zudem mit $\nu_1 = 0,24$ [-] nur $\nu_2 = 0,54$ [-] sehr weit auseinander. Daher ist hier kein qualitativer Vergleich zwischen den beiden Ziegelsplittbetonen möglich.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführten Versuche und Untersuchungen zu den Materialeigenschaften des Ziegelsplittbetons der Vibrosteine zeigen, dass der Ziegelsplittbeton bessere Festigkeitseigenschaften aufweist als erwartet. Bei den Prüfungen an den untersuchten Kleinprüfkörpern konnte bei den insgesamt 29 untersuchten unbeschädigten Kleinprüfkörpern eine charakteristische Druckfestigkeit von $f_{ck} = 4,59 \text{ N/mm}^2$ ermittelt werden. Direkte Vergleiche mit Proben zur Steindruckfestigkeit zeigen, dass die Druckfestigkeit der Kleinprüfkörper nur etwa 60 % der tatsächlichen Steindruckfestigkeit beträgt. Mit dieser Erkenntnis kann für den hier untersuchten Vibrostein-Typ gesagt werden, dass die Druckfestigkeit in nahezu allen Kleinprüfkörpern Steindruckfestigkeiten von 40 kg/cm^2 bzw. 4 N/mm^2 erreichen. Dieser Wert wurde in den Nachkriegsjahren als Bemessungswert für die Vibrosteine angenommen und ist Bestandteil der Zulassungen.

Aus diesem Vergleich der Druckfestigkeiten ist zu erkennen, dass analytisch nicht direkt von der Druckfestigkeit der Kleinprüfkörper auf die Steindruckfestigkeit der Vibrosteine geschlossen werden kann. Der im Rahmen dieser Arbeit bestimmte Umrechnungsfaktor kann als Vergleichswert für zukünftige Materialuntersuchungen an unterschiedlichen Vibrostein-Typen verwendet werden. Dieser Faktor ist von einer Vielzahl an Einflüssen abhängig und kann daher nicht als allgemeingültig angenommen werden. Zu den Einflüssen gehören unter anderem die Form und der Anteil an Hohlräumen, die Stegdicken und auch die Außenmaße der Vibrosteine. Diese und weitere Einflussfaktoren sind in weiteren Untersuchungen und Versuchsreihen mit diesen und anderen Vibrosteinen zu ihrer Abhängigkeit und der Wechselwirkung der einzelnen Faktoren auf die Steindruckfestigkeit zu analysieren.

Die Untersuchungen zur Resttragfähigkeit nach dem Druckversagen ganzer Steine machen deutlich, dass in den dicken Stegen der Vibrosteine eine ausreichend große Resttragfähigkeit besteht. Bei den vorgeschädigten Prüfkörpern wird noch eine charakteristische Druckfestigkeit von $f_{ck} = 3,45 \text{ N/mm}^2$ erreicht ($f_{ck} = 4,59 \text{ N/mm}^2$ bei den unbeschädigten Kleinprüfkörpern). Dabei sind die Unterschiede der Ergebnisse zwischen den beiden hier untersuchten Vibrosteinen relativ groß. Aber auch die Schwankungen der Ergebnisse zwischen den einzelnen Kleinprüfkörpern der Steine sind signifikant. So liegt die mittlere Druckfestigkeit für die Resttragfähigkeit mit $f_{cm} = 5,61 \text{ N/mm}^2$ nur geringfügig unter der mittleren Druckfestigkeit der unbeschädigten Prüfkörper von $f_{cm} = 5,91 \text{ N/mm}^2$, während die charakteristische Druckfestigkeit mit einem Delta von über 1 N/mm^2 bedeutend niedriger ist. Diese Ergebnisse bieten einen tieferen Einblick in das Trag- und Materialverhalten der Vibrosteine. Um dieses noch besser verstehen und nachvollziehen zu können, sind weitere und detailliertere Untersuchungen zum Tragverhalten unter Druckbelastung erforderlich. Zudem sind Faktoren wie die Lastverteilung beim Steindruckversagen und das daraus resultierende Potential der Umlagerung von Druckkräften nach dem Versagen auf die noch halbwegs tragfähigen Hauptstege der Vibrosteine zu erörtern.

Die durchgeführten Reproduktionsversuche des untersuchten Ziegelsplittbetons zeigen zudem, dass bereits kleinere Änderungen in der Zusammensetzung einen großen Einfluss auf das Materialgefüge und die Tragfähigkeit des Ziegelsplittbetons haben. Auch der Anteil, die Größe und die Verteilung der Porenräume beeinflussen die Tragfähigkeit deutlich. Die Sieblinie der letzten hergestellten Serie liegt zum überwiegenden Teil zwischen 1 und 11 mm, der größte Anteil davon liegt bei einer Korngröße zwischen 4 und 8 mm. Damit wird von der Korngrößenverteilung ein gutes Mittel der untersuchten Vibrosteine erreicht, jedoch mit einem geringeren Porenraum im Beton. Die Druckfestigkeit der Kleinprüfkörper aus den Vibrosteinen kann dennoch erreicht werden. Es sind noch weitere Versuchsreihen und Anpassungen bei der Zusammensetzung erforderlich, um sich dem genauen Mischungsverhältnis der Vibrosteine weiter anzunähern. Eine Herausforderung, die es zu lösen gilt, ist

das ideale Mischungsverhältnis aus feinen und groben Korngrößen im Gefüge zu finden. Bereits kleine Änderungen an den Masseanteilen führen zu einem zu dichten oder zu porigen Ziegelsplittbeton.

Ziegelsplittbeton in der hier betrachteten Form des porigen Betons bietet viel Potential zur Optimierung hinsichtlich seiner Festigkeitseigenschaften. Durch Anpassung und Verschiebung der Sieblinien und des Zementgehaltes lassen sich die Eigenschaften des Betons fast beliebig verändern. Begrenzt werden sie nur durch die Materialeigenschaften der verwendeten Rohmaterialien. Innerhalb dieser Grenzen lassen sich Ergebnisse erreichen, welche auch heutigen Anforderungen an die Druckfestigkeit von Mauersteinen im Wohnungsbau gerecht werden. Gängige Mauersteine aus Poren- und Leichtbeton, welche heutzutage häufig beim Bau von Ein- und Mehrfamilienhäusern verwendet werden, erreichen charakteristische Druckfestigkeiten zwischen 2 und 8 N/mm² [36]. Sie gehören damit in dieselben Festigkeitsklassen wie die in dieser Diplomarbeit untersuchten Steine aus Ziegelsplittbeton. Bei derartigen Bauvorhaben ist ein großes Potential für die Verwendung von Mauersteinen aus recyceltem Ziegelbruch vorhanden.

Auf diese Erkenntnisse aufbauend können durch weitere Laboruntersuchungen und Versuche im Rahmen von Forschungsarbeiten moderne Recyclingbetonsteine entwickeln werden, welche als nachhaltige und umweltfreundliche Alternative zu den heutzutage oft verwendeten Mauersteinen aus Poroton oder Porenbeton eingesetzt werden können. Mit den hier erreichten Druckfestigkeitswerten können derartige Steine mit den am Markt vorhandenen klassischen Mauersteinen konkurrieren.

Die eher eingeschränkten Druckfestigkeiten und Einschränkungen in den Normen für Recyclingbeton erschweren den Einsatz von reinem Ziegelsplittbeton als Schüttbodyen deutlich. Hier laufen aber zahlreiche Forschungsprojekte in Österreich und Europa, die sich mit der Steigerung des Anteils an rezykliertem Ziegelmaterial in Schüttbodyen befassen.

Als Beispiel können die Fertigbetonwände Ziegelit® der Firma MABA Fertigteileindustrie GmbH genannt werden, welche seit einigen Jahren am Markt erhältlich sind. Hierbei handelt es sich um Leichtbeton-Vollwände aus Ziegelsplittbeton mit der Festigkeitsklasse $\geq$ LC20/22 und einer Rohdichte von 1.920 kg/m³. Diese Wände finden bereits in einigen Hochbauprojekten in Österreich Anwendung. Das größte bisher damit errichtete Gebäude „Unit Center Gleisdorf“ [40] (Abbildung 59), welches voraussichtlich im Frühjahr 2023 eröffnet wird.

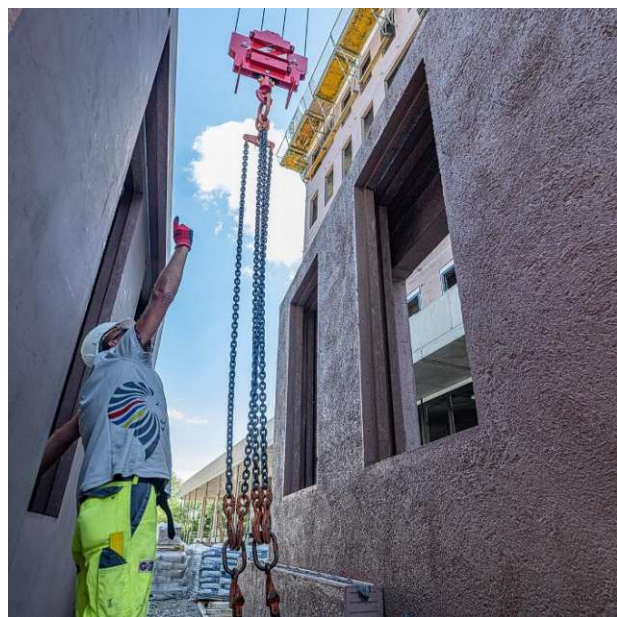


Abbildung 59: Ziegelit® Fertigbetonwände beim Unit Center Gleisdorf; Quelle: [39], [40]

7. Verzeichnisse

7.1. Literaturverzeichnis

- [1] Attic Adapt 2050 - Ein systematischer Ansatz für Dachgeschoßausbauten in Holzbauweise. Weiterbauen! Nachverdichten des Gebäudebestands der Nachkriegszeit (1950-1970) am Beispiel der Wohnhausanlagen der Gemeinde Wien., Wien: Universität für Bodenkultur Wien, 2017.
- [2] V. Hammerschmidt, Evaluierung der Tragfähigkeit von Mauerwerk aus Ziegelsplittbeton-Hohlblocksteinen der Nachkriegszeit (1945 – 1965) in Wien (Dissertation), Wien, in Bearbeitung.
- [3] H.-O.-. Lamprecht, Opus Ceamentitium - Bautechnik der Römer, Düsseldorf: Beton-Verlag, 1984.
- [4] InformationsZentrum Beton GmbH, „Beton.org - Geschichte des Betons,“ [Online]. Available: <https://www.beton.org/wissen/beton-bautechnik/geschichte-des-betons/>. [Zugriff am 05 09 2022].
- [5] Stadt Wien - Wiener Stadt- und Landesarchiv, „Wien Geschichte Wiki - Zweiter Weltkrieg,“ 2021. [Online]. Available: https://www.geschichtewiki.wien.gv.at/Zweiter_Weltkrieg. [Zugriff am 14 08 2022].
- [6] O. D. t. A. Precht, „Das Problem der Schuttverwertung,“ *Der Aufbau - Fachschrift der Stadtbauamtsdirektion Wien*, pp. 183-192, 1947.
- [7] D. h. c. E. Heini, „Probleme des Wiederaufbaus,“ *Der Aufbau - Fachschrift der Stadtbauamtsdirektion Wien*, p. 3, 1946.
- [8] Stadt Wien - Wiener Stadt- und Landesarchiv, „Wien Geschichte Wiki - Wiederaufbau in Wien in der Besatzungszeit,“ 2022. [Online]. Available: https://www.geschichtewiki.wien.gv.at/Wiederaufbau_in_Wien_in_der_Besatzungszeit. [Zugriff am 14 08 2022].
- [9] D. I. J. Kritsch, „Die Baustofflage in Wien,“ *Der Aufbau - Fachschrift der Stadtbauamtsdirektion Wien*, pp. 38-39, 1946.
- [10] B. D. F. Bruckmayer und O. H. Urregg, „Ziegelbruchbeton für den städtischen Wiederaufbau,“ *Der Aufbau - Fachschrift der Stadtbauamtsdirektion Wien*, pp. 86-87, 1946.
- [11] D. I. S. Soretz, „Fragen, Probleme und Bauweisen bei der Verwendung von Ziegelbruchbeton,“ *Der Aufbau - Fachschrift der Stadtbauamtsdirektion Wien*, pp. 209-211, 1946.
- [12] Austrian Standard Wien, *ÖNORM B 3353:1973 - Schüttbetonwände; Leichtbeton mit haufwerksporigem oder geschlossenem Gefüge für tragende Wände*, Wien: Austrian Standard Wien, 1973.
- [13] D.-I. H. Voegeli, „Mauersteine aus Ziegelsplittbeton und ihre Verwendung,“ *Die Bauwirtschaft - Zentralblatt für das gesamte Bauwesen (Heft 12/13)*, pp. 12-14, 28 03 1951.

- [14] D.-I. G. Richter, „Hochhäuser in Hohlblöcken aus Ziegelsplittbeton - Hohlblocksteine für 5-6geschossige Bauten,“ *Der Ziegelsplitt (Monatliche Beilage der Zeitschrift "Die Bauwirtschaft")*, Heft Nr. 5, pp. 28-31, Juli 1951.
- [15] Unbekannt, „Frankfurt baut auf,“ [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20131219012440/http://aufbau-ffm.de/doku/Archiv/tvg.html>. [Zugriff am 15 09 2022].
- [16] Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie, „Ziegel.de - Re-Use und Recycling von Ziegeln,“ [Online]. Available: <https://www.ziegel.de/recycling>. [Zugriff am 05 09 2022].
- [17] Austrian Standard Wien, *ÖNORM EN 771-3:2015 - Festlegungen für Mauersteine. Teil 3: Mauersteine aus Beton (mit dichten und porigen Zuschlägen)*, Wien, 2015.
- [18] Austrian Standard Wien, *ÖNORM EN 772-1:2015 - Prüfverfahren für Mauersteine - Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit*, Wien : Austrian Standard, 2015.
- [19] Austrian Standard Wien, *ÖNORM EN 772-6:2002 - Prüfverfahren für Mauersteine - Teil 6: Bestimmung der Biegezugfestigkeit von Mauersteinen aus Beton*, Wien : Austrian Standard, 2002.
- [20] Austrian Standard Wien, *ÖNORM EN 772-11:2011 Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 11: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von Mauersteinen aus Beton, Porenbetonsteinen, Betonwerksteinen und Natursteinen sowie der anfänglichen Wasseraufnahme von Mauerziegeln*, Wien, 2011.
- [21] Austrian Standard Wien, *ÖNORM EN 772-13:2000 - Prüfverfahren für Mauersteine - Teil 13: Bestimmung der Netto- und Brutto- Trockenrohdichte von Mauersteinen (außer Natursteinen)*, Wien: Austrian Standard, 2000.
- [22] Austrian Standard Wien, *ÖNORM EN 772-16:2011 - Prüfverfahren für Mauersteine - Teil 16: Bestimmung der Maße*, Wien: Austrian Standard, 2011.
- [23] Austrian Standard Wien, *ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 - Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen*, Wien, 2016.
- [24] L. Bohling, *Materialprüfung von historischem Ziegelsplittbeton - Laboruntersuchungen zum Verhalten von Ziegelsplittbeton bei Kontakt mit Wasser anhand von Kleinprüfkörpern (entnommen aus Vibrosteinen) [interne Projektarbeit]*, Wien, 2022.
- [25] Austrian Standard Wien, *ÖNORM B 4710-1:2018 - Beton — Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität*, Wien: Austrian Standard, 2018.
- [26] Austrian Standard Wien, *ÖNORM B3140:2020 - Rezyklierte Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Anwendungen sowie für Beton*, Wien : Austrian Standard, 2020.
- [27] Austrian Standard Wien, *ÖNORM EN 993-11:2011 - Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 11: Einteilung der Bestandteile in grober recycelter Gesteinskörnung*, Wien: Austrian Standard, 2011.

- [28] Interessensverband Beton Dialog Österreich (BDÖ), „Beton - Werte für Generationen - "Was ist Recyclingbeton?“,“ 2022. [Online]. Available: <https://baustoffbeton.at/betonarten/recyclingbeton/>. [Zugriff am 24 09 2022].
- [29] International Organization for Standardization (ISO), *ISO 11465:1993 - Soil quality - Determination of dry matter and water content on a mass basis - Gravimetric method*, Schweiz, 1993.
- [30] Universität Duisburg-Essen, „Bauphysik Interaktiv - Wasseraufnahmekoeffizient,“ 2003. [Online]. Available: https://www.uni-due.de/ibpm/Bauphysik-Interaktiv/nh_fe_wasserauf2.htm. [Zugriff am 08 08 2022].
- [31] Science at home, „Wiki.sah,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.science-at-home.de/wiki/index.php/Wasseraufnahmekoeffizient>. [Zugriff am 08 08 2022].
- [32] V. Hammerschmidt, G. Pommer und A. Kolbitsch, „Experimentelle Untersuchungen von Mauerwerk aus Ziegelsplittbeton–Hohlblocksteinen der Nachkriegszeit,“ *Mauerwerk 26 (2022), Heft 2*, pp. 49-59, 2022.
- [33] Austrian Standard, *ÖNORM EN 12390-5:2019 - Prüfung von Festbeton - Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern*, Wien: Austrian Standard, 2019.
- [34] Baunit GmbH, „Baunit DuoLight Mörtel,“ 11 2021. [Online]. Available: <https://baunit.at/produkte/aussenputze/warmedammende-putze-fur-aussen-und-innen/baunit-duolight-mortel?category=mauermortel>. [Zugriff am 06 12 2022].
- [35] Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau e. V., „MauerWerk™ Das Lehrportal - 2.2 Festigkeit von Mauerwerk,“ Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau e. V., [Online]. Available: <https://www.mauerwerksbau-lehre.de/vorlesungen/2-festigkeits-und-verformungseigenschaften/22-festigkeit-von-mauerwerk/221-allgemeines>. [Zugriff am 06 12 2022].
- [36] A. (. Albert, Schneider Bautabellen 24. Auflage, Köln: Reguvis Fachmedien, 2020.
- [37] D. K. Charisius, P. D. W. Drechsel und P. D. A. Hummel, „Ziegelsplittbeton - Festigkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung,“ Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1952.
- [38] BAUHAUS Depot GmbH, „Bauhaus.at - Probau Zement (Onlineshop),“ 08 2014. [Online]. Available: <https://www.bauhaus.at/zement-moertel/probau-zement/p/13910908#product-data>. [Zugriff am 07 12 2022].
- [39] C.A.R.M.E.N. e.V, „Renewable Carbon News - Rapsöl trennt Beton von der Verschalung,“ 25 Januar 2002. [Online]. Available: <https://renewable-carbon.eu/news/rapsoel-trennt-beton-von-der-verschalung/>. [Zugriff am 11 10 2022].
- [40] Kirchdorfer Concrete Solutions, „Kirchdorfer Concrete Solutions - Rekord-Leistung: 530 m² Ziegelit®-Wände in 3 Tagen aufgestellt,“ 15 06 2022. [Online]. Available: <https://www.concrete-solutions.eu/rekord-leistung-530-m%C2%B2-ziegelit-waende-in-3-tagen-aufgestellt/>. [Zugriff am 16 10 2022].

- [41] B. Engelmann, „MeinBezirk.at - Gleichenfeier nach rekordverdächtiger Bauzeit,“ RegionalMedien_Engelmann, 03 06 2022. [Online]. Available: https://www.meinbezirk.at/weiz/c-wirtschaft/gleichenfeier-nach-rekordverdaechtiger-bauzeit_a5389297. [Zugriff am 16 10 2022].
- [42] Dr. H.-O. Lamprecht/HeidelbergCement Archiv, „Allgemeine Bauzeitung - Alter Baustoff mit Zukunft - Der lange Weg zum heutigen Portlandzement,“ 07 05 2021. [Online]. Available: <https://allgemeinebauzeitung.de/abz/alter-baustoff-mit-zukunft-der-lange-weg-zum-heutigen-portlandzement-39656>. [Zugriff am 27 04 2023].

7.2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Materialproben von Römischen Beton, unter anderem mit Ziegelbruchzuschlag; Quelle: [41]	5
Abbildung 2: Zerstörung in Wien nach dem Zweiten Weltkrieg. Hier in der Inneren Stadt Nähe Neuer Markt; Quelle: [5].....	6
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Aufbereitungsanlage im Wiener Arsenal; Quelle: [6]....	8
Abbildung 4: Schema der Vibrostein-Fertigungsanlage aus Schweden, welche im Wiener Arsenal aufgebaut wurde und dort Vibrosteine produzierte; Quelle: [6].....	9
Abbildung 5: Abmessungen von Hohlblocksteinen aus Ziegelbeton nach der neuen deutschen Norm (oben: Zweikammerstein alte Norm, Mitte und unten: Dreikammerstein nach neuer Norm; vermutlich ist in der Abbildung die DIN 4163:1951 gemeint); Quelle: [12]	10
Abbildung 6: Erzeugung von Voll- und Hohlblocksteinen aus Ziegelsplittbeton in vier deutschen Städten in m ³ Ziegelsplittbeton (keine Angabe welche Städte erfasst wurden); Quelle: [12].....	11
Abbildung 7: Zustand vom Vibrostein (Probennummer 71) nach dem 3-Punkt-Biegezugversuch; Quelle: Eigene Aufnahme	16
Abbildung 8: Steintrennmaschine für den Zuschnitt der Kleinprüfkörper; Quelle: Eigene Aufnahme ..	17
Abbildung 9: Vergleich der Querschnittsflächen (von den Stirnseiten) der Steine 11, 71 und 72 mit unterschiedlichen Sieblinien: grob (links, Stein 11), mittel (Mitte, Stein 71) und fein mit einzelnen großen Körnern (rechts, Stein 72); Quelle: Eigene Aufnahme	18
Abbildung 10: Schematische 2D-Darstellung der vorliegenden Vibrosteine für die Probenentnahme, Betrachtung des Steins von der Unterseite; Quelle: Eigene Darstellung.....	19
Abbildung 11: Schema für die Prüfkörperbezeichnung und Übersicht über die Verteilung im Stein; Quelle: Eigene Darstellung	20
Abbildung 12: Form und Abmessungen der drei Prüfkörpertypen, Quelle: Eigene Darstellung.....	20
Abbildung 13: Prüfkörper auf dem Gitterrost während des Wasseraufnahmeversuchs; Quelle: Eigene Aufnahme	23
Abbildung 14: Range der Wasseraufnahmekoeffizienten der einzelnen Prüfkörper in den Versuchsreihen; Quelle [23]	24
Abbildung 15: Verlauf der Wasseraufnahme über die Zeit; Quelle: [23]	25
Abbildung 16: Normierte Wasseraufnahme der Mittelwerte nach ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016; Quelle: [23]	25
Abbildung 17: Detailbetrachtung der Wasseraufnahme bei den quaderförmigen Prüfkörpern nach ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016; Quelle: [23]	26

Abbildung 18: Bruchverhalten bei dem Prüfkörper 71P Oben: Ansicht von der Seite mit der Erhebung an der Vorderseite Unten: Rissbild an der Vorderseite des Prüfkörpers Rechts: Prüfkörper in der Prüfmaschine nach Versuchsende Quelle: Eigene Aufnahmen	29
Abbildung 19: Bruchverhalten bei dem Prüfkörper 71B Oben: Zustand nach der Entnahme aus der Prüfmaschine Unten: Blick in die Bruchfuge des Prüfkörpers nach dem Auseinanderbrechen Rechts: Prüfkörper nach dem Druckversuch in der Prüfmaschine Quelle: Eigene Aufnahme	30
Abbildung 20: Prüfkörper „74G“ mit einzelnen Abplatzungen nach der Druckfestigkeitsprüfung im unteren Bereich Quelle: Eigene Aufnahme.....	31
Abbildung 21: Prüfkörper „74F“ ist nach der Druckfestigkeitsprüfung in der Mitte gestaucht; Quelle: Eigene Aufnahme	31
Abbildung 22: Bruchverhalten vom vorgeschädigten Prüfkörper "16N".	32
Abbildung 23: Bruchverhalten vom vorgeschädigten Prüfkörper "16Q"	33
Abbildung 24 (links): Ansicht der auf den Kleinprüfkörpern aufgeklebten Messpunkte (rechts): Bildschirmfoto des Videoextensometerprogramms (Videx) während der Messung Quelle: Eigene Aufnahme	35
Abbildung 25: Bruchbild von Prüfkörper "71J" unter Biegezugbelastung; Quelle: Eigene Aufnahme.	38
Abbildung 26: Bruchbild von Prüfkörper "11Q" unter Biegezugbelastung Quelle: Eigene Aufnahme	39
Abbildung 27: Prüfkörper "16E" nach der Biegezugprüfung mit mehreren sichtbaren Rissen in der Bruchfuge; Quelle: Eigene Aufnahme	39
Abbildung 28: Fertig vorbereitete und vermörtelte Prüfkörper Quelle: Eigene Aufnahme.....	40
Abbildung 29: Prüfkörper Nr. 6 mit 15 mm Mörtelfuge nach der Druckbelastungsprüfung mit deutlich sichtbaren Rissen durch den gesamten Prüfkörper; Quelle: Eigene Aufnahme	41
Abbildung 30: Prüfkörper 11 mit 10 mm Mörtelfuge nach der Druckbelastungsprüfung mit großen Abplatzungen am unteren Ziegelsplittbetonwürfel und dem Mörtel; Quelle: Eigene Aufnahme.....	42
Abbildung 31: Prüfkörper 5 mit klar erkennbarer Stauchung der vormals 15 mm starken Mörtelfuge auf nur noch ca. 8 mm; Quelle: Eigene Aufnahme.....	42
Abbildung 32: in Berlin untersuchte Sieblinien für Ziegelsplittbeton mit dichtem Gefüge; Quelle: [36]	46
Abbildung 33: Siebung des selbstgebrochenen Ziegelsplitts; Quelle: Eigene Aufnahme.....	46
Abbildung 34: Sieblinien der Serie 1 grafisch dargestellt; Quelle: Eigene Darstellung	47
Abbildung 35: Links: Ziegelsplittbeton der Serie 1 nach dem Anmischen Rechts: Ziegelsplittbeton in den Probewürfelformen nach dem Einfüllen. Linke Form: Sieblinie 103, rechte Form: Sieblinie 102 Quelle: Eigene Aufnahmen.....	48
Abbildung 36: Probewürfel 102 (links) und 101 (rechts) nach dem Ausschalen; Quelle: Eigene Aufnahme	49
Abbildung 37: Querschnitt durch die drei Proben der Serie 1. Links: 101, Mitte: 102, Rechts: 103; Quelle: Eigene Aufnahme.....	49
Abbildung 38: reproduzierte Prüfkörper der ersten Serie nach der Druckfestigkeitsprüfung. Links: Nr. 101A; Mitte: Nr. 102E; Rechts: Nr. 103F; Quelle: Eigene Aufnahmen	50
Abbildung 39: Prüfkörper 101G (links) und 102G (rechts) nach dem Biegezugversuch im Vergleich. Erkennbar ist der höhere Luftporenanteil im Prüfkörper 102G; Quelle: Eigene Aufnahmen	52
Abbildung 40: Sieblinien der Serie 2 grafisch dargestellt; Quelle: Eigene Darstellung	53
Abbildung 41: Probewürfel Nr. 201 (links) und 202 (rechts) nach dem Betonieren in den Stahlschalungen; Quelle: Eigene Aufnahme	53
Abbildung 42: Probewürfel der Serie 2 nach dem Ausschalen. Die drei Sieblinien sind auch von außen deutlich erkennbar. Links Probewürfel Nr. 201; Mittig Nr. 202; Rechts Probewürfel Nr. 203 Quelle: Eigene Aufnahmen	54
Abbildung 43: Probewürfel der Serie 2 im Querschnitt Links Probewürfel Nr. 201; Mittig Nr. 202; Rechts Probewürfel Nr. 203 Quelle: Eigene Aufnahme	54

Abbildung 44: Prüfkörper nach der Druckprüfung Links Prüfkörper 201F; Mitte: Prüfkörper 202D; Rechts: Prüfkörper 203B Quelle: Eigene Aufnahmen	55
Abbildung 45: Prüfkörper 202B nach der Druckprüfung. Prüfkörper wurde von Hand auseinandergebrochen und die Bruchfuge auf das Bruchversagen hin untersucht; Quelle: Eigene Aufnahmen....	56
Abbildung 46: Links: Prüfkörper 201L nach dem Biegezugversuch. Die Bruchfuge und Risse sind mittig in den Porenräumen zu erahnen Rechts: Bruchfuge des Prüfkörpers 201L nach dem Biegezugversuch Quelle: Eigene Aufnahmen.....	57
Abbildung 47: grafische Darstellung der Sieblinie der Serie 3; Quelle: Eigene Darstellung	58
Abbildung 48: Links: Probewürfel 301 nach dem Ausschalen Rechts: Probewürfel 301 im Querschnitt; Quelle: Eigene Aufnahmen.....	58
Abbildung 49: Prüfkörper 301F nach der Druckfestigkeitsprüfung; Quelle: Eigene Aufnahme.....	59
Abbildung 50: Übersicht Prüfkörper Biegezug Serie 3 mit der internen Bezeichnung; Quelle: Eigene Aufnahme	60
Abbildung 51: Links: Bruchfuge des Prüfkörpers 301K nach dem Biegezugversuch Rechts: Prüfkörper 301K nach dem Biegezugversuch mit dem Bruch in der Mitte Quelle: Eigene Aufnahmen.....	60
Abbildung 52: Sieblinie 401/402 im Vergleich mit der Sieblinie 301; Quelle: Eigene Darstellung.....	61
Abbildung 53: Probewürfel 401 nach dem Ausschalen; Quelle: Eigene Aufnahme	62
Abbildung 54: Links: Probeserie 402 im Querschnitt. Hier die Schnittfläche unterhalb der stabförmigen Biegezugprüfkörper. Rechts: Zum Vergleich das Gefüge vom Vibrostein Nr. 72 Quelle: Eigene Aufnahmen.....	62
Abbildung 55: Prüfkörper 401B (links) und 401E (rechts) nach der Druckfestigkeitsprüfungen mit nur dünnen Rissen in der Oberfläche Quelle: Eigene Aufnahmen	63
Abbildung 56: Links: Prüfkörper 402K nach dem Biegezugversuch mit dem mittigen Bruch Rechts: Bruchfuge des Prüfkörpers 402K nach dem Biegezugversuch; Quelle: Eigene Aufnahmen.....	64
Abbildung 57: Links: Ziegelsplittbeton vom Vibrostein Nr. 72 Rechts: Ziegelsplittbeton von Serie 4 Quelle: Eigene Aufnahmen.....	67
Abbildung 58: Vergleich der drei Korngrößenzusammensetzungen der Vibrosteine von grob (links, Nr. 11) über mittel (Mitte, Nr. 71) zu fein (rechts, Nr. 72); Quelle: Eigene Aufnahme.....	67
Abbildung 59: Ziegelit® Fertigbetonwände beim Unit Center Gleisdorf; Quelle: [39], [40].....	71
Abbildung 60: Diagramme zur Wasseraufnahme Serie 1 nach ÖNORM EN 772-11:2011 [19]; Quelle: Eigene Darstellungen.....	86
Abbildung 61: Streuung der normierten Wasseraufnahme bei würfel- und quaderförmigen Proben der Serie 1 nach ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [22]; Quelle: Eigene Darstellungen	89
Abbildung 62: Streuung der normierten Wasseraufnahme bei würfel- und quaderförmigen Proben der Serie 2 nach ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [22] ; Quelle: Eigene Darstellungen.....	97
Abbildung 63: Verlauf der Mittelwerte der Wasserabgabe Serie 1 und 2; Quelle: Eigene Darstellung	104
Abbildung 64: gemittelter Verlauf der Wasseraufnahme und Wasserabgabe der Serie 1 und 2; Quelle: Eigene Darstellung.....	104
Abbildung 65: Graphische Darstellung der Sieblinien Serie 1; Quelle: Eigene Darstellung.....	119
Abbildung 66: Graphische Darstellung der Sieblinien Serie 2; Quelle: Eigene Darstellung.....	122
Abbildung 67: Graphische Darstellung der Sieblinien Serie 3; Quelle: Eigene Darstellung.....	126
Abbildung 68: Graphische Darstellung der Sieblinien Serie 4; Quelle: Eigene Darstellung.....	128

7.3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die „Kategorien für die Bestandteile von rezyklierten Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM EN 12620“; Quelle: [22] Tabelle 2	15
Tabelle 2: Übersicht über den Zustand der Vibrosteine, welche für die Versuche verwendet wurden, Quelle: Eigene Darstellung	16
Tabelle 3: Mittlere Abmessungen der vorliegenden Vibrosteine; Quelle: Eigene Darstellung	19
Tabelle 4: Mittelwerte der Prüfkörperabmessungen aufgeteilt nach den einzelnen Vibrosteinen. Die Werte des Mauersteins 75 sind wegen großer Abweichungen in den Abmessungen nicht im Mittelwert berücksichtigt. Quelle: Eigene Darstellung	21
Tabelle 5: gemittelte Rohdichten der einzelnen Vibrosteine mit den Kleinprüfkörpern bestimmt; Quelle: Eigene Darstellung	22
Tabelle 6: Mittelwerte Wasseraufnahmekoeffizient, Quelle: [23]	24
Tabelle 7: Ergebnisse für $\Delta m_{f,t}$, $\Delta m'_{0}$ und Wasseraufnahmekoeffizient W_w nach ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [9]; Quelle: Eigene Darstellung	27
Tabelle 8: Wasseraufnahmekoeffizient W_w einiger Baustoffen im Vergleich; Quelle: [30], [29]	27
Tabelle 9: Zusammenfassung der Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Prüfkörper 71P Quelle: Eigene Darstellung	29
Tabelle 10: Zusammenfassung der Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Prüfkörper 71B Quelle: Eigene Darstellung	30
Tabelle 11: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung der unbeschädigten Prüfkörper in der Übersicht Quelle: Eigene Darstellung	32
Tabelle 12: Zusammenfassung der Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Prüfkörper 16N und 16Q; Quelle: Eigene Darstellung	33
Tabelle 13: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung der vorgeschädigten Prüfkörper in der Übersicht; Quelle: Eigene Darstellung	34
Tabelle 14: Zusammenfassung der gemittelten Ergebnisse der unbeschädigten und vorgeschädigten Kleinprüfkörper; Quelle: Eigene Darstellung.....	34
Tabelle 15: Steindruckfestigkeit und mittlere Druckfestigkeit Kleinprüfkörper im Vergleich; Quelle: Eigene Darstellung, Daten Steindruckfestigkeit aus [32]	35
Tabelle 16: Zusammenfassung der Ergebnisse der Bestimmung des Elastizitätsmoduls mit Kleinprüfkörpern; Quelle: Eigene Darstellung.....	36
Tabelle 17: Zusammenfassung der Ergebnisse der Bestimmung der Querdehnzahl mit Kleinprüfkörpern; Quelle: Eigene Darstellung.....	37
Tabelle 18: Ergebnisse Biegezugfestigkeit von den unbeschädigte Prüfkörperserien; Quelle: Eigene Darstellung	38
Tabelle 19: Ergebnisse Biegezugfestigkeit von den vorgeschädigten Prüfkörperserien	40
Tabelle 20: Übersicht Ergebnisse Druckfestigkeit der Mörtelfugen; Quelle: Eigene Darstellung	41
Tabelle 21: Übersicht und Zusammenfassung der Ergebnisse Rohdichte und Wasseraufnahme; Quelle: Eigene Darstellung, Daten Beton C25/30 aus [36]	43
Tabelle 22: Übersicht und Zusammenfassung der Ergebnisse Druckfestigkeit, Biegezug, Elastizitätsmodul und Querdehnzahl; Quelle: Eigene Darstellung, Daten Beton C25/30 aus [36]	43
Tabelle 23: Schüttdichten vom gebrochenen Ziegelsplitt in kg/dm^3 bzw. g/cm^3	47
Tabelle 24: Prozentuale Zusammensetzung der Sieblinien für Serie 1; Quelle: Eigene Darstellung	47
Tabelle 25: Ergebnisse der Prüfserie 1 für Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul und Querdehnzahl; Quelle: Eigene Darstellung.....	50
Tabelle 26: Übersicht über die einzelnen ermittelten Elastizitätsmodule der Prüfkörper aus Serie 1. Rote Zahlen sind aus der Mittelwertbildung herausgenommen worden. Quelle: Eigene Darstellung 51	51
Tabelle 27: Ergebnisse Biegezugversuch Serie 1; Quelle: Eigene Darstellung	52
Tabelle 28: Prozentuale Zusammensetzung der Sieblinien für Serie 2.....	53

Tabelle 29: Ergebnisse der Prüfserie 2 für die Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul und Querdehnzahl; Quelle: Eigene Darstellung	55
Tabelle 30: Ergebnisse der mittleren Biegezugfestigkeit der Probekörperserie 2; Quelle: Eigene Darstellung	56
Tabelle 31: Sieblinie der Serie 3 im Vergleich mit der Basissieblinie aus Serie 2; Quelle: Eigene Darstellung	58
Tabelle 32: Ergebnisse der Prüfserie 3 für die Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul und Querdehnzahl; Quelle: Eigene Darstellung	59
Tabelle 33: Ergebnis Biegezugfestigkeit Probeserie 3; Quelle: Eigene Darstellung	60
Tabelle 34: Korngrößenverteilung der Probewürfel 401 und 402; Quelle: Eigene Darstellung	61
Tabelle 35: Ergebnisse der Prüfserie 3 für die Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul und Querdehnzahl; Quelle: Eigene Darstellung	63
Tabelle 36: Ergebnis Biegezugfestigkeit Probeserie 4 mit dem Gesamtmittelwert der Probewürfel Quelle: Eigene Darstellung	64
Tabelle 37: Vergleich der Rohdichte des Ziegelsplittbetons; Quelle: Eigene Darstellung	68
Tabelle 38: Vergleich der Druckfestigkeit des Ziegelsplittbetons; Quelle: Eigene Darstellung	68
Tabelle 39: Vergleich der Biegezugfestigkeit des Ziegelsplittbetons; Quelle: Eigene Darstellung	68
Tabelle 40: Vergleich der Elastizitätsmodule des Ziegelsplittbetons; Quelle: Eigene Darstellung	69
Tabelle 41: Vergleich der Querdehnzahl des Ziegelsplittbetons; Quelle: Eigene Darstellung	69
Tabelle 42: Abmessungen Kleinprüfkörper für Wasseraufnahme 1. Serie; Quelle: Eigene Darstellung	81
Tabelle 43: Messwerte Wasseraufnahme 1. Serie - Rohdaten aus Wägungen; Quelle: Eigene Darstellung	82
Tabelle 44: absolute Wasseraufnahme Serie 1; Quelle: Eigene Darstellung	83
Tabelle 45: Einzelwerte Wasseraufnahmekoeffizient nach ÖNORM EN 772-11:2011 [19]; Quelle: Eigene Darstellung	84
Tabelle 46: Prozentualer Wassergehalt der Kleinprüfkörper der Probeserie 1; Quelle: Eigene Darstellung	85
Tabelle 47: Ergebnisse der normierten Wasseraufnahme $\Delta m_{f,t}$ nach ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [22]; Quelle: Eigene Darstellung	87
Tabelle 48: Bestimmung Wasseraufnahmekoeffizient nach ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [22] für Kurve Typ A und Typ B; Quelle: Eigene Darstellung	88
Tabelle 49: Abmessungen Kleinprüfkörper für Wasseraufnahme Serie 2; Quelle: Eigene Darstellung	90
Tabelle 50: Messwerte Wasseraufnahme Serie 2 - Rohdaten aus Wägungen; Quelle: Eigene Darstellung	91
Tabelle 51: absolute Wasseraufnahme Serie 2; Quelle: Eigene Darstellung	92
Tabelle 52: Einzelwerte Wasseraufnahmekoeffizient der Serie 2 nach ÖNORM EN 772-11:2011 [19]; Quelle: Eigene Darstellung	93
Tabelle 53: Prozentualer Wassergehalt der Kleinprüfkörper der Probeserie 2; Quelle: Eigene Darstellung	94
Tabelle 54: Ergebnisse der normierten Wasseraufnahme $\Delta m_{f,t}$ der Serie 2 nach ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [22]; Quelle: Eigene Darstellung	95
Tabelle 55: Bestimmung Wasseraufnahmekoeffizient Probeserie 2 nach ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [22]; Quelle: Eigene Darstellung	96
Tabelle 56: Messwerte Wasserabgabe Serie 1; Quelle: Eigene Darstellung	98
Tabelle 57: Fortsetzung Tabelle 53: Messwerte Wasserabgabe Serie 1; Quelle: Eigene Darstellung	99
Tabelle 58: Messwerte Wasserabgabe Serie 2; Quelle: Eigene Darstellung	100
Tabelle 59: Fortsetzung Tabelle 55: Messwerte Wasserabgabe Serie 2; Quelle: Eigene Darstellung	101

Tabelle 60: Prozentualer Wassergehalt der Probekörper der Serie 1 während der Wasserabgabe; Quelle: Eigene Darstellung	102
Tabelle 61: Prozentualer Wassergehalt der Probekörper der Serie 2 während der Wasserabgabe; Quelle: Eigene Darstellung	103
Tabelle 62: Probekörperdaten Stein Nr. 11; Quelle: Eigene Darstellung	105
Tabelle 63: Einzelergebnisse Druckfestigkeit Stein Nr.11; Quelle: Eigene Darstellung	106
Tabelle 64: Probekörperdaten Stein Nr. 16; Quelle: Eigene Darstellung	107
Tabelle 65: Einzelergebnisse Druckfestigkeit Stein Nr.16; Quelle: Eigene Darstellung	108
Tabelle 66: Probekörperdaten Stein Nr. 71; Quelle: Eigene Darstellung	109
Tabelle 67: Einzelergebnisse Druckfestigkeit Stein Nr.71; Quelle: Eigene Darstellung	110
Tabelle 68: Probekörperdaten Stein Nr. 72; Quelle: Eigene Darstellung	111
Tabelle 69: Einzelergebnisse Druckfestigkeit Stein Nr.72; Quelle: Eigene Darstellung	112
Tabelle 70: Probekörperdaten Stein Nr. 74; Quelle: Eigene Darstellung	113
Tabelle 71: Einzelergebnisse Druckfestigkeit Stein Nr.74; Quelle: Eigene Darstellung	113
Tabelle 72: Probekörperdaten Stein Nr. 75; Quelle: Eigene Darstellung	114
Tabelle 73: Einzelergebnisse Druckfestigkeit Stein Nr.75; Quelle: Eigene Darstellung	114
Tabelle 74: Zusammenfassung der Ergebnisse Druckfestigkeitsversuche; Quelle: Eigene Darstellung	115
Tabelle 75: Einzelergebnisse der Biegezugfestigkeit der Steine 11 und 16, die rot markierten Einzelwerte sind nicht in den Mittelwert eingeflossen; Quelle: Eigene Darstellung	116
Tabelle 76: Einzelergebnisse der Biegezugfestigkeit der Steine 11 und 16, die rot markierten Einzelwerte sind nicht in den Mittelwert eingeflossen; Quelle: Eigene Darstellung	117
Tabelle 77: Bestimmung Schüttrohdichte der Ziegelsplitt-Sieblinien; Quelle: Eigene Darstellung	118
Tabelle 78: Zusammenfassung Schüttrohdichte der Ziegelsplittsieblinien; Quelle: Eigene Darstellung	118
Tabelle 79: Zusammensetzung Probewürfel Serie 1; Quelle: Eigene Darstellung	119
Tabelle 80: Probekörperdaten Serie 1; Quelle: Eigene Darstellung	120
Tabelle 81: Einzelergebnisse Druckfestigkeit Serie 1; Quelle: Eigene Darstellung	121
Tabelle 82: Zusammensetzung Probewürfel Serie 2; Quelle: Eigene Darstellung	122
Tabelle 83: Probekörperdaten Serie 2; Quelle: Eigene Darstellung	123
Tabelle 84: Einzelergebnisse Druckfestigkeit Serie 2; Quelle: Eigene Darstellung	125
Tabelle 85: Zusammensetzung Probewürfel Serie 3; Quelle: Eigene Darstellung	126
Tabelle 86: Einzelergebnisse Druckfestigkeit Serie 3; Quelle: Eigene Darstellung	127
Tabelle 87: Zusammensetzung Probewürfel Serie 4; Quelle: Eigene Darstellung	128
Tabelle 88: Probekörperdaten Serie 4; Quelle: Eigene Darstellung	129
Tabelle 89: Einzelergebnisse Druckfestigkeit Serie 4; Quelle: Eigene Darstellung	130
Tabelle 90: Einzelergebnisse der Biegezugfestigkeit der Probewürfel der Serie 1 und 2, die rot markierten Einzelwerte sind nicht in den Mittelwert eingeflossen; Quelle: Eigene Darstellung	131
Tabelle 91: Einzelergebnisse der Biegezugfestigkeit der Probewürfel der Serie 3 und 4, die rot markierten Einzelwerte sind nicht in den Mittelwert eingeflossen; Quelle: Eigene Darstellung	132

8. Anhang

A. Wasseraufnahme Serie 1

Probennr.		Breite b	Länge a	Höhe h	Gewicht m _{dry,s}	m _{sat}	m _{w,s}
		[mm]	[mm]	[mm]	[g]		
71B-Quader	Quader	41,25	41,47	81,24	190,38	240,52	108,80
71B-Würfel	Würfel	40,81	41,03	41,38	96,23	119,26	55,11
71F-Quader	Quader	41,61	41,52	81,50	187,90	235,00	107,76
71F-Würfel	Würfel	41,10	41,18	40,85	94,49	118,95	54,26
71L-Würfel	Würfel	41,44	41,16	41,43	96,32	120,70	55,12
71L-Quader	Quader	41,43	41,80	81,34	185,57	235,33	106,11
71H-Würfel	Würfel	41,26	41,31	39,86	89,79	110,53	50,63
71H-Quader	Quader	41,42	41,16	81,39	189,98	232,93	106,65
71D-Würfel	Würfel	40,88	40,51	41,62	92,94	115,05	52,78
71D-Quader	Quader	40,97	40,80	81,55	189,34	234,18	106,76
71P-Würfel	Würfel	40,06	39,89	40,68	90,31	110,78	51,22
71P-Quader	Quader	40,66	40,05	81,23	180,94	225,58	102,55
16A-Würfel	Würfel	40,15	39,87	42,01	94,44	114,70	53,61
16A-Quader	Quader	40,92	41,23	81,61	189,28	231,30	107,57
16K-Würfel	Würfel	42,01	41,66	41,70	93,55	115,65	53,88
16K-Quader	Quader	42,34	41,89	80,92	193,88	239,01	110,00
16O-Würfel	Würfel	41,89	40,93	41,59	91,30	112,83	52,98
16O-Quader	Quader	41,19	41,67	81,95	191,25	236,05	108,40
11C-Quader	Quader	41,01	41,02	81,57	184,34	223,07	106,59
11C-Würfel	Würfel	40,48	40,96	41,01	90,94	110,68	52,34
11J-Würfel	Würfel	40,47	41,75	40,39	93,62	113,93	54,72
11J-Quader	Quader	41,93	40,34	81,73	177,61	219,26	104,29
11P-Würfel	Würfel	40,81	41,02	41,11	92,44	111,88	53,69
11P-Quader	Quader	41,13	40,75	82,18	190,90	234,67	110,34
75A-Quader	Quader	43,87	43,66	82,31	217,89	270,40	125,88
75C-Würfel	Würfel	44,10	44,24	45,05	126,65	156,24	72,92
75C-Quader	Quader	45,18	44,97	81,92	228,96	289,72	131,32
75F-Würfel	Würfel	46,19	43,85	45,32	121,79	150,01	71,02
75G-Quader	Quader	45,16	45,29	82,81	234,42	292,38	135,59
75G-Würfel	Würfel	45,82	44,06	44,77	125,99	156,72	72,31
74B-Würfel	Würfel	41,29	41,07	40,44	96,54	118,84	56,09
74B-Quader	Quader	41,68	41,05	80,59	182,55	228,18	106,06
74C-Quader	Quader	41,16	41,55	80,33	185,71	233,33	107,50
74D-Quader	Quader	43,00	42,72	80,33	192,10	240,60	110,32
74D-Würfel	Würfel	42,75	42,78	41,32	101,74	125,40	58,99
74F-Würfel	Würfel	41,43	41,22	41,35	91,35	113,51	53,25

Tabelle 42: Abmessungen Kleinprüfkörper für Wasseraufnahme 1. Serie; Quelle: Eigene Darstellung

Probennr. Zeit [Min] Zeit [h]	m _{dry,s} [g] 0	m _{so, s} [g]										
		1	5	10	15	30	60	180	360			
								(3h)	(6h)	24	48	72
71B-Quader	190,38	199,56	202,86	204,46	205,26	206,79	208,85	212,48	215,64	224,65	226,63	227,68
71B-Würfel	96,23	105,92	109,36	111,35	112,12	114,23	114,04	114,41	114,67	115,06	115,63	115,92
71F-Quader	187,90	199,69	204,17	206,06	206,75	209,11	209,79	213,35	215,90	222,94	224,63	225,58
71F-Würfel	94,49	104,50	107,68	108,53	109,90	109,95	111,44	112,83	113,06	113,62	114,41	114,80
71L-Würfel	96,32	106,13	109,65	110,87	111,72	113,18	114,45	114,65	114,85	115,39	116,02	116,63
71L-Quader	185,57	195,73	199,29	200,42	201,20	202,36	204,16	207,16	209,94	219,58	221,27	222,18
71H-Würfel	89,79	100,92	105,48	106,06	106,46	107,04	107,51	107,65	107,77	108,23	108,85	109,48
71H-Quader	189,98	199,13	203,87	205,20	205,94	207,54	208,64	212,81	215,84	223,35	224,69	225,65
71D-Würfel	92,94	102,92	108,25	109,15	110,52	110,60	110,76	111,29	111,26	111,63	112,44	113,11
71D-Quader	189,34	198,98	203,33	204,85	205,65	207,08	208,31	212,33	215,01	224,14	226,01	226,90
71P-Würfel	90,31	100,82	103,77	104,68	105,30	106,22	107,11	107,50	107,48	107,93	108,74	109,05
71P-Quader	180,94	192,95	196,73	198,34	199,32	200,80	202,66	205,94	208,39	215,05	216,44	217,22
16A-Würfel	94,44	102,10	103,68	104,69	105,28	106,65	108,22	111,34	111,50	112,13	113,28	113,52
16A-Quader	189,28	196,88	199,65	200,75	201,57	202,85	204,48	208,72	211,95	222,62	224,69	225,24
16K-Würfel	93,55	105,12	107,96	108,80	109,27	110,31	111,48	112,34	111,89	112,70	113,77	114,30
16K-Quader	193,88	204,26	207,34	208,28	209,06	210,28	212,68	215,22	217,72	228,47	230,29	231,63
16O-Würfel	91,30	102,45	105,71	106,86	107,40	108,06	108,77	108,84	109,14	109,98	110,80	111,34
16O-Quader	191,25	200,27	203,71	204,92	205,64	206,63	208,31	212,11	215,30	225,80	227,58	228,69
11C-Quader	184,34	190,80	193,61	194,68	195,30	197,19	197,76	200,32	202,81	211,80	216,38	217,65
11C-Würfel	90,94	94,99	96,89	98,04	98,87	103,32	101,20	103,51	105,96	107,55	108,50	108,98
11J-Würfel	93,62	100,98	103,93	104,76	105,59	110,89	108,74	110,02	110,29	110,70	111,51	112,15
11J-Quader	177,61	186,44	187,55	189,25	188,64	189,79	190,80	194,51	197,82	208,51	211,11	211,60
11P-Würfel	92,44	100,40	102,58	104,04	104,64	108,54	106,80	108,04	108,18	108,88	109,72	110,23
11P-Quader	190,90	199,48	201,26	202,26	202,53	207,41	204,71	208,47	212,41	223,15	225,60	226,71
75A-Quader	217,89	225,38	229,84	231,52	232,43	233,89	235,78	240,32	244,47	255,62	259,20	260,63
75C-Würfel	126,65	138,99	143,61	145,06	145,92	147,76	149,15	150,33	150,46	151,72	152,79	153,68
75C-Quader	228,96	239,75	243,07	244,59	245,59	247,43	249,94	255,49	260,03	270,79	272,39	274,15
75F-Würfel	121,79	133,15	137,72	139,46	140,67	142,20	143,45	144,34	144,66	145,49	146,82	147,79
75G-Quader	234,42	246,03	251,07	252,72	253,92	255,60	257,87	263,51	267,78	277,88	279,87	281,07
75G-Würfel	125,99	139,61	143,10	144,82	145,92	147,89	149,17	149,78	150,24	151,56	152,74	153,45
74B-Würfel	96,54	101,66	104,34	105,35	106,23	107,62	109,30	112,55	113,43	114,34	115,11	115,80
74B-Quader	182,55	189,14	191,65	192,68	193,35	194,88	196,68	200,48	203,85	214,83	216,96	218,53
74C-Quader	185,71	192,73	195,78	197,22	197,76	199,06	200,84	204,67	207,79	217,14	220,59	221,88
74D-Quader	192,10	199,92	203,32	204,44	205,10	206,40	208,39	213,17	216,86	226,64	228,34	229,49
74D-Würfel	101,74	106,71	109,75	111,44	112,19	113,54	115,41	119,47	120,46	121,20	122,11	122,92
74F-Würfel	91,35	97,86	100,65	102,13	103,05	104,72	108,62	108,50	108,59	109,06	110,05	110,79

Tabelle 43: Messwerte Wasseraufnahme 1. Serie - Rohdaten aus Wägungen; Quelle: Eigene Darstellung

Probennr. Zeit [Min] Zeit [h]	$\Delta m_{so, s}$												
	0	1	5	10	15	30	60	180 (3h)	360 (6h)	24	48	72	gesättigt
71B-Quader	0,00	9,18	12,48	14,08	14,88	16,41	18,47	22,10	25,26	34,27	36,25	37,30	50,14
71B-Würfel	0,00	9,69	13,13	15,12	15,89	18,00	17,81	18,18	18,44	18,83	19,40	19,69	23,03
71F-Quader	0,00	11,79	16,27	18,16	18,85	21,21	21,89	25,45	28,00	35,04	36,73	37,68	47,10
71F-Würfel	0,00	10,01	13,19	14,04	15,41	15,46	16,95	18,34	18,57	19,13	19,92	20,31	24,46
71L-Würfel	0,00	9,81	13,33	14,55	15,40	16,86	18,13	18,33	18,53	19,07	19,70	20,31	24,38
71L-Quader	0,00	10,16	13,72	14,85	15,63	16,79	18,59	21,59	24,37	34,01	35,70	36,61	49,76
71H-Würfel	0,00	11,13	15,69	16,27	16,67	17,25	17,72	17,86	17,98	18,44	19,06	19,69	20,74
71H-Quader	0,00	9,15	13,89	15,22	15,96	17,56	18,66	22,83	25,86	33,37	34,71	35,67	42,95
71D-Würfel	0,00	9,98	15,31	16,21	17,58	17,66	17,82	18,35	18,32	18,69	19,50	20,17	22,11
71D-Quader	0,00	9,64	13,99	15,51	16,31	17,74	18,97	22,99	25,67	34,80	36,67	37,56	44,84
71P-Würfel	0,00	10,51	13,46	14,37	14,99	15,91	16,80	17,19	17,17	17,62	18,43	18,74	20,47
71P-Quader	0,00	12,01	15,79	17,40	18,38	19,86	21,72	25,00	27,45	34,11	35,50	36,28	44,64
16A-Würfel	0,00	7,66	9,24	10,25	10,84	12,21	13,78	16,90	17,06	17,69	18,84	19,08	20,26
16A-Quader	0,00	7,60	10,37	11,47	12,29	13,57	15,20	19,44	22,67	33,34	35,41	35,96	42,02
16K-Würfel	0,00	11,57	14,41	15,25	15,72	16,76	17,93	18,79	18,34	19,15	20,22	20,75	22,10
16K-Quader	0,00	10,38	13,46	14,40	15,18	16,40	18,80	21,34	23,84	34,59	36,41	37,75	45,13
16O-Würfel	0,00	11,15	14,41	15,56	16,10	16,76	17,47	17,54	17,84	18,68	19,50	20,04	21,53
16O-Quader	0,00	9,02	12,46	13,67	14,39	15,38	17,06	20,86	24,05	34,55	36,33	37,44	44,80
11C-Quader	0,00	6,46	9,27	10,34	10,96	12,85	13,42	15,98	18,47	27,46	32,04	33,31	38,73
11C-Würfel	0,00	4,05	5,95	7,10	7,93	12,38	10,26	12,57	15,02	16,61	17,56	18,04	19,74
11J-Würfel	0,00	7,36	10,31	11,14	11,97	17,27	15,12	16,40	16,67	17,08	17,89	18,53	20,31
11J-Quader	0,00	8,83	9,94	11,64	11,03	12,18	13,19	16,90	20,21	30,90	33,50	33,99	41,65
11P-Würfel	0,00	7,96	10,14	11,60	12,20	16,10	14,36	15,60	15,74	16,44	17,28	17,79	19,44
11P-Quader	0,00	8,58	10,36	11,36	11,63	16,51	13,81	17,57	21,51	32,25	34,70	35,81	43,77
75A-Quader	0,00	7,49	11,95	13,63	14,54	16,00	17,89	22,43	26,58	37,73	41,31	42,74	52,51
75C-Würfel	0,00	12,34	16,96	18,41	19,27	21,11	22,50	23,68	23,81	25,07	26,14	27,03	29,59
75C-Quader	0,00	10,79	14,11	15,63	16,63	18,47	20,98	26,53	31,07	41,83	43,43	45,19	60,76
75F-Würfel	0,00	11,36	15,93	17,67	18,88	20,41	21,66	22,55	22,87	23,70	25,03	26,00	28,22
75G-Quader	0,00	11,61	16,65	18,30	19,50	21,18	23,45	29,09	33,36	43,46	45,45	46,65	57,96
75G-Würfel	0,00	13,62	17,11	18,83	19,93	21,90	23,18	23,79	24,25	25,57	26,75	27,46	30,73
74B-Würfel	0,00	5,12	7,80	8,81	9,69	11,08	12,76	16,01	16,89	17,80	18,57	19,26	22,30
74B-Quader	0,00	6,59	9,10	10,13	10,80	12,33	14,13	17,93	21,30	32,28	34,41	35,98	45,63
74C-Quader	0,00	7,02	10,07	11,51	12,05	13,35	15,13	18,96	22,08	31,43	34,88	36,17	47,62
74D-Quader	0,00	7,82	11,22	12,34	13,00	14,30	16,29	21,07	24,76	34,54	36,24	37,39	48,50
74D-Würfel	0,00	4,97	8,01	9,70	10,45	11,80	13,67	17,73	18,72	19,46	20,37	21,18	23,66
74F-Würfel	0,00	6,51	9,30	10,78	11,70	13,37	17,27	17,15	17,24	17,71	18,70	19,44	22,16
Mittelwert Gesamt													35,10
Mittelwert Quader													47,14
Mittelwert Würfel													23,07

Tabelle 44: absolute Wasseraufnahme Serie 1; Quelle: Eigene Darstellung

			$c_{w,s} [g/(m^2 \cdot s)]$										
Probennr.	t [min]		1	5	10	15	30	60	180	360	24	48	72
	t _{so} [sec]		60	300	600	900	1800	3600	10800	21600	86400	172800	259200
	A _s	m _{dry,s}											
71B-Quader	2537,84	190,38 g	60,29	16,39	9,25	6,51	3,59	2,02	0,81	0,46	0,16	0,08	0,06
71B-Würfel	2492,83	96,23 g	64,79	17,56	10,11	7,08	4,01	1,98	0,68	0,34	0,09	0,05	0,03
71F-Quader	2558,95	187,90 g	76,79	21,19	11,83	8,18	4,60	2,38	0,92	0,51	0,16	0,08	0,06
71F-Würfel	2515,30	94,49 g	66,33	17,48	9,30	6,81	3,41	1,87	0,68	0,34	0,09	0,05	0,03
71L-Würfel	2531,67	96,32 g	64,58	17,55	9,58	6,76	3,70	1,99	0,67	0,34	0,09	0,05	0,03
71L-Quader	2564,07	185,57 g	66,04	17,84	9,65	6,77	3,64	2,01	0,78	0,44	0,15	0,08	0,06
71H-Würfel	2530,15	89,79 g	73,32	20,67	10,72	7,32	3,79	1,95	0,65	0,33	0,08	0,04	0,03
71H-Quader	2530,65	189,98 g	60,26	18,30	10,02	7,01	3,85	2,05	0,84	0,47	0,15	0,08	0,05
71D-Würfel	2469,95	92,94 g	67,34	20,66	10,94	7,91	3,97	2,00	0,69	0,34	0,09	0,05	0,03
71D-Quader	2489,28	189,34 g	64,54	18,73	10,38	7,28	3,96	2,12	0,86	0,48	0,16	0,09	0,06
71P-Würfel	2397,49	90,31 g	73,06	18,71	9,99	6,95	3,69	1,95	0,66	0,33	0,09	0,04	0,03
71P-Quader	2435,53	180,94 g	82,19	21,61	11,91	8,39	4,53	2,48	0,95	0,52	0,16	0,08	0,06
16A-Würfel	2400,98	94,44 g	53,17	12,83	7,12	5,02	2,83	1,59	0,65	0,33	0,09	0,05	0,03
16A-Quader	2508,63	189,28 g	50,49	13,78	7,62	5,44	3,01	1,68	0,72	0,42	0,15	0,08	0,06
16K-Würfel	2586,84	93,55 g	74,54	18,57	9,83	6,75	3,60	1,93	0,67	0,33	0,09	0,05	0,03
16K-Quader	2615,92	193,88 g	66,13	17,15	9,17	6,45	3,48	2,00	0,76	0,42	0,15	0,08	0,06
16O-Würfel	2542,76	91,30 g	73,08	18,89	10,20	7,04	3,66	1,91	0,64	0,32	0,09	0,04	0,03
16O-Quader	2544,99	191,25 g	59,07	16,32	8,95	6,28	3,36	1,86	0,76	0,44	0,16	0,08	0,06
11C-Quader	2502,53	184,34 g	43,02	12,35	6,89	4,87	2,85	1,49	0,59	0,34	0,13	0,07	0,05
11C-Würfel	2472,46	90,94 g	27,30	8,02	4,79	3,56	2,78	1,15	0,47	0,28	0,08	0,04	0,03
11J-Würfel	2511,82	93,62 g	48,84	13,68	7,39	5,29	3,82	1,67	0,60	0,31	0,08	0,04	0,03
11J-Quader	2514,16	177,61 g	58,54	13,18	7,72	4,87	2,69	1,46	0,62	0,37	0,14	0,08	0,05
11P-Würfel	2492,33	92,44 g	53,23	13,56	7,76	5,44	3,59	1,60	0,58	0,29	0,08	0,04	0,03
11P-Quader	2494,85	190,90 g	57,32	13,84	7,59	5,18	3,68	1,54	0,65	0,40	0,15	0,08	0,06
75A-Quader	2790,66	217,89 g	44,73	14,27	8,14	5,79	3,19	1,78	0,74	0,44	0,16	0,09	0,06
75C-Würfel	2834,38	126,65 g	72,56	19,95	10,83	7,55	4,14	2,21	0,77	0,39	0,10	0,05	0,04
75C-Quader	2933,24	228,96 g	61,31	16,03	8,88	6,30	3,50	1,99	0,84	0,49	0,17	0,09	0,06
75F-Würfel	2925,83	121,79 g	64,71	18,15	10,07	7,17	3,88	2,06	0,71	0,36	0,09	0,05	0,03
75G-Quader	2949,80	234,42 g	65,60	18,81	10,34	7,35	3,99	2,21	0,91	0,52	0,17	0,09	0,06
75G-Würfel	2917,63	125,99 g	77,80	19,55	10,76	7,59	4,17	2,21	0,75	0,38	0,10	0,05	0,04
74B-Würfel	2519,38	96,54 g	33,87	10,32	5,83	4,27	2,44	1,41	0,59	0,31	0,08	0,04	0,03
74B-Quader	2538,26	182,55 g	43,27	11,95	6,65	4,73	2,70	1,55	0,65	0,39	0,15	0,08	0,05
74C-Quader	2537,30	185,71 g	46,11	13,23	7,56	5,28	2,92	1,66	0,69	0,40	0,14	0,08	0,05
74D-Quader	2694,16	192,10 g	48,38	13,88	7,63	5,36	2,95	1,68	0,72	0,43	0,15	0,08	0,05
74D-Würfel	2684,15	101,74 g	30,86	9,95	6,02	4,33	2,44	1,41	0,61	0,32	0,08	0,04	0,03
74F-Würfel	2534,24	91,35 g	42,81	12,23	7,09	5,13	2,93	1,89	0,63	0,31	0,08	0,04	0,03
Mittelwert	Gesamt		58,79	16,03	8,85	6,22	3,48	1,85	0,71	0,39	0,12	0,06	0,04
Mittelwert	Quader	194,06 g	58,56	16,05	8,90	6,22	3,47	1,89	0,77	0,44	0,15	0,08	0,06
Mittelwert	Würfel	98,91 g	59,01	16,02	8,79	6,22	3,49	1,82	0,65	0,33	0,09	0,05	0,03

Tabelle 45: Einzelwerte Wasseraufnahmekoeffizient nach ÖNORM EN 772-11:2011 [20];

Quelle: Eigene Darstellung

	m _{dry,s}	W-Wert [%]											
		vt [h]	0,13	0,29	0,41	0,50	0,71	1,00	1,73	2,45	4,90	6,93	8,49
		t [h]	0,017	0,083	0,167	0,25	0,50	1	3	6	24	48	72
t [min]		1	5	10	15	30	60	180	360	1440	2880	4320	
Probennr	t _{so} [sec]	60	300	600	900	1800	3600	10800	21600	86400	172800	259200	gesättigt
71B-Quader	190,38 g	5	7	7	8	9	10	12	13	18	19	20	26
71B-Würfel	96,23 g	10	14	16	17	19	19	19	19	20	20	20	24
71F-Quader	187,90 g	6	9	10	10	11	12	14	15	19	20	20	25
71F-Würfel	94,49 g	11	14	15	16	16	18	19	20	20	21	21	26
71L-Würfel	96,32 g	10	14	15	16	18	19	19	19	20	20	21	25
71L-Quader	185,57 g	5	7	8	8	9	10	12	13	18	19	20	27
71H-Würfel	89,79 g	12	17	18	19	19	20	20	20	21	21	22	23
71H-Quader	189,98 g	5	7	8	8	9	10	12	14	18	18	19	23
71D-Würfel	92,94 g	11	16	17	19	19	19	20	20	20	21	22	24
71D-Quader	189,34 g	5	7	8	9	9	10	12	14	18	19	20	24
71P-Würfel	90,31 g	12	15	16	17	18	19	19	19	20	20	21	23
71P-Quader	180,94 g	7	9	10	10	11	12	14	15	19	20	20	25
16A-Würfel	94,44 g	8	10	11	11	13	15	18	18	19	20	20	21
16A-Quader	189,28 g	4	5	6	6	7	8	10	12	18	19	19	22
16K-Würfel	93,55 g	12	15	16	17	18	19	20	20	20	22	22	24
16K-Quader	193,88 g	5	7	7	8	8	10	11	12	18	19	19	23
16O-Würfel	91,30 g	12	16	17	18	18	19	19	20	20	21	22	24
16O-Quader	191,25 g	5	7	7	8	8	9	11	13	18	19	20	23
11C-Quader	184,34 g	4	5	6	6	7	7	9	10	15	17	18	21
11C-Würfel	90,94 g	4	7	8	9	14	11	14	17	18	19	20	22
11J-Würfel	93,62 g	8	11	12	13	18	16	18	18	18	19	20	22
11J-Quader	177,61 g	5	6	7	6	7	7	10	11	17	19	19	23
11P-Würfel	92,44 g	9	11	13	13	17	16	17	17	18	19	19	21
11P-Quader	190,90 g	4	5	6	6	9	7	9	11	17	18	19	23
75A-Quader	217,89 g	3	5	6	7	7	8	10	12	17	19	20	24
75C-Würfel	126,65 g	10	13	15	15	17	18	19	19	20	21	21	23
75C-Quader	228,96 g	5	6	7	7	8	9	12	14	18	19	20	27
75F-Würfel	121,79 g	9	13	15	16	17	18	19	19	19	21	21	23
75G-Quader	234,42 g	5	7	8	8	9	10	12	14	19	19	20	25
75G-Würfel	125,99 g	11	14	15	16	17	18	19	19	20	21	22	24
74B-Würfel	96,54 g	5	8	9	10	11	13	17	17	18	19	20	23
74B-Quader	182,55 g	4	5	6	6	7	8	10	12	18	19	20	25
74C-Quader	185,71 g	4	5	6	6	7	8	10	12	17	19	19	26
74D-Quader	192,10 g	4	6	6	7	7	8	11	13	18	19	19	25
74D-Würfel	101,74 g	5	8	10	10	12	13	17	18	19	20	21	23
74F-Würfel	91,35 g	7	10	12	13	15	19	19	19	19	20	21	24
Mittelwert P1 Gesamt		6,98%	9,50	10,47	11,06	12,39	13,10	14,72	15,74	18,59	19,62	20,20	23,78
Mittelwert P1 Quader		4,71%	6,45	7,15	7,50	8,36	9,09	11,09	12,76	17,73	18,88	19,44	24,26
Mittelwert P1 Würfel		9,25%	12,55	13,78	14,62	16,42	17,12	18,35	18,72	19,46	20,36	20,95	23,30

Tabelle 46: Prozentualer Wassergehalt der Kleinprüfkörper der Probeserie 1; Quelle: Eigene Darstellung

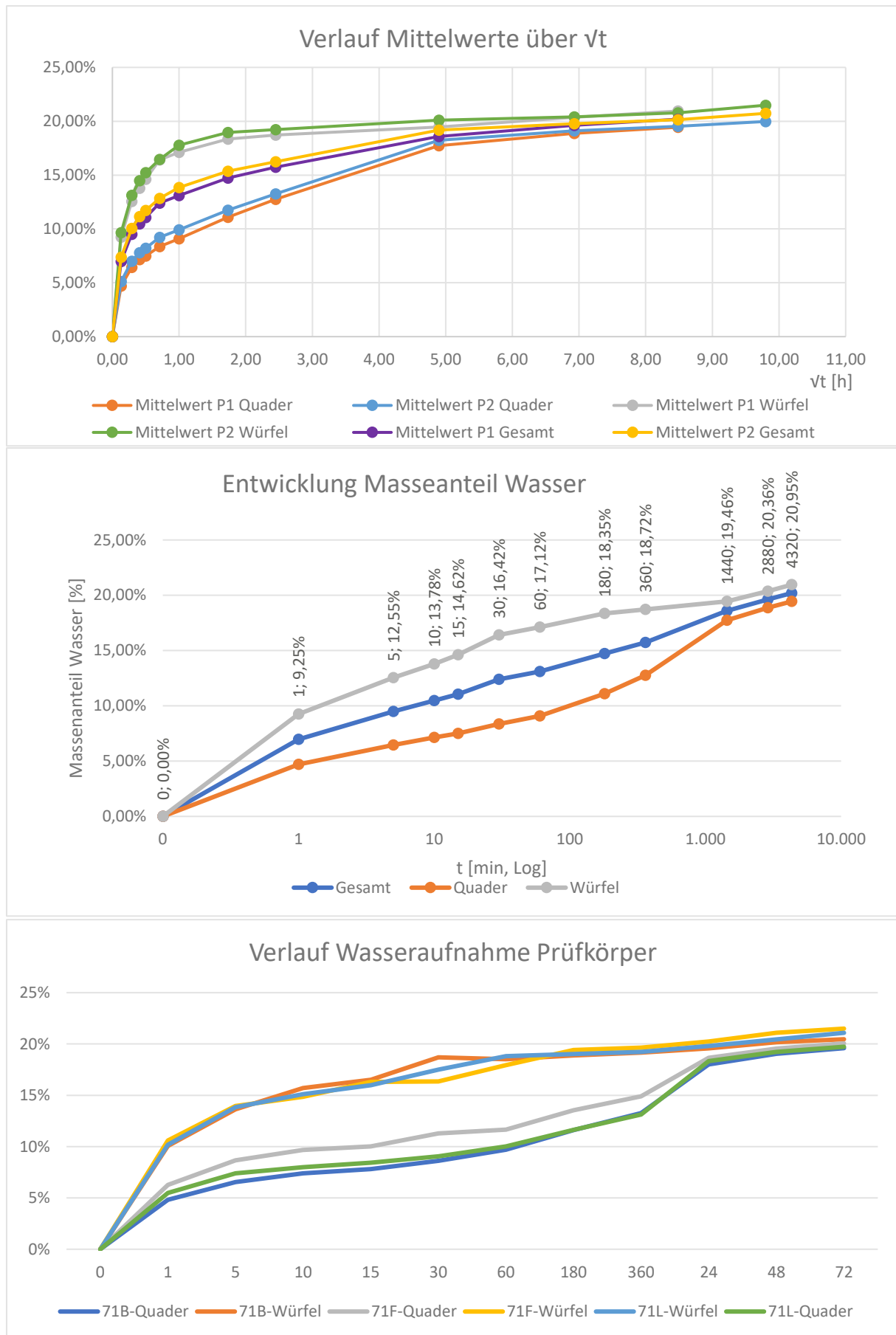


Abbildung 60: Diagramme zur Wasseraufnahme Serie 1 nach ÖNORM EN 772-11:2011 [20];
Quelle: Eigene Darstellungen

Probennr. Zeit vt [h] Zeit [Min]	A _s [mm ²]	m _{dry,s} [g]	Δm _{f,t} [kg/m ²]										
			0,13 1	0,29 5	0,41 10	0,50 15	0,71 30	1,00 60	1,73 3h	2,45 6h	4,90 24h	6,93 48h	8,49 72h
71B-Quader	2537,84	190,38	3,62	4,92	5,55	5,86	6,47	7,28	8,71	9,95	13,50	14,28	14,70
71B-Würfel	2492,83	96,23	3,89	5,27	6,07	6,37	6,82	7,14	7,29	7,40	7,55	7,78	7,90
71F-Quader	2558,95	187,90	4,61	6,36	7,10	7,37	7,90	8,55	9,95	10,94	13,69	14,35	14,72
71F-Würfel	2515,30	94,49	3,98	5,24	5,70	6,13	6,54	6,74	7,29	7,38	7,61	7,92	8,07
71L-Würfel	2531,67	96,32	3,87	5,27	5,75	6,08	6,66	7,16	7,24	7,32	7,53	7,78	8,02
71L-Quader	2564,07	185,57	3,96	5,35	5,79	6,10	6,55	7,25	8,42	9,50	13,26	13,92	14,28
71H-Würfel	2530,15	89,79	4,40	5,81	6,43	6,59	6,82	7,00	7,06	7,11	7,29	7,53	7,78
71H-Quader	2530,65	189,98	3,62	5,49	6,01	6,31	6,94	7,37	9,02	10,22	13,19	13,72	14,10
71D-Würfel	2469,95	92,94	4,04	6,20	6,56	6,87	7,15	7,21	7,43	7,42	7,57	7,89	8,17
71D-Quader	2489,28	189,34	3,87	5,62	6,23	6,55	7,13	7,62	9,24	10,31	13,98	14,73	15,09
71P-Würfel	2397,49	90,31	4,38	5,61	5,99	6,25	6,64	7,01	7,17	7,16	7,35	7,69	7,82
71P-Quader	2435,53	180,94	4,93	6,48	7,14	7,55	8,15	8,92	10,26	11,27	14,01	14,58	14,90
16A-Würfel	2400,98	94,44	3,19	3,85	4,27	4,51	5,09	5,74	7,04	7,11	7,37	7,85	7,95
16A-Quader	2508,63	189,28	3,03	4,13	4,57	4,90	5,41	6,06	7,75	9,04	13,29	14,12	14,33
16K-Würfel	2586,84	93,55	4,47	5,57	5,90	6,08	6,48	6,93	7,26	7,09	7,40	7,82	8,02
16K-Quader	2615,92	193,88	3,97	5,15	5,50	5,80	6,27	7,19	8,16	9,11	13,22	13,92	14,43
16O-Würfel	2542,76	91,30	4,39	5,67	6,12	6,33	6,59	6,87	6,90	7,02	7,35	7,67	7,88
16O-Quader	2544,99	191,25	3,54	4,90	5,37	5,65	6,04	6,70	8,20	9,45	13,58	14,28	14,71
11C-Quader	2502,53	184,34	2,58	3,70	4,13	4,38	4,74	5,36	6,39	7,38	10,97	12,80	13,31
11C-Würfel	2472,46	90,94	1,64	2,41	2,87	3,21	3,63	4,15	5,08	6,07	6,72	7,10	7,30
11J-Würfel	2511,82	93,62	2,93	4,10	4,44	4,77	5,28	6,02	6,53	6,64	6,80	7,12	7,38
11J-Quader	2514,16	177,61	3,51	3,95	4,23	4,39	4,84	5,25	6,72	8,04	12,29	13,32	13,52
11P-Würfel	2492,33	92,44	3,19	4,07	4,65	4,90	5,26	5,76	6,26	6,32	6,60	6,93	7,14
11P-Quader	2494,85	190,90	3,44	4,15	4,55	4,66	5,01	5,54	7,04	8,62	12,93	13,91	14,35
75A-Quader	2790,66	217,89	2,68	4,28	4,88	5,21	5,73	6,41	8,04	9,52	13,52	14,80	15,32
75C-Würfel	2834,38	126,65	4,35	5,98	6,50	6,80	7,45	7,94	8,35	8,40	8,84	9,22	9,54
75C-Quader	2933,24	228,96	3,68	4,81	5,33	5,67	6,30	7,15	9,04	10,59	14,26	14,81	15,41
75F-Würfel	2925,83	121,79	3,88	5,44	6,04	6,45	6,98	7,40	7,71	7,82	8,10	8,55	8,89
75G-Quader	2949,80	234,42	3,94	5,64	6,20	6,61	7,18	7,95	9,86	11,31	14,73	15,41	15,81
75G-Würfel	2917,63	125,99	4,67	5,86	6,45	6,83	7,51	7,94	8,15	8,31	8,76	9,17	9,41
74B-Würfel	2519,38	96,54	2,03	3,10	3,50	3,85	4,40	5,06	6,35	6,70	7,07	7,37	7,64
74B-Quader	2538,26	182,55	2,60	3,59	3,99	4,25	4,86	5,57	7,06	8,39	12,72	13,56	14,18
74C-Quader	2537,30	185,71	2,77	3,97	4,54	4,75	5,26	5,96	7,47	8,70	12,39	13,75	14,26
74D-Quader	2694,16	192,10	2,90	4,16	4,58	4,83	5,31	6,05	7,82	9,19	12,82	13,45	13,88
74D-Würfel	2684,15	101,74	1,85	2,98	3,61	3,89	4,40	5,09	6,61	6,97	7,25	7,59	7,89
74F-Würfel	2534,24	91,35	2,57	3,67	4,25	4,62	5,28	6,03	6,77	6,80	6,99	7,38	7,67
Mittelwert Quader	2596,71		3,51	4,81	5,32	5,60	6,12	6,79	8,29	9,53	13,24	14,09	14,52
Mittelwert Würfel	2575,57		3,54	4,78	5,28	5,58	6,05	6,51	7,03	7,17	7,45	7,80	8,03

Tabelle 47: Ergebnisse der normierten Wasseraufnahme Δm_{f,t} nach ÖNORM EN ISO 15148:2002
+ A1:2016 [23]; Quelle: Eigene Darstellung

Kurve Typ B - $W_{w,t}$ [kg/(m ² *vh)]												Kurve Typ A - $W_{w,t}$ [kg/(m ² *vh)]	Quader	Würfel
v_t [h]	0,13	0,29	0,41	0,50	0,71	1,00	1,73	2,45	4,90	6,93	8,49	v_t [h]		
t [h]	0,017	0,083	0,167	0,25	0,50	1	3	6	24	48	72	t [h]	24	1
t [min]	1	5	10	15	30	60	180	360	1440	2880	4320	$\Delta m'_0$		
71B-Quader	28,02	17,03	13,59	11,73	9,14	7,28	5,03	4,06	2,76	2,06	1,73	5,43	1,65	
71B-Würfel	30,11	18,25	14,86	12,75	9,64	7,14	4,21	3,02	1,54	1,12	0,93	4,93		2,21
71F-Quader	35,69	22,03	17,38	14,73	11,17	8,55	5,74	4,47	2,80	2,07	1,74	7,08	1,35	
71F-Würfel	30,83	18,17	13,96	12,25	9,25	6,74	4,21	3,01	1,55	1,14	0,95	4,88		1,86
71L-Würfel	30,01	18,24	14,08	12,17	9,42	7,16	4,18	2,99	1,54	1,12	0,95	4,66		2,50
71L-Quader	30,69	18,54	14,19	12,19	9,26	7,25	4,86	3,88	2,71	2,01	1,68	5,50	1,59	
71H-Würfel	34,07	20,11	15,75	13,18	9,64	7,00	4,08	2,90	1,49	1,09	0,92	5,68		1,32
71H-Quader	28,01	19,01	14,73	12,61	9,81	7,37	5,21	4,17	2,69	1,98	1,66	5,93	1,48	
71D-Würfel	31,30	21,47	16,08	13,73	10,11	7,21	4,29	3,03	1,54	1,14	0,96	6,00		1,21
71D-Quader	30,00	19,47	15,26	13,10	10,08	7,62	5,33	4,21	2,85	2,13	1,78	6,00	1,63	
71P-Würfel	33,96	19,45	14,68	12,50	9,38	7,01	4,14	2,92	1,50	1,11	0,92	5,20		1,81
71P-Quader	38,20	22,46	17,50	15,09	11,53	8,92	5,93	4,60	2,86	2,10	1,76	7,34	1,36	
16A-Würfel	24,71	13,33	10,46	9,03	7,19	5,74	4,06	2,90	1,50	1,13	0,94	3,17		2,57
16A-Quader	23,47	14,32	11,20	9,80	7,65	6,06	4,47	3,69	2,71	2,04	1,69	4,17	1,86	
16K-Würfel	34,64	19,30	14,44	12,15	9,16	6,93	4,19	2,89	1,51	1,13	0,95	5,10		1,83
16K-Quader	30,74	17,82	13,48	11,61	8,87	7,19	4,71	3,72	2,70	2,01	1,70	5,21	1,64	
16O-Würfel	33,97	19,63	14,99	12,66	9,32	6,87	3,98	2,86	1,50	1,11	0,93	5,41		1,46
16O-Quader	27,45	16,96	13,16	11,31	8,55	6,70	4,73	3,86	2,77	2,06	1,73	4,89	1,77	
11C-Quader	20,00	12,83	10,12	8,76	6,70	5,36	3,69	3,01	2,24	1,85	1,57	3,75	1,47	
11C-Würfel	12,69	8,34	7,03	6,41	5,14	4,15	2,94	2,48	1,37	1,03	0,86	1,88		2,27
11J-Würfel	22,70	14,22	10,86	9,53	7,47	6,02	3,77	2,71	1,39	1,03	0,87	3,36		2,66
11J-Quader	27,20	13,70	10,37	8,77	6,85	5,25	3,88	3,28	2,51	1,92	1,59	3,54	1,79	
11P-Würfel	24,74	14,09	11,40	9,79	7,43	5,76	3,61	2,58	1,35	1,00	0,84	3,64		2,12
11P-Quader	26,64	14,38	11,15	9,32	7,09	5,54	4,07	3,52	2,64	2,01	1,69	3,73	1,88	
75A-Quader	20,79	14,83	11,96	10,42	8,11	6,41	4,64	3,89	2,76	2,14	1,80	4,53	1,83	
75C-Würfel	33,72	20,73	15,91	13,60	10,53	7,94	4,82	3,43	1,81	1,33	1,12	5,36		2,58
75C-Quader	28,49	16,66	13,05	11,34	8,90	7,15	5,22	4,32	2,91	2,14	1,82	5,19	1,85	
75F-Würfel	30,07	18,86	14,79	12,91	9,87	7,40	4,45	3,19	1,65	1,23	1,05	4,92		2,48
75G-Quader	30,49	19,55	15,20	13,22	10,15	7,95	5,69	4,62	3,01	2,22	1,86	6,15	1,75	
75G-Würfel	36,16	20,31	15,81	13,66	10,62	7,94	4,71	3,39	1,79	1,32	1,11	5,25		2,69
74B-Würfel	15,74	10,72	8,57	7,69	6,22	5,06	3,67	2,74	1,44	1,06	0,90	2,39		2,68
74B-Quader	20,11	12,42	9,78	8,51	6,87	5,57	4,08	3,43	2,60	1,96	1,67	3,58	1,87	
74C-Quader	21,43	13,75	11,11	9,50	7,44	5,96	4,31	3,55	2,53	1,98	1,68	4,19	1,67	
74D-Quader	22,48	14,43	11,22	9,65	7,51	6,05	4,52	3,75	2,62	1,94	1,64	4,26	1,75	
74D-Würfel	14,34	10,34	8,85	7,79	6,22	5,09	3,81	2,85	1,48	1,10	0,93	2,36		2,73
74F-Würfel	19,90	12,71	10,42	9,23	7,46	6,03	3,91	2,78	1,43	1,07	0,90	2,89		3,14
Mittelwert Quader	27,22	16,68	13,03	11,20	8,65	6,79	4,78	3,89	2,70	2,03	1,71	5,03	1,68	
Mittelwert Würfel	27,43	16,57	12,94	11,17	8,56	6,51	4,06	2,93	1,52	1,13	0,95	4,28		2,23

Tabelle 48: Bestimmung Wasseraufnahmekoeffizient nach ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [23] für Kurve Typ A und Typ B; Quelle: Eigene Darstellung

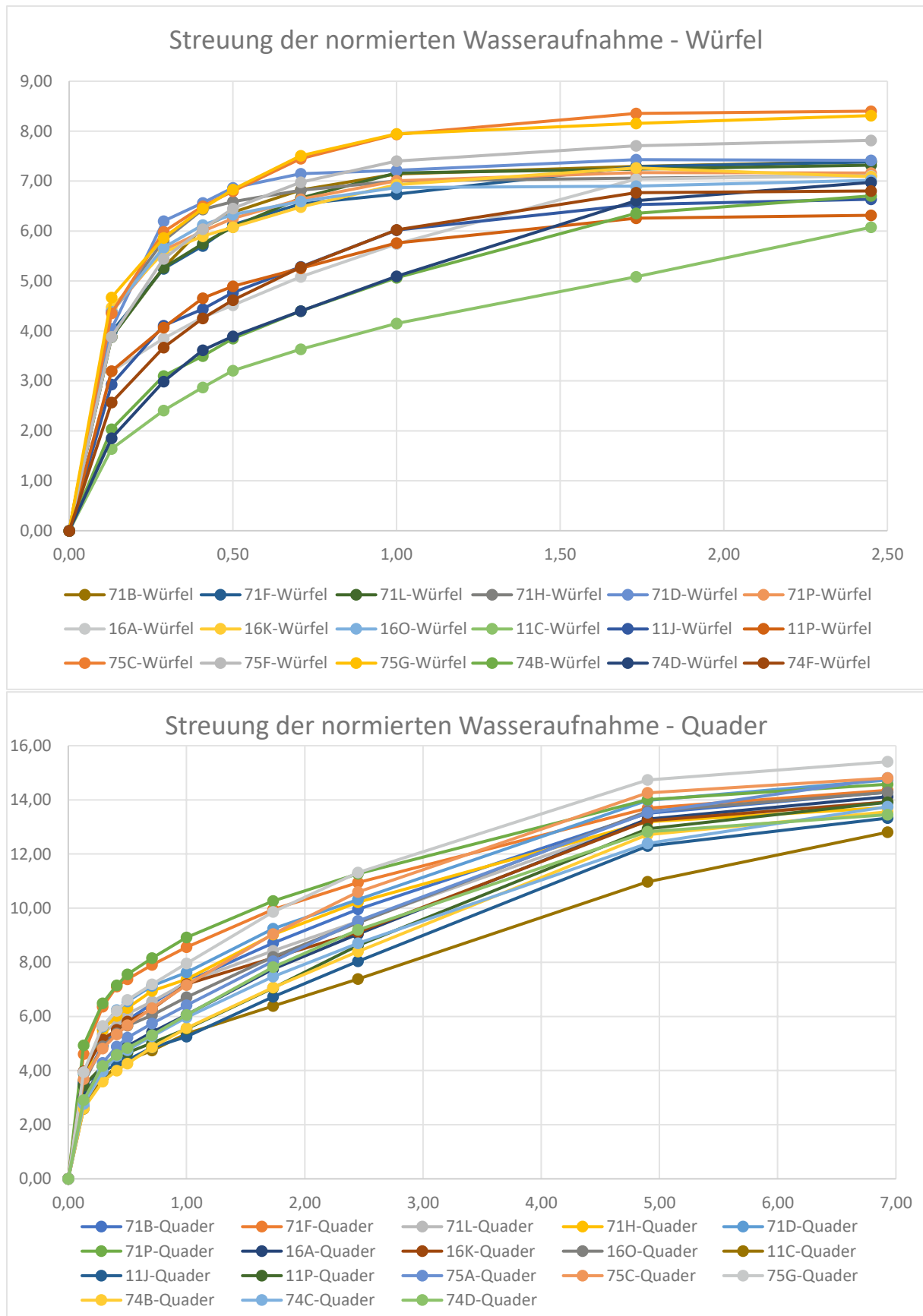


Abbildung 61: Streuung der normierten Wasseraufnahme bei würfel- und quaderförmigen Proben der Serie 1 nach ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [23]; Quelle: Eigene Darstellungen

B. Wasseraufnahme Serie 2

Probennr.		Breite b	Länge a	Höhe h	Gewicht $m_{\text{dry},s}$	m_{sat}	$m_{w,s}$
		[mm]	[mm]	[mm]	[g]		
72C-Quader	Quader	41,72	42,41	81,54	194,45	244,67	112,31
72C-Würfel	Würfel	41,91	41,24	41,82	95,90	120,43	56,21
72G-Würfel	Würfel	42,06	42,33	42,20	102,22	128,36	59,12
72G-Quader	Quader	42,50	42,07	81,65	194,12	244,79	112,57
72O-Würfel	Würfel	41,96	41,67	41,89	98,76	123,85	59,01
72O-Quader	Quader	42,01	41,94	81,95	193,36	242,68	111,89
71B-Würfel	Würfel	41,07	40,98	41,35	95,30	117,96	54,57
71B-Quader	Quader	41,31	41,43	80,98	188,57	236,07	107,26
71H-Würfel	Würfel	41,28	41,23	39,44	88,88	111,52	50,54
71H-Quader	Quader	41,40	41,07	81,28	186,78	234,11	107,06
71P-Würfel	Würfel	40,11	39,93	40,53	89,42	112,05	50,90
71P-Quader	Quader	40,58	40,05	81,36	179,10	223,74	102,47
16C-Würfel	Würfel	41,30	41,90	43,15	101,50	125,75	58,15
16C-Quader	Quader	41,31	43,03	80,72	200,42	244,41	112,72
16K-Würfel	Würfel	42,27	41,78	41,71	92,72	116,10	53,18
16K-Quader	Quader	42,14	42,01	81,41	192,22	237,55	109,04
16M-Würfel	Würfel	42,00	41,78	42,08	104,19	127,98	59,77
16M-Quader	Quader	41,47	42,11	81,10	187,26	232,83	106,89
11B-Würfel	Würfel	39,60	40,91	41,31	92,13	112,34	53,32
11B-Quader	Quader	40,62	40,91	81,71	177,52	219,79	103,83
11G-Quader	Quader	40,25	40,21	81,46	179,82	221,75	104,59
11G-Würfel	Würfel	40,00	40,61	40,11	90,91	111,13	52,29
11O-Würfel	Würfel	40,44	39,89	40,29	87,77	107,25	51,59
11O-Quader	Quader	40,71	40,15	82,66	177,47	219,83	102,79
75A-Würfel	Würfel	44,29	44,60	43,85	110,03	136,98	65,20
75A-Quader	Quader	43,99	43,79	81,63	215,99	267,93	125,08
75C-Würfel	Würfel	44,36	44,45	45,20	125,74	156,49	72,69
75C-Quader	Quader	45,22	45,37	81,91	227,36	282,21	131,06
75F-Würfel	Würfel	46,14	43,86	45,40	120,97	150,50	71,28
75F-Quader	Quader	44,66	45,08	82,47	240,83	299,35	140,81
74B-Würfel	Würfel	41,57	41,30	40,92	95,93	118,03	55,93
74B-Quader	Quader	41,51	41,22	80,16	181,38	227,12	105,13
74D-Würfel	Würfel	42,60	42,77	41,33	101,24	126,36	58,82
74D-Quader	Quader	42,89	42,67	80,63	190,81	241,16	110,74
74F-Würfel	Würfel	41,17	41,42	41,48	90,83	113,39	52,49
74F-Quader	Quader	42,09	41,84	81,12	189,64	238,45	109,88

Tabelle 49: Abmessungen Kleinprüfkörper für Wasseraufnahme Serie 2; Quelle: Eigene Darstellung

Probennr. Zeit [Min] Zeit [h]	m _{dry,s} [g]	m _{so, s} [g]											
		1	5	10	15	30	60	180	360	24	48	72	96
72C-Quader	194,45	206,85	211,47	213,08	213,74	215,58	217,11	220,20	222,53	230,12	232,09	233,06	233,78
72C-Würfel	95,90	107,67	111,21	112,82	113,16	114,15	115,34	115,56	115,64	116,50	117,17	117,06	118,86
72G-Würfel	102,22	112,83	116,39	117,64	118,38	119,82	121,17	121,58	121,77	122,75	122,86	123,83	124,17
72G-Quader	194,12	204,78	207,53	208,57	209,13	210,65	212,83	215,62	217,75	226,16	230,02	230,70	231,99
72O-Würfel	98,76	111,53	115,31	116,68	117,12	117,90	118,51	118,32	118,56	119,67	119,88	120,77	121,33
72O-Quader	193,36	207,47	211,20	212,62	213,46	214,84	216,79	219,81	222,86	231,11	232,40	233,08	233,70
71B-Würfel	95,30	103,81	108,05	109,71	110,74	112,25	113,28	113,91	114,26	114,74	114,89	115,44	116,00
71B-Quader	188,57	198,05	201,82	203,07	203,99	205,42	207,27	210,69	213,37	223,37	225,38	226,26	226,89
71H-Würfel	88,88	98,19	102,19	103,74	104,53	105,80	106,78	107,11	107,25	107,92	107,78	108,47	108,76
71H-Quader	186,78	197,04	201,58	203,36	203,89	205,25	206,96	210,35	213,01	222,20	223,15	223,77	224,50
71P-Würfel	89,42	98,90	102,63	103,60	104,33	105,22	106,67	107,28	107,44	107,82	108,03	108,35	109,17
71P-Quader	179,10	190,95	195,21	197,03	198,05	199,68	201,33	204,80	207,19	214,22	215,07	216,16	216,71
16C-Würfel	101,50	110,67	114,63	115,92	116,68	118,06	119,27	120,13	119,82	121,13	121,41	121,87	122,37
16C-Quader	200,42	206,60	209,80	211,61	212,46	214,33	216,67	220,62	224,36	234,70	235,53	236,22	236,98
16K-Würfel	92,72	103,00	105,33	106,55	107,39	108,86	110,18	111,72	111,83	112,74	112,85	113,38	114,03
16K-Quader	192,22	201,48	204,67	205,98	206,57	207,86	209,46	212,70	215,18	226,44	228,81	229,43	230,44
16M-Würfel	104,19	112,70	116,22	117,53	118,09	119,30	121,02	123,12	123,48	124,23	124,47	125,02	125,60
16M-Quader	187,26	196,31	199,60	200,99	201,95	202,91	204,45	208,30	211,49	222,06	222,85	223,83	224,59
11B-Würfel	92,13	100,54	102,88	103,79	104,64	105,37	106,42	107,99	108,18	108,81	109,14	109,30	109,76
11B-Quader	177,52	183,91	190,35	191,79	192,40	193,79	194,85	198,46	200,83	209,02	210,05	210,69	211,40
11G-Quader	179,82	189,14	192,07	193,19	193,70	194,73	196,05	198,90	200,75	210,55	212,29	213,08	214,08
11G-Würfel	90,91	98,36	101,23	102,98	103,79	104,81	106,23	107,04	106,98	107,59	107,74	108,22	108,97
11O-Würfel	87,77	96,64	99,24	100,33	100,79	101,52	102,53	102,84	102,80	103,77	104,07	104,11	104,83
11O-Quader	177,47	187,94	190,84	192,19	192,88	194,05	195,17	198,48	200,82	209,87	211,19	211,90	213,03
75A-Würfel	110,03	123,13	127,19	128,77	129,34	130,58	131,06	131,81	131,95	133,38	133,80	133,95	134,83
75A-Quader	215,99	224,37	228,16	229,76	230,71	232,30	234,17	238,92	242,79	254,30	258,10	258,83	259,96
75C-Würfel	125,74	137,41	142,03	143,51	144,30	145,70	147,42	149,92	150,36	151,39	152,16	152,20	152,86
75C-Quader	227,36	239,92	244,40	246,08	247,06	258,56	252,55	255,15	259,13	270,45	271,91	272,62	273,69
75F-Würfel	120,97	131,55	136,18	138,13	139,11	140,83	142,94	144,39	144,63	146,00	146,40	146,39	147,60
75F-Quader	240,83	254,36	259,71	262,84	264,31	266,91	269,31	273,67	277,38	286,54	288,11	289,12	289,86
74B-Würfel	95,93	102,44	104,95	106,11	106,98	108,23	109,76	112,58	113,57	114,58	114,95	115,37	115,79
74B-Quader	181,38	189,65	191,64	192,79	193,48	194,99	196,77	200,28	203,45	213,34	215,58	216,42	217,50
74D-Würfel	101,24	108,26	110,87	112,08	112,76	114,33	116,14	119,66	120,77	121,63	122,17	122,22	122,96
74D-Quader	190,81	200,07	202,25	203,69	204,34	205,66	207,04	210,98	214,42	225,59	227,51	228,13	228,97
74F-Würfel	90,83	98,77	101,91	102,94	103,89	105,09	106,73	108,16	108,38	109,12	109,37	109,69	110,37
74F-Quader	189,64	197,47	199,82	201,32	202,25	203,78	205,94	210,35	214,51	225,08	226,25	226,90	228,03

Tabelle 50: Messwerte Wasseraufnahme Serie 2 - Rohdaten aus Wägungen; Quelle: Eigene Darstellung

Probennr. Zeit [Min] Zeit [h]	$\Delta m_{so, s}$													gesättigt
	0	1	5	10	15	30	60	180 (3h)	360 (6h)	24	48	72		
72C-Quader	230,12	206,85	211,47	213,08	213,74	215,58	217,11	220,20	222,53	230,12	232,09	233,06	233,78	244,67
72C-Würfel	116,50	107,67	111,21	112,82	113,16	114,15	115,34	115,56	115,64	116,50	117,17	117,06	118,86	120,43
72G-Würfel	122,75	112,83	116,39	117,64	118,38	119,82	121,17	121,58	121,77	122,75	122,86	123,83	124,17	128,36
72G-Quader	226,16	204,78	207,53	208,57	209,13	210,65	212,83	215,62	217,75	226,16	230,02	230,70	231,99	244,79
72O-Würfel	119,67	111,53	115,31	116,68	117,12	117,90	118,51	118,32	118,56	119,67	119,88	120,77	121,33	123,85
72O-Quader	231,11	207,47	211,20	212,62	213,46	214,84	216,79	219,81	222,86	231,11	232,40	233,08	233,70	242,68
71B-Würfel	114,74	103,81	108,05	109,71	110,74	112,25	113,28	113,91	114,26	114,74	114,89	115,44	116,00	117,96
71B-Quader	223,37	198,05	201,82	203,07	203,99	205,42	207,27	210,69	213,37	223,37	225,38	226,26	226,89	236,07
71H-Würfel	107,92	98,19	102,19	103,74	104,53	105,80	106,78	107,11	107,25	107,92	107,78	108,47	108,76	111,52
71H-Quader	222,20	197,04	201,58	203,36	203,89	205,25	206,96	210,35	213,01	222,20	223,15	223,77	224,50	234,11
71P-Würfel	107,82	98,90	102,63	103,60	104,33	105,22	106,67	107,28	107,44	107,82	108,03	108,35	109,17	112,05
71P-Quader	214,22	190,95	195,21	197,03	198,05	199,68	201,33	204,80	207,19	214,22	215,07	216,16	216,71	223,74
16C-Würfel	121,13	110,67	114,63	115,92	116,68	118,06	119,27	120,13	119,82	121,13	121,41	121,87	122,37	125,75
16C-Quader	234,70	206,60	209,80	211,61	212,46	214,33	216,67	220,62	224,36	234,70	235,53	236,22	236,98	244,41
16K-Würfel	112,74	103,00	105,33	106,55	107,39	108,86	110,18	111,72	111,83	112,74	112,85	113,38	114,03	116,10
16K-Quader	226,44	201,48	204,67	205,98	206,57	207,86	209,46	212,70	215,18	226,44	228,81	229,43	230,44	237,55
16M-Würfel	124,23	112,70	116,22	117,53	118,09	119,30	121,02	123,12	123,48	124,23	124,47	125,02	125,60	127,98
16M-Quader	222,06	196,31	199,60	200,99	201,95	202,91	204,45	208,30	211,49	222,06	222,85	223,83	224,59	232,83
11B-Würfel	108,81	100,54	102,88	103,79	104,64	105,37	106,42	107,99	108,18	108,81	109,14	109,30	109,76	112,34
11B-Quader	209,02	183,91	190,35	191,79	192,40	193,79	194,85	198,46	200,83	209,02	210,05	210,69	211,40	219,79
11G-Quader	210,55	189,14	192,07	193,19	193,70	194,73	196,05	198,90	200,75	210,55	212,29	213,08	214,08	221,75
11G-Würfel	107,59	98,36	101,23	102,98	103,79	104,81	106,23	107,04	106,98	107,59	107,74	108,22	108,97	111,13
11O-Würfel	103,77	96,64	99,24	100,33	100,79	101,52	102,53	102,84	102,80	103,77	104,07	104,11	104,83	107,25
11O-Quader	209,87	187,94	190,84	192,19	192,88	194,05	195,17	198,48	200,82	209,87	211,19	211,90	213,03	219,83
75A-Würfel	133,38	123,13	127,19	128,77	129,34	130,58	131,06	131,81	131,95	133,38	133,80	133,95	134,83	136,98
75A-Quader	254,30	224,37	228,16	229,76	230,71	232,30	234,17	238,92	242,79	254,30	258,10	258,83	259,96	267,93
75C-Würfel	151,39	137,41	142,03	143,51	144,30	145,70	147,42	149,92	150,36	151,39	152,16	152,20	152,86	156,49
75C-Quader	270,45	239,92	244,40	246,08	247,06	258,56	252,55	255,15	259,13	270,45	271,91	272,62	273,69	282,21
75F-Würfel	146,00	131,55	136,18	138,13	139,11	140,83	142,94	144,39	144,63	146,00	146,40	146,39	147,60	150,50
75F-Quader	286,54	254,36	259,71	262,84	264,31	266,91	269,31	273,67	277,38	286,54	288,11	289,12	289,86	299,35
74B-Würfel	114,58	102,44	104,95	106,11	106,98	108,23	109,76	112,58	113,57	114,58	114,95	115,37	115,79	118,03
74B-Quader	213,34	189,65	191,64	192,79	193,48	194,99	196,77	200,28	203,45	213,34	215,58	216,42	217,50	227,12
74D-Würfel	121,63	108,26	110,87	112,08	112,76	114,33	116,14	119,66	120,77	121,63	122,17	122,22	122,96	126,36
74D-Quader	225,59	200,07	202,25	203,69	204,34	205,66	207,04	210,98	214,42	225,59	227,51	228,13	228,97	241,16
74F-Würfel	109,12	98,77	101,91	102,94	103,89	105,09	106,73	108,16	108,38	109,12	109,37	109,69	110,37	113,39
74F-Quader	225,08	197,47	199,82	201,32	202,25	203,78	205,94	210,35	214,51	225,08	226,25	226,90	228,03	238,45
Mittelwert Gesamt														35,93
Mittelwert Quader														47,85
Mittelwert Würfel														24,00

Tabelle 51: absolute Wasseraufnahme Serie 2; Quelle: Eigene Darstellung

Probennr.		c _{w, s} [g/(m²*s)]												
		t [min]	1	5	10	15	30	60	180	360	24	48	72	96
		t _{so} [sec]	60	300	600	900	1800	3600	10800	21600	86400	172800	259200	345600
		A _s	m _{dry,s}											
72C-Quader	2778,91	194,45	74,37	20,42	11,17	7,71	4,22	2,27	0,86	0,47	0,15	0,08	0,05	0,04
72C-Würfel	2726,17	95,90	71,96	18,72	10,34	7,03	3,72	1,98	0,67	0,34	0,09	0,05	0,03	0,02
72G-Würfel	2793,08	102,22	63,31	16,91	9,20	6,43	3,50	1,88	0,64	0,32	0,09	0,04	0,03	0,02
72G-Quader	2802,82	194,12	63,39	15,95	8,59	5,95	3,28	1,85	0,71	0,39	0,13	0,07	0,05	0,04
72O-Würfel	2752,03	98,76	77,34	20,05	10,85	7,41	3,86	1,99	0,66	0,33	0,09	0,04	0,03	0,02
72O-Quader	2769,30	193,36	84,92	21,47	11,59	8,06	4,31	2,35	0,88	0,49	0,16	0,08	0,06	0,04
71B-Würfel	2667,65	95,30	53,17	15,93	9,00	6,43	3,53	1,87	0,65	0,33	0,08	0,04	0,03	0,02
71B-Quader	2704,35	188,57	58,42	16,33	8,94	6,34	3,46	1,92	0,76	0,42	0,15	0,08	0,05	0,04
71H-Würfel	2692,09	88,88	57,64	16,48	9,20	6,46	3,49	1,85	0,63	0,32	0,08	0,04	0,03	0,02
71H-Quader	2689,94	186,78	63,57	18,34	10,27	7,07	3,81	2,08	0,81	0,45	0,15	0,08	0,05	0,04
71P-Würfel	2562,07	89,42	61,67	17,19	9,22	6,47	3,43	1,87	0,65	0,33	0,08	0,04	0,03	0,02
71P-Quader	2592,79	179,10	76,17	20,71	11,53	8,12	4,41	2,38	0,92	0,50	0,16	0,08	0,06	0,04
16C-Würfel	2728,87	101,50	56,01	16,04	8,81	6,18	3,37	1,81	0,63	0,31	0,08	0,04	0,03	0,02
16C-Quader	2789,65	200,42	36,92	11,21	6,69	4,80	2,77	1,62	0,67	0,40	0,14	0,07	0,05	0,04
16K-Würfel	2774,64	92,72	61,75	15,15	8,31	5,87	3,23	1,75	0,63	0,32	0,08	0,04	0,03	0,02
16K-Quader	2780,10	192,22	55,51	14,93	8,25	5,74	3,13	1,72	0,68	0,38	0,14	0,08	0,05	0,04
16M-Würfel	2760,12	104,19	51,39	14,53	8,06	5,60	3,04	1,69	0,64	0,32	0,08	0,04	0,03	0,02
16M-Quader	2749,26	187,26	54,86	14,96	8,32	5,94	3,16	1,74	0,71	0,41	0,15	0,07	0,05	0,04
11B-Würfel	2586,16	92,13	54,20	13,86	7,51	5,37	2,84	1,53	0,57	0,29	0,07	0,04	0,03	0,02
11B-Quader	2640,12	177,52	40,34	16,20	9,01	6,26	3,42	1,82	0,73	0,41	0,14	0,07	0,05	0,04
11G-Quader	2583,97	179,82	60,11	15,80	8,62	5,97	3,21	1,74	0,68	0,37	0,14	0,07	0,05	0,04
11G-Würfel	2591,72	90,91	47,91	13,27	7,76	5,52	2,98	1,64	0,58	0,29	0,07	0,04	0,03	0,02
11O-Würfel	2577,11	87,77	57,36	14,84	8,12	5,61	2,96	1,59	0,54	0,27	0,07	0,04	0,02	0,02
11O-Quader	2604,83	177,47	66,99	17,11	9,42	6,57	3,54	1,89	0,75	0,42	0,14	0,07	0,05	0,04
75A-Würfel	3042,01	110,03	71,77	18,80	10,27	7,05	3,75	1,92	0,66	0,33	0,09	0,05	0,03	0,02
75A-Quader	2979,68	215,99	46,87	13,61	7,70	5,49	3,04	1,69	0,71	0,42	0,15	0,08	0,06	0,04
75C-Würfel	3037,52	125,74	64,03	17,88	9,75	6,79	3,65	1,98	0,74	0,38	0,10	0,05	0,03	0,03
75C-Quader	3138,71	227,36	66,69	18,10	9,94	6,97	5,52	2,23	0,82	0,47	0,16	0,08	0,06	0,04
75F-Würfel	3103,70	120,97	56,81	16,34	9,21	6,49	3,55	1,97	0,70	0,35	0,09	0,05	0,03	0,02
75F-Quader	3090,15	240,83	72,97	20,37	11,87	8,44	4,69	2,56	0,98	0,55	0,17	0,09	0,06	0,05
74B-Würfel	2711,28	95,93	40,02	11,09	6,26	4,53	2,52	1,42	0,57	0,30	0,08	0,04	0,03	0,02
74B-Quader	2703,80	181,38	50,98	12,65	7,03	4,97	2,80	1,58	0,65	0,38	0,14	0,07	0,05	0,04
74D-Würfel	2846,44	101,24	41,10	11,28	6,35	4,50	2,55	1,45	0,60	0,32	0,08	0,04	0,03	0,02
74D-Quader	2856,84	190,81	54,02	13,35	7,51	5,26	2,89	1,58	0,65	0,38	0,14	0,07	0,05	0,04
74F-Würfel	2696,34	90,83	49,08	13,70	7,49	5,38	2,94	1,64	0,60	0,30	0,08	0,04	0,03	0,02
74F-Quader	2768,21	189,64	47,14	12,26	7,03	5,06	2,84	1,64	0,69	0,42	0,15	0,08	0,05	0,04
Mittelwert	Gesamt		58,63	15,99	8,87	6,22	3,43	1,85	0,69	0,37	0,12	0,06	0,04	0,03
Mittelwert	Quader	194,28	59,68	16,32	9,08	6,37	3,58	1,93	0,76	0,43	0,15	0,08	0,05	0,04
Mittelwert	Würfel	99,14	57,58	15,67	8,65	6,06	3,27	1,77	0,63	0,32	0,08	0,04	0,03	0,02

Tabelle 52: Einzelwerte Wasseraufnahmekoeffizient der Serie 2 nach ÖNORM EN 772-11:2011 [20];

Quelle: Eigene Darstellung

Probennr	m _{dry,s}		W-Wert [%]											
	vt [h]	0,13	0,29	0,41	0,50	0,71	1,00	1,73	2,45	4,90	6,93	8,49	9,80	
	t [h]	0,017	0,083	0,17	0,25	0,50	1	3	6	24	48	72	96	
	t [min]	1	5	10	15	30	60	180	360	1440	2880	4320	5760	
	t _{so} [sec]	60	300	600	900	1800	3600	10800	21600	86400	172800	259200	345600	gesättigt
72C-Quader	194,45	6	9	10	10	11	12	13	14	18	19	20	20	26
72C-Würfel	95,90	12	16	18	18	19	20	21	21	21	22	22	24	26
72G-Würfel	102,22	10	14	15	16	17	19	19	19	20	20	21	21	26
72G-Quader	194,12	5	7	7	8	9	10	11	12	17	18	19	20	26
72O-Würfel	98,76	13	17	18	19	19	20	20	20	21	21	22	23	25
72O-Quader	193,36	7	9	10	10	11	12	14	15	20	20	21	21	26
71B-Würfel	95,30	9	13	15	16	18	19	20	20	20	21	21	22	24
71B-Quader	188,57	5	7	8	8	9	10	12	13	18	20	20	20	25
71H-Würfel	88,88	10	15	17	18	19	20	21	21	21	21	22	22	25
71H-Quader	186,78	5	8	9	9	10	11	13	14	19	19	20	20	25
71P-Würfel	89,42	11	15	16	17	18	19	20	20	21	21	21	22	25
71P-Quader	179,10	7	9	10	11	11	12	14	16	20	20	21	21	25
16C-Würfel	101,50	9	13	14	15	16	18	18	18	19	20	20	21	24
16C-Quader	200,42	3	5	6	6	7	8	10	12	17	18	18	18	22
16K-Würfel	92,72	11	14	15	16	17	19	20	21	22	22	22	23	25
16K-Quader	192,22	5	6	7	7	8	9	11	12	18	19	19	20	24
16M-Würfel	104,19	8	12	13	13	15	16	18	19	19	19	20	21	23
16M-Quader	187,26	5	7	7	8	8	9	11	13	19	19	20	20	24
11B-Würfel	92,13	9	12	13	14	14	16	17	17	18	18	19	19	22
11B-Quader	177,52	4	7	8	8	9	10	12	13	18	18	19	19	24
11G-Quader	179,82	5	7	7	8	8	9	11	12	17	18	18	19	23
11G-Würfel	90,91	8	11	13	14	15	17	18	18	18	19	19	20	22
11O-Würfel	87,77	10	13	14	15	16	17	17	17	18	19	19	19	22
11O-Quader	177,47	6	8	8	9	9	10	12	13	18	19	19	20	24
75A-Würfel	110,03	12	16	17	18	19	19	20	20	21	22	22	23	24
75A-Quader	215,99	4	6	6	7	8	8	11	12	18	19	20	20	24
75C-Würfel	125,74	9	13	14	15	16	17	19	20	20	21	21	22	24
75C-Quader	227,36	6	7	8	9	14	11	12	14	19	20	20	20	24
75F-Würfel	120,97	9	13	14	15	16	18	19	20	21	21	21	22	24
75F-Quader	240,83	6	8	9	10	11	12	14	15	19	20	20	20	24
74B-Würfel	95,93	7	9	11	12	13	14	17	18	19	20	20	21	23
74B-Quader	181,38	5	6	6	7	8	8	10	12	18	19	19	20	25
74D-Würfel	101,24	7	10	11	11	13	15	18	19	20	21	21	21	25
74D-Quader	190,81	5	6	7	7	8	9	11	12	18	19	20	20	26
74F-Würfel	90,83	9	12	13	14	16	18	19	19	20	20	21	22	25
74F-Quader	189,64	4	5	6	7	7	9	11	13	19	19	20	20	26
Mittelwert P1 Gesamt	6,98%	7,39	10,06	11,14	11,72	12,83	13,84	15,35	16,24	19,17	19,76	20,15	20,73	
Mittelwert P1 Quader	4,71%	5,13	7,01	7,80	8,21	9,22	9,91	11,74	13,26	18,23	19,12	19,52	19,98	
Mittelwert P1 Würfel	9,25%	9,65	13,12	14,49	15,23	16,45	17,77	18,97	19,22	20,11	20,40	20,78	21,49	

Tabelle 53: Prozentualer Wassergehalt der Kleinprüfkörper der Probeserie 2; Quelle: Eigene Darstellung

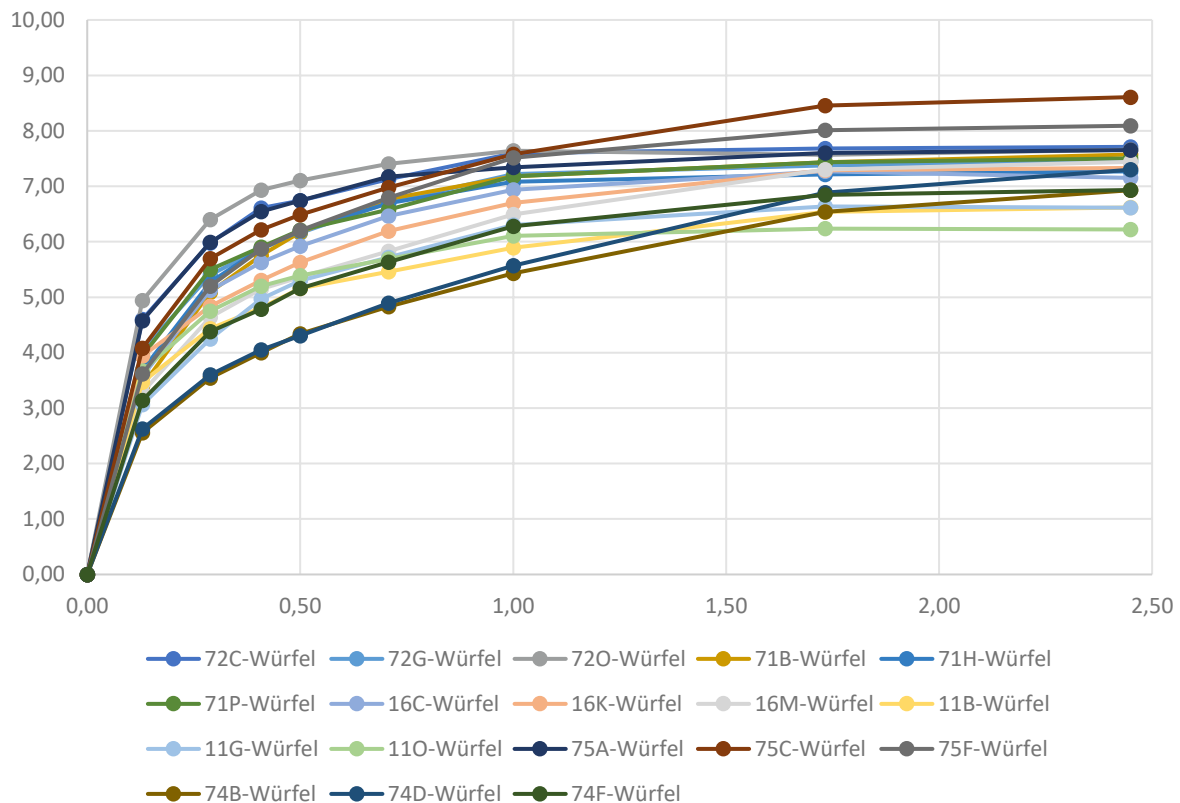
Probennr. Zeit vt [h] Zeit [Min]	A _s [mm ²]	m _{dry,s} [g]	Δm _{f,t} [kg/m ²]											
			0,13	0,29	0,41	0,50	0,71	1,00	1,73	2,45	4,90	6,93	8,49	9,80
			1	5	10	15	30	60	3h	6h	24h	48h	72h	96h
72C-Quader	2610,65	194,45	4,75	6,52	7,14	7,39	8,09	8,68	9,86	10,76	13,66	14,42	14,79	15,07
72C-Würfel	2559,87	95,90	4,60	5,98	6,61	6,74	7,13	7,59	7,68	7,71	8,05	8,31	8,27	8,97
72G-Würfel	2624,30	102,22	4,04	5,40	5,88	6,16	6,71	7,22	7,38	7,45	7,82	7,86	8,23	8,36
72G-Quader	2633,68	194,12	4,05	5,09	5,49	5,70	6,28	7,10	8,16	8,97	12,17	13,63	13,89	14,38
72O-Würfel	2584,77	98,76	4,94	6,40	6,93	7,10	7,40	7,64	7,57	7,66	8,09	8,17	8,52	8,73
72O-Quader	2601,40	193,36	5,42	6,86	7,40	7,73	8,26	9,01	10,17	11,34	14,51	15,01	15,27	15,51
71B-Würfel	2503,55	95,30	3,40	5,09	5,76	6,17	6,77	7,18	7,43	7,57	7,76	7,82	8,04	8,27
71B-Quader	2538,87	188,57	3,73	5,22	5,71	6,07	6,64	7,37	8,71	9,77	13,71	14,50	14,85	15,09
71H-Würfel	2527,07	88,88	3,68	5,27	5,88	6,19	6,70	7,08	7,21	7,27	7,53	7,48	7,75	7,87
71H-Quader	2525,00	186,78	4,06	5,86	6,57	6,78	7,31	7,99	9,33	10,39	14,03	14,40	14,65	14,94
71P-Würfel	2401,99	89,42	3,95	5,50	5,90	6,21	6,58	7,18	7,44	7,50	7,66	7,75	7,88	8,22
71P-Quader	2431,53	179,10	4,87	6,63	7,37	7,79	8,46	9,14	10,57	11,55	14,44	14,79	15,24	15,47
16C-Würfel	2562,47	101,50	3,58	5,12	5,63	5,92	6,46	6,93	7,27	7,15	7,66	7,77	7,95	8,14
16C-Quader	2620,97	200,42	2,36	3,58	4,27	4,59	5,31	6,20	7,71	9,13	13,08	13,40	13,66	13,95
16K-Würfel	2606,54	92,72	3,94	4,84	5,31	5,63	6,19	6,70	7,29	7,33	7,68	7,72	7,93	8,18
16K-Quader	2611,80	192,22	3,55	4,77	5,27	5,49	5,99	6,60	7,84	8,79	13,10	14,01	14,25	14,63
16M-Würfel	2592,56	104,19	3,28	4,64	5,15	5,36	5,83	6,49	7,30	7,44	7,73	7,82	8,03	8,26
16M-Quader	2582,10	187,26	3,50	4,78	5,32	5,69	6,06	6,66	8,15	9,38	13,48	13,78	14,16	14,46
11B-Würfel	2425,14	92,13	3,47	4,43	4,81	5,16	5,46	5,89	6,54	6,62	6,88	7,01	7,08	7,27
11B-Quader	2477,06	177,52	2,58	5,18	5,76	6,01	6,57	7,00	8,45	9,41	12,72	13,13	13,39	13,68
11G-Quader	2423,05	179,82	3,85	5,06	5,52	5,73	6,15	6,70	7,87	8,64	12,68	13,40	13,73	14,14
11G-Würfel	2430,50	90,91	3,07	4,25	4,97	5,30	5,72	6,30	6,64	6,61	6,86	6,92	7,12	7,43
11O-Würfel	2416,45	87,77	3,67	4,75	5,20	5,39	5,69	6,11	6,24	6,22	6,62	6,75	6,76	7,06
11O-Quader	2443,11	177,47	4,29	5,47	6,03	6,31	6,79	7,24	8,60	9,56	13,26	13,80	14,09	14,56
75A-Würfel	2864,23	110,03	4,57	5,99	6,54	6,74	7,17	7,34	7,60	7,65	8,15	8,30	8,35	8,66
75A-Quader	2804,12	215,99	2,99	4,34	4,91	5,25	5,82	6,48	8,18	9,56	13,66	15,02	15,28	15,68
75C-Würfel	2859,90	125,74	4,08	5,70	6,21	6,49	6,98	7,58	8,45	8,61	8,97	9,24	9,25	9,48
75C-Quader	2957,53	227,36	4,25	5,76	6,33	6,66	7,17	7,84	9,40	10,74	14,57	15,06	15,30	15,67
75F-Würfel	2923,70	120,97	3,62	5,20	5,87	6,20	6,79	7,51	8,01	8,09	8,56	8,70	8,69	9,11
75F-Quader	2910,67	240,83	4,65	6,49	7,56	8,07	8,96	9,78	11,28	12,56	15,70	16,24	16,59	16,84
74B-Würfel	2545,54	95,93	2,56	3,54	4,00	4,34	4,83	5,43	6,54	6,93	7,33	7,47	7,64	7,80
74B-Quader	2538,34	181,38	3,26	4,04	4,50	4,77	5,36	6,06	7,45	8,69	12,59	13,47	13,80	14,23
74D-Würfel	2675,70	101,24	2,62	3,60	4,05	4,31	4,89	5,57	6,88	7,30	7,62	7,82	7,84	8,12
74D-Quader	2685,72	190,81	3,45	4,26	4,80	5,04	5,53	6,04	7,51	8,79	12,95	13,66	13,90	14,21
74F-Würfel	2531,16	90,83	3,14	4,38	4,78	5,16	5,63	6,28	6,85	6,93	7,23	7,32	7,45	7,72
74F-Quader	2600,35	189,64	3,01	3,91	4,49	4,85	5,44	6,27	7,96	9,56	13,63	14,08	14,33	14,76
Mittelwert Quader	2.610,89		3,81	5,21	5,80	6,11	6,68	7,34	8,73	9,87	13,55	14,21	14,51	14,85
Mittelwert Würfel	2.590,86		3,68	5,00	5,53	5,81	6,27	6,78	7,24	7,34	7,68	7,79	7,93	8,20

Tabelle 54: Ergebnisse der normierten Wasseraufnahme Δm_{f,t} der Serie 2 nach
ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [23]; Quelle: Eigene Darstellung

Kurve Typ B - W _{w,t} [kg/(m²*vh)]													Kurve Typ A - W _{w,t} [kg/(m²*vh)]		
													Quader	Würfel	
v _t [h]	0,13	0,29	0,41	0,50	0,71	1,00	1,73	2,45	4,90	6,93	8,49	9,80	v _t [h]	4,90	1,00
t [h]	0,017	0,083	0,167	0,25	0,50	1	3	6	24	48	72	96	t [h]	24	1
t [min]	1	5	10	15	30	60	180	360	1440	2880	4320	5760	Δm'₀		
72C-Quader	36,79	22,58	17,48	14,78	11,45	8,68	5,69	4,39	2,79	2,08	1,74	1,54	7,16	1,33	
72C-Würfel	35,62	20,72	16,19	13,49	10,08	7,59	4,43	3,15	1,64	1,20	0,97	0,92	5,60		1,99
72G-Würfel	31,32	18,70	14,39	12,32	9,48	7,22	4,26	3,04	1,60	1,14	0,97	0,85	4,82		2,40
72G-Quader	31,35	17,64	13,44	11,40	8,88	7,10	4,71	3,66	2,48	1,97	1,64	1,47	5,41	1,38	
72O-Würfel	38,27	22,18	16,98	14,21	10,47	7,64	4,37	3,13	1,65	1,18	1,00	0,89	6,17		1,47
72O-Quader	42,01	23,76	18,14	15,45	11,68	9,01	5,87	4,63	2,96	2,17	1,80	1,58	7,33	1,47	
71B-Würfel	26,33	17,64	14,10	12,33	9,57	7,18	4,29	3,09	1,59	1,13	0,95	0,84	4,55		2,63
71B-Quader	28,92	18,08	13,99	12,15	9,39	7,37	5,03	3,99	2,80	2,09	1,75	1,54	5,52	1,67	
71H-Würfel	28,54	18,25	14,40	12,39	9,47	7,08	4,16	2,97	1,54	1,08	0,91	0,80	4,81		2,27
71H-Quader	31,47	20,30	16,08	13,55	10,34	7,99	5,39	4,24	2,86	2,08	1,73	1,52	6,26	1,58	
71P-Würfel	30,57	19,05	14,46	12,41	9,30	7,18	4,29	3,06	1,56	1,12	0,93	0,84	4,95		2,23
71P-Quader	37,75	22,95	18,06	15,59	11,97	9,14	6,10	4,72	2,95	2,14	1,80	1,58	7,57	1,40	
16C-Würfel	27,72	17,75	13,78	11,85	9,14	6,93	4,20	2,92	1,56	1,12	0,94	0,83	4,57		2,36
16C-Quader	18,26	12,40	10,46	9,19	7,51	6,20	4,45	3,73	2,67	1,93	1,61	1,42	4,12	1,83	
16K-Würfel	30,55	16,76	13,00	11,26	8,76	6,70	4,21	2,99	1,57	1,11	0,93	0,83	4,24		2,46
16K-Quader	27,46	16,51	12,90	10,99	8,47	6,60	4,53	3,59	2,67	2,02	1,68	1,49	4,78	1,70	
16M-Würfel	25,43	16,07	12,60	10,72	8,24	6,49	4,22	3,04	1,58	1,13	0,95	0,84	4,05		2,45
16M-Quader	27,15	16,56	13,02	11,38	8,57	6,66	4,70	3,83	2,75	1,99	1,67	1,48	4,90	1,75	
11B-Würfel	26,86	15,36	11,78	10,32	7,72	5,89	3,78	2,70	1,40	1,01	0,83	0,74	4,00		1,89
11B-Quader	19,98	17,94	14,11	12,01	9,29	7,00	4,88	3,84	2,60	1,90	1,58	1,40	5,53	1,47	
11G-Quader	29,79	17,51	13,52	11,46	8,70	6,70	4,55	3,53	2,59	1,93	1,62	1,44	5,04	1,56	
11G-Würfel	23,74	14,71	12,16	10,60	8,09	6,30	3,83	2,70	1,40	1,00	0,84	0,76	3,75		2,55
11O-Würfel	28,43	16,44	12,73	10,78	8,05	6,11	3,60	2,54	1,35	0,97	0,80	0,72	4,39		1,72
11O-Quader	33,20	18,96	14,76	12,62	9,60	7,24	4,97	3,90	2,71	1,99	1,66	1,49	5,69	1,55	
75A-Würfel	35,43	20,75	16,03	13,48	10,15	7,34	4,39	3,12	1,66	1,20	0,98	0,88	5,72		1,62
75A-Quader	23,15	15,03	12,03	10,50	8,23	6,48	4,72	3,90	2,79	2,17	1,80	1,60	4,59	1,85	
75C-Würfel	31,61	19,73	15,22	12,98	9,87	7,58	4,88	3,51	1,83	1,33	1,09	0,97	5,11		2,47
75C-Quader	32,90	19,96	15,50	13,32	10,14	7,84	5,42	4,39	2,97	2,17	1,80	1,60	6,04	1,74	
75F-Würfel	28,03	18,02	14,38	12,41	9,61	7,51	4,62	3,30	1,75	1,26	1,02	0,93	4,51		3,00
75F-Quader	36,01	22,47	18,52	16,13	12,67	9,78	6,51	5,13	3,21	2,34	1,96	1,72	7,92		
74B-Würfel	19,81	12,27	9,80	8,68	6,83	5,43	3,78	2,83	1,50	1,08	0,90	0,80	2,92		2,51
74B-Quader	25,24	14,00	11,01	9,53	7,58	6,06	4,30	3,55	2,57	1,94	1,63	1,45	4,20	1,71	
74D-Würfel	20,32	12,47	9,92	8,61	6,92	5,57	3,97	2,98	1,56	1,13	0,92	0,83	2,90		2,67
74D-Quader	26,71	14,76	11,75	10,08	7,82	6,04	4,34	3,59	2,64	1,97	1,64	1,45	4,28	1,77	
74F-Würfel	24,30	15,16	11,72	10,32	7,97	6,28	3,95	2,83	1,47	1,06	0,88	0,79	3,72		2,56
74F-Quader	23,32	13,56	11,00	9,70	7,69	6,27	4,60	3,90	2,78	2,03	1,69	1,51	4,23	1,92	
Mittelwert Quader	29,53	18,05	14,21	12,21	9,44	7,34	5,04	4,03	2,77	2,05	1,71	1,52	5,59	1,63	
Mittelwert Würfel	28,49	17,34	13,54	11,62	8,87	6,78	4,18	3,00	1,57	1,12	0,93	0,84	4,49		2,29

Tabelle 55: Bestimmung Wasseraufnahmekoeffizient Probeserie 2 nach ÖNORM EN ISO 15148:2002
+ A1:2016 [23]; Quelle: Eigene Darstellung

Streuung der normierten Wasseraufnahme - Würfel



Streuung der normierten Wasseraufnahme - Quader

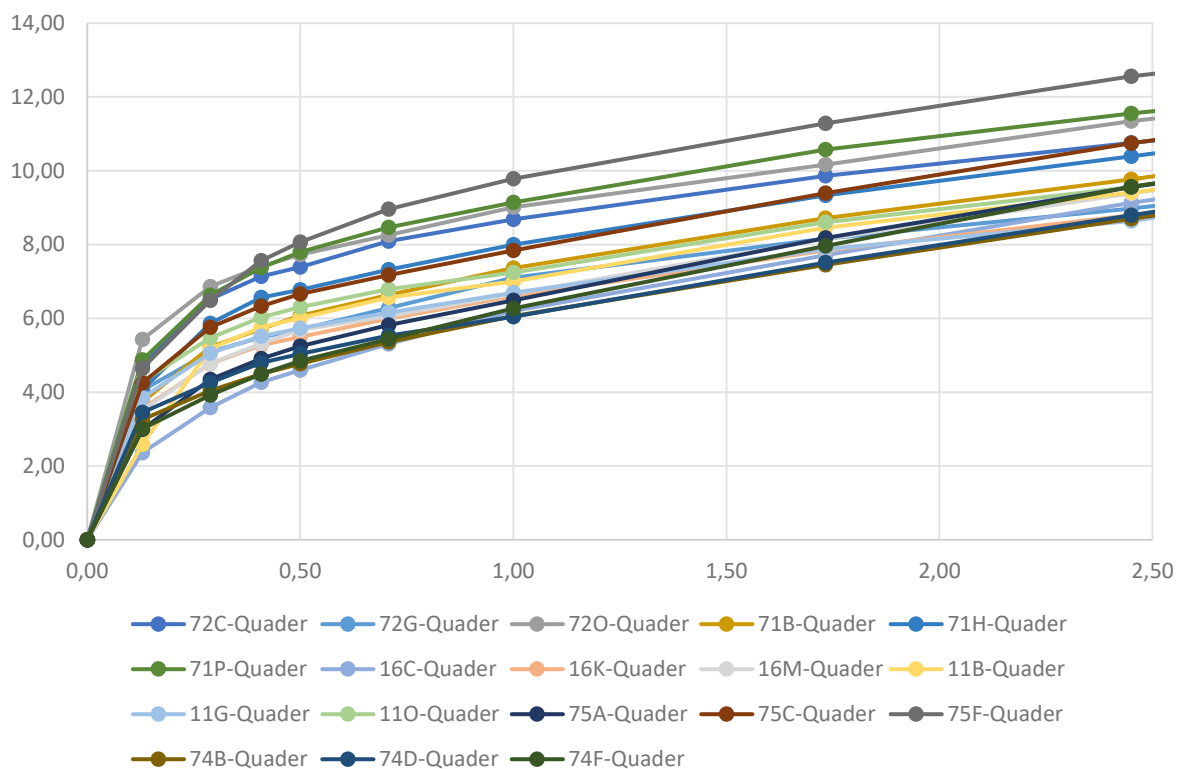


Abbildung 62: Streuung der normierten Wasseraufnahme bei würfel- und quaderförmigen Proben der Serie 2 nach ÖNORM EN ISO 15148:2002 + A1:2016 [22] ; Quelle: Eigene Darstellungen

C. Wasserabgabe

Probennr.	t [min] t [h]	0	2	5	10	15	30	60	120 (2h)	180 (3h)	360 (6h)
71B-Quader		240,52	233,44	232,00	231,71	231,48	230,69	230,37	229,28	229,23	228,44
71B-Würfel		119,26	118,82	117,25	116,73	116,31	116,09	116,67	116,05	115,78	115,46
71F-Quader		235,00	230,71	229,33	228,59	228,36	227,60	227,35	226,55	226,03	225,12
71F-Würfel		118,95	117,40	116,15	115,67	115,74	115,41	115,30	115,03	114,84	114,64
71L-Würfel		120,70	119,08	118,06	118,02	117,47	117,03	117,01	116,83	116,64	116,49
71L-Quader		235,33	227,70	226,26	225,31	224,87	224,34	224,30	223,58	223,04	222,13
71H-Würfel		110,53	110,40	109,94	109,47	109,43	109,11	109,04	108,80	108,71	108,42
71H-Quader		232,93	230,36	229,46	228,47	228,33	227,50	227,03	226,41	225,94	225,06
71D-Würfel		115,05	114,94	114,23	113,77	113,48	113,15	112,83	112,59	112,46	112,22
71D-Quader		234,18	231,61	230,80	230,02	229,61	228,99	228,48	227,90	227,52	226,31
71P-Würfel		110,78	110,74	110,09	109,80	109,50	109,34	109,13	109,03	108,85	108,49
71P-Quader		225,58	221,11	220,46	220,18	219,40	218,15	218,46	218,09	217,73	216,67
16A-Würfel		114,70	115,13	114,48	109,13	114,26	114,02	113,58	113,12	112,96	112,64
16A-Quader		231,30	230,56	229,81	227,94	228,71	228,36	228,00	227,18	226,73	225,31
16K-Würfel		115,65	115,92	115,13	113,40	114,69	114,42	114,18	113,97	113,79	113,46
16K-Quader		239,01	236,22	235,14	229,36	234,43	233,92	233,30	232,54	232,14	230,95
16O-Würfel		112,83	112,67	111,97	109,44	111,48	111,11	110,95	110,69	110,58	110,20
16O-Quader		236,05	234,17	233,11	232,16	231,77	231,22	230,58	229,92	229,40	228,49
11C-Quader		223,07	222,03	221,15	220,51	220,06	219,80	219,19	218,42	218,01	216,66
11C-Würfel		110,68	110,68	110,21	109,86	109,68	109,60	109,36	108,92	108,80	108,35
11J-Würfel		113,93	113,67	113,20	112,64	112,41	112,35	112,14	111,98	111,88	111,57
11J-Quader		219,26	215,85	215,04	214,28	213,85	213,83	212,94	212,25	211,88	210,78
11P-Würfel		111,88	111,43	111,06	110,69	110,45	110,22	110,16	109,92	109,82	109,53
11P-Quader		234,67	231,17	230,64	229,96	229,47	229,09	228,67	227,91	227,48	226,04
75A-Quader		270,40	265,38	234,66	263,86	263,67	263,52	262,89	262,28	261,69	260,56
75C-Würfel		156,24	155,51	154,81	154,59	154,44	154,36	154,07	153,66	153,44	152,94
75C-Quader		289,72	279,59	278,35	277,77	277,43	277,35	276,67	275,98	275,48	247,45
75F-Würfel		150,01	149,38	148,56	148,37	148,06	148,27	148,01	147,83	147,62	146,97
75G-Quader		292,38	286,14	284,93	284,50	284,09	284,21	283,83	282,90	282,52	281,40
75G-Würfel		156,72	156,00	155,38	155,00	154,67	154,73	154,50	154,20	154,01	153,73
74B-Würfel		118,84	117,75	117,40	117,10	116,80	116,66	116,45	116,11	116,70	115,86
74B-Quader		228,18	224,04	223,18	222,49	221,92	221,35	221,18	220,78	220,21	219,11
74C-Quader		233,33	227,91	227,14	226,64	226,15	226,65	225,18	224,94	224,38	223,60
74D-Quader		240,60	235,66	234,46	233,61	233,00	232,55	231,70	231,10	230,76	230,31
74D-Würfel		125,40	126,18	124,56	124,32	124,25	123,55	123,67	123,44	123,28	123,14
74F-Würfel		113,51	112,90	112,09	111,51	111,35	111,32	111,04	110,79	110,66	110,46

Tabelle 56: Messwerte Wasserabgabe Serie 1; Quelle: Eigene Darstellung

Probennr.	t [min]					
	t [h]	24	48	72	96	1 Wo
71B-Quader		226,16	223,32	217,62		191,38
71B-Würfel		114,53	113,52	112,12		96,99
71F-Quader		222,24	218,13	213,67		188,41
71F-Würfel		113,74	112,55	111,32		95,67
71L-Würfel		115,58	114,43	112,94		97,97
71L-Quader		219,39	215,34	207,56		185,62
71H-Würfel		107,27	105,48	103,65		89,82
71H-Quader		221,22	215,26	209,63		188,52
71D-Würfel		111,08	109,68	108,27		93,66
71D-Quader		222,69	217,43	207,94		189,16
71P-Würfel		107,05	104,88	101,92		90,21
71P-Quader		212,08	204,59	196,32		180,28
16A-Würfel		110,90	108,63	106,58		94,77
16A-Quader		221,25	215,28	205,13		188,92
16K-Würfel		111,69	109,07	104,69		93,13
16K-Quader		225,63	217,46	206,86		193,14
16O-Würfel		108,08	104,88	101,51		90,71
16O-Quader		222,63	214,69	205,84		190,60
11C-Quader		212,15	204,75	193,22		183,44
11C-Würfel		106,88	104,39	100,85		90,55
11J-Würfel		110,21	107,91	104,85		93,43
11J-Quader		206,11	198,40	189,04		176,67
11P-Würfel		107,83	105,24	102,46		92,29
11P-Quader		221,43	213,88	201,90		190,08
75A-Quader		256,27	248,96	239,36		217,49
75C-Würfel		151,23	148,65	145,61		127,25
75C-Quader		269,02	260,72	251,61		228,72
75F-Würfel		145,39	142,86	138,74		122,26
75G-Quader		277,53	270,79	262,47		234,38
75G-Würfel		152,63	150,95	149,45		127,27
74B-Würfel		114,68	113,32	111,97		97,00
74B-Quader		216,82	212,31	208,85		182,46
74C-Quader		221,47	217,45	212,87		185,72
74D-Quader		228,43	225,02	221,58		192,68
74D-Würfel		122,43	121,37	120,02		102,88
74F-Würfel		109,47	108,19	106,52		92,06

Tabelle 57: Fortsetzung Tabelle 53: Messwerte Wasserabgabe Serie 1;

Quelle: Eigene Darstellung

Probennr.	t [min] t [h]	0	2	5	10	15	30	60	120 (2h)	180 (3h)	360 (6h)
72C-Quader		244,67	240,87	239,65	239,66	239,13	237,77	237,09	236,61	236,11	235,44
72C-Würfel		120,43	120,97	120,76	120,48	119,21	118,73	118,44	118,32	118,13	117,99
72G-Würfel		128,36	127,43	126,68	126,93	126,02	125,63	125,52	125,47	125,30	125,23
72G-Quader		244,79	242,01	239,45	238,44	237,42	237,53	236,24	235,79	235,36	234,69
72O-Würfel		123,85	123,97	123,30	122,40	122,07	121,79	121,40	121,33	121,28	121,12
72O-Quader		242,68	239,83	238,64	237,89	237,66	236,93	236,56	236,00	235,55	234,46
71B-Würfel		117,96	117,55	116,85	116,48	116,06	115,87	115,46	115,39	115,32	115,14
71B-Quader		236,07	232,34	231,36	231,47	231,03	230,51	229,81	229,06	228,37	227,26
71H-Würfel		111,52	110,31	109,82	109,53	109,40	109,56	109,50	109,05	109,43	109,28
71H-Quader		234,11	229,55	229,35	228,17	227,61	227,56	227,04	226,36	225,68	224,36
71P-Würfel		112,05	110,66	109,94	110,01	109,47	109,47	109,22	109,08	108,95	108,66
71P-Quader		223,74	220,65	219,98	219,53	219,09	218,48	218,05	217,46	216,91	215,36
16C-Würfel		125,75	124,74	124,07	123,52	123,10	122,74	122,36	122,11	122,00	121,73
16C-Quader		244,41	241,97	241,48	240,88	240,51	239,96	239,48	238,66	237,49	235,99
16K-Würfel		116,10	115,51	114,81	114,44	114,05	113,96	113,73	113,43	113,10	112,65
16K-Quader		237,55	235,33	234,51	233,80	233,34	232,92	232,33	231,55	230,59	228,67
16M-Würfel		127,98	127,40	127,05	126,79	126,50	126,30	126,20	125,78	125,49	125,04
16M-Quader		232,83	229,94	228,76	227,85	227,72	227,15	226,47	225,41	224,47	222,95
11B-Würfel		112,34	111,43	110,95	110,52	110,34	109,80	109,63	109,37	109,20	108,80
11B-Quader		219,79	215,77	214,64	213,98	213,55	212,83	212,13	211,15	210,52	208,65
11G-Quader		221,75	218,32	217,50	216,78	216,32	215,66	215,16	214,08	213,42	211,54
11G-Würfel		111,13	110,61	109,90	109,67	109,21	109,02	108,81	108,54	108,34	107,89
11O-Würfel		107,25	106,57	105,88	105,40	105,22	104,90	104,73	104,51	104,42	104,12
11O-Quader		219,83	217,20	216,54	215,86	215,52	215,09	214,38	213,64	213,11	211,55
75A-Würfel		136,98	136,24	135,38	134,89	134,84	134,48	134,36	134,12	133,79	133,17
75A-Quader		267,93	264,83	264,01	263,36	262,96	262,53	261,82	261,02	260,48	258,57
75C-Würfel		156,49	155,31	154,74	154,70	154,69	154,47	154,10	153,96	153,62	153,31
75C-Quader		282,21	278,67	277,90	277,36	276,87	276,49	276,20	275,45	275,00	273,50
75F-Würfel		150,50	149,20	149,05	148,83	149,31	148,30	148,20	148,11	147,89	147,49
75F-Quader		299,35	294,22	293,42	292,94	292,70	292,33	292,06	291,21	290,77	288,95
74B-Würfel		118,03	117,77	117,10	116,79	116,55	116,59	116,40	116,16	116,01	115,80
74B-Quader		227,12	223,62	222,42	221,81	221,15	221,08	220,45	219,94	219,47	218,72
74D-Würfel		126,36	125,12	124,35	124,02	123,70	123,62	123,34	123,25	123,25	122,98
74D-Quader		241,16	235,03	233,86	233,00	232,56	231,98	231,44	231,12	230,65	229,81
74F-Würfel		113,39	112,12	111,45	111,55	110,87	110,60	110,45	110,49	110,41	110,23
74F-Quader		238,45	233,67	232,74	231,99	231,53	230,92	230,40	230,25	229,60	228,90

Tabelle 58: Messwerte Wasserabgabe Serie 2; Quelle: Eigene Darstellung

Probennr.						
	t [min] t [h]	24	48	72	96	1 Wo
72C-Quader		227,76	216,10	211,34	202,98	193,62
72C-Würfel		115,80	112,75	110,96	106,99	95,51
72G-Würfel		123,99	122,20	120,64	117,00	101,96
72G-Quader		232,13	228,30	223,67	213,65	193,69
72O-Würfel		120,04	118,32	116,43	113,94	98,21
72O-Quader		224,21	209,73	202,44	197,05	192,12
71B-Würfel		113,95	112,03	109,93	103,79	95,42
71B-Quader		223,74	218,42	210,35	199,80	188,85
71H-Würfel		108,41	107,13	105,62	103,37	89,10
71H-Quader		213,97	199,10	193,45	190,97	186,99
71P-Würfel		106,64	102,91	99,18	94,25	89,52
71P-Quader		208,59	198,57	188,43	183,15	179,23
16C-Würfel		120,78	119,16	116,50	112,86	101,07
16C-Quader		225,84	211,49	205,56	203,10	199,71
16K-Würfel		109,39	103,71	97,73	94,34	92,49
16K-Quader		220,29	208,54	197,95	194,83	192,15
16M-Würfel		123,11	119,97	114,72	109,45	104,03
16M-Quader		217,22	207,77	195,96	191,40	186,18
11B-Würfel		106,00	101,47	97,52	94,37	91,79
11B-Quader		199,61	187,52	180,38	178,56	176,69
11G-Quader		204,01	193,94	183,91	180,98	179,14
11G-Würfel		106,33	104,17	101,20	96,12	90,55
11O-Würfel		102,65	100,63	98,19	94,95	87,19
11O-Quader		202,99	191,42	181,71	179,01	176,41
75A-Würfel		130,39	127,06	121,66	112,95	109,47
75A-Quader		253,92	247,18	236,59	222,89	216,22
75C-Würfel		152,01	150,21	147,88	142,04	126,13
75C-Quader		264,15	251,20	236,89	231,60	227,36
75F-Würfel		145,40	142,92	137,05	127,90	121,14
75F-Quader		285,34	280,00	268,70	249,90	240,50
74B-Würfel		114,84	113,46	111,79	106,74	95,91
74B-Quader		212,54	203,50	193,81	186,18	181,25
74D-Würfel		121,53	119,60	116,83	110,52	101,22
74D-Quader		227,15	223,38	215,90	198,87	190,74
74F-Würfel		109,42	108,02	106,55	100,28	90,81
74F-Quader		226,86	223,44	218,88	203,80	189,20

Tabelle 59: Fortsetzung Tabelle 55: Messwerte Wasserabgabe Serie 2;
Quelle: Eigene Darstellung

	t [d]											1	2	3	7
	Vt [h]	0,00	0,18	0,29	0,41	0,50	0,71	1,00	1,41	1,73	2,45	4,90	6,93	8,49	12,96
	t [h]	0,00	0,03	0,083	0,167	0,25	0,50	1,00	2,00	3,00	6,00	24	48	72	168
	t [min]	0	2	5	10	15	30	60	120	180	360	1440	2880	4320	10080
	t _{so} [sec]	0	120	300	600	900	1800	3600	7200	10800	21600	86400	172800	259200	604800
Probennr.	m _{dry,s}														
71B-Quader	190,38	26	23	22	22	22	21	21	20	20	20	19	17	14	0,5
71B-Würfel	96,23	24	23	22	21	21	21	21	21	20	20	19	18	17	0,8
71F-Quader	187,90	25	23	22	22	22	21	21	21	20	20	18	16	14	0,3
71F-Würfel	94,49	26	24	23	22	22	22	22	22	22	21	20	19	18	1,2
71L-Würfel	96,32	25	24	23	23	22	22	21	21	21	21	20	19	17	1,7
71L-Quader	185,57	27	23	22	21	21	21	21	20	20	20	18	16	12	0,0
71H-Würfel	89,79	23	23	22	22	22	22	21	21	21	21	19	17	15	0,0
71H-Quader	189,98	23	21	21	20	20	20	20	19	19	18	16	13	10	0,0
71D-Würfel	92,94	24	24	23	22	22	22	21	21	21	21	20	18	16	0,8
71D-Quader	189,34	24	22	22	21	21	21	21	20	20	20	18	15	10	0,0
71P-Würfel	90,31	23	23	22	22	21	21	21	21	21	20	19	16	13	0,0
71P-Quader	180,94	25	22	22	22	21	21	21	21	20	20	17	13	9	0,0
16A-Würfel	94,44	21	22	21	16	21	21	20	20	20	19	17	15	13	0,3
16A-Quader	189,28	22	22	21	20	21	21	20	20	20	19	17	14	8	0,0
16K-Würfel	93,55	24	24	23	21	23	22	22	22	22	21	19	17	12	0,0
16K-Quader	193,88	23	22	21	18	21	21	20	20	20	19	16	12	7	0,0
16O-Würfel	91,30	24	23	23	20	22	22	22	21	21	21	18	15	11	0,0
16O-Quader	191,25	23	22	22	21	21	21	21	20	20	19	16	12	8	0,0
11C-Quader	184,34	21	20	20	20	19	19	19	18	18	18	15	11	5	0,0
11C-Würfel	90,94	22	22	21	21	21	21	20	20	20	19	18	15	11	0,0
11J-Würfel	93,62	22	21	21	20	20	20	20	20	20	19	18	15	12	0,0
11J-Quader	177,61	23	22	21	21	20	20	20	20	19	19	16	12	6	0,0
11P-Würfel	92,44	21	21	20	20	19	19	19	19	19	18	17	14	11	0,0
11P-Quader	190,90	23	21	21	20	20	20	20	19	19	18	16	12	6	0,0
75A-Quader	217,89	24	22	8	21	21	21	21	20	20	20	18	14	10	0,0
75C-Würfel	126,65	23	23	22	22	22	22	22	21	21	21	19	17	15	0,5
75C-Quader	228,96	27	22	22	21	21	21	21	21	20	8	17	14	10	0,0
75F-Würfel	121,79	23	23	22	22	22	22	22	21	21	21	19	17	14	0,4
75G-Quader	234,42	25	22	22	21	21	21	21	21	21	20	18	16	12	0,0
75G-Würfel	125,99	24	24	23	23	23	23	23	22	22	22	21	20	19	1,0
74B-Würfel	96,54	23	22	22	21	21	21	21	20	21	20	19	17	16	0,5
74B-Quader	182,55	25	23	22	22	22	21	21	21	21	20	19	16	14	0,0
74C-Quader	185,71	26	23	22	22	22	22	21	21	21	20	19	17	15	0,0
74D-Quader	192,10	25	23	22	22	21	21	21	20	20	20	19	17	15	0,3
74D-Würfel	101,74	23	24	22	22	22	21	22	21	21	21	20	19	18	1,1
74F-Würfel	91,35	24	24	23	22	22	22	22	21	21	21	20	18	17	0,8
Mittelwert P1 Quader		24,26	22,06	20,79	21,02	21,00	20,78	20,52	20,17	19,95	18,75	17,43	14,32	10,24	0,06
Mittelwert P1 Würfel		23,30	22,91	22,11	21,23	21,54	21,32	21,17	20,88	20,76	20,41	19,05	17,08	14,67	0,51

Tabelle 60: Prozentualer Wassergehalt der Probekörper der Serie 1 während der Wasserabgabe;

Quelle: Eigene Darstellung

Probennr.	t [d]											1	2	3	4	7
	vt [h]	0,00	0,18	0,29	0,41	0,50	0,71	1,00	1,41	1,73	2,45	4,90	6,93	8,49	9,80	12,96
	t [h]	0,00	0,03	0,083	0,167	0,25	0,50	1,00	2,00	3,00	6,00	24	48	72	96	168
	t [min]	0	2	5	10	15	30	60	120	180	360	1440	2880	4320	5760	10080
	t _{so} [sec]	0	120	300	600	900	1800	3600	7200	10800	21600	86400	172800	259200	345600	604800
m _{dry,s}																
72C-Quader	194,45	26	24	23	23	23	22	22	22	21	21	17	11	9	4	0,0
72C-Würfel	95,90	26	26	26	26	24	24	24	23	23	23	21	18	16	12	0,0
72G-Würfel	102,22	26	25	24	24	23	23	23	23	23	23	21	20	18	14	0,0
72G-Quader	194,12	26	25	23	23	22	22	22	21	21	21	20	18	15	10	0,0
72O-Würfel	98,76	25	26	25	24	24	23	23	23	23	23	22	20	18	15	0,0
72O-Quader	193,36	26	24	23	23	23	23	22	22	22	21	16	8	5	2	0,0
71B-Würfel	95,30	24	23	23	22	22	22	21	21	21	21	20	18	15	9	0,1
71B-Quader	188,57	25	23	23	23	23	22	22	21	21	21	19	16	12	6	0,1
71H-Würfel	88,88	25	24	24	23	23	23	23	23	23	23	22	21	19	16	0,2
71H-Quader	186,78	25	23	23	22	22	22	22	21	21	20	15	7	4	2	0,1
71P-Würfel	89,42	25	24	23	23	22	22	22	22	22	22	19	15	11	5	0,1
71P-Quader	179,10	25	23	23	23	22	22	22	21	21	20	16	11	5	2	0,1
16C-Würfel	101,50	24	23	22	22	21	21	21	20	20	20	19	17	15	11	0,0
16C-Quader	200,42	22	21	20	20	20	20	19	19	18	18	13	6	3	1	0,0
16K-Würfel	92,72	25	25	24	23	23	23	23	22	22	21	18	12	5	2	0,0
16K-Quader	192,22	24	22	22	22	21	21	21	20	20	19	15	8	3	1	0,0
16M-Würfel	104,19	23	22	22	22	21	21	21	21	20	20	18	15	10	5	0,0
16M-Quader	187,26	24	23	22	22	22	21	21	20	20	19	16	11	5	2	0,0
11B-Würfel	92,13	22	21	20	20	20	19	19	19	19	18	15	10	6	2	0,0
11B-Quader	177,52	24	22	21	21	20	20	19	19	19	18	12	6	2	1	0,0
11G-Quader	179,82	23	21	21	21	20	20	20	19	19	18	13	8	2	1	0,0
11G-Würfel	90,91	22	22	21	21	20	20	20	19	19	19	17	15	11	6	0,0
11O-Würfel	87,77	22	21	21	20	20	20	19	19	19	19	17	15	12	8	0,0
11O-Quader	177,47	24	22	22	22	21	21	21	20	20	19	14	8	2	1	0,0
75A-Würfel	110,03	24	24	23	23	23	22	22	22	22	21	19	15	11	3	0,0
75A-Quader	215,99	24	23	22	22	22	22	21	21	21	20	18	14	10	3	0,1
75C-Würfel	125,74	24	24	23	23	23	23	23	22	22	22	21	19	18	13	0,3
75C-Quader	227,36	24	23	22	22	22	22	21	21	21	20	16	10	4	2	0,0
75F-Würfel	120,97	24	23	23	23	23	23	23	22	22	22	20	18	13	6	0,1
75F-Quader	240,83	24	22	22	22	22	21	21	21	21	20	18	16	12	4	0,0
74B-Würfel	95,93	23	23	22	22	21	22	21	21	21	21	20	18	17	11	0,0
74B-Quader	181,38	25	23	23	22	22	22	22	21	21	21	17	12	7	3	0,0
74D-Würfel	101,24	25	24	23	23	22	22	22	22	22	21	20	18	15	9	0,0
74D-Quader	190,81	26	23	23	22	22	22	21	21	21	20	19	17	13	4	0,0
74F-Würfel	90,83	25	23	23	23	22	22	22	22	22	21	20	19	17	10	0,0
74F-Quader	189,64	26	23	23	22	22	22	21	21	21	21	20	18	15	7	0,0
Mittelwert P2 Quader	24,64	22,79	22,28	21,95	21,72	21,46	21,15	20,79	20,47	19,78	16,33	11,39	7,01	3,17	0,02	
Mittelwert P2 Würfel	24,19	23,43	22,82	22,52	22,15	21,89	21,67	21,47	21,34	21,04	19,35	16,79	13,71	8,81	0,05	

Tabelle 61: Prozentualer Wassergehalt der Probekörper der Serie 2 während der Wasserabgabe;

Quelle: Eigene Darstellung

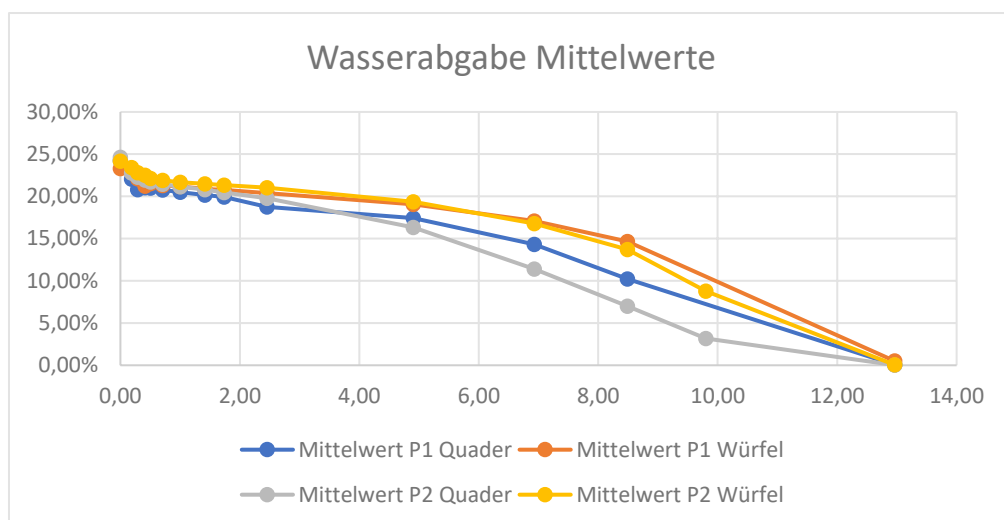


Abbildung 63: Verlauf der Mittelwerte der Wasserabgabe Serie 1 und 2; Quelle: Eigene Darstellung

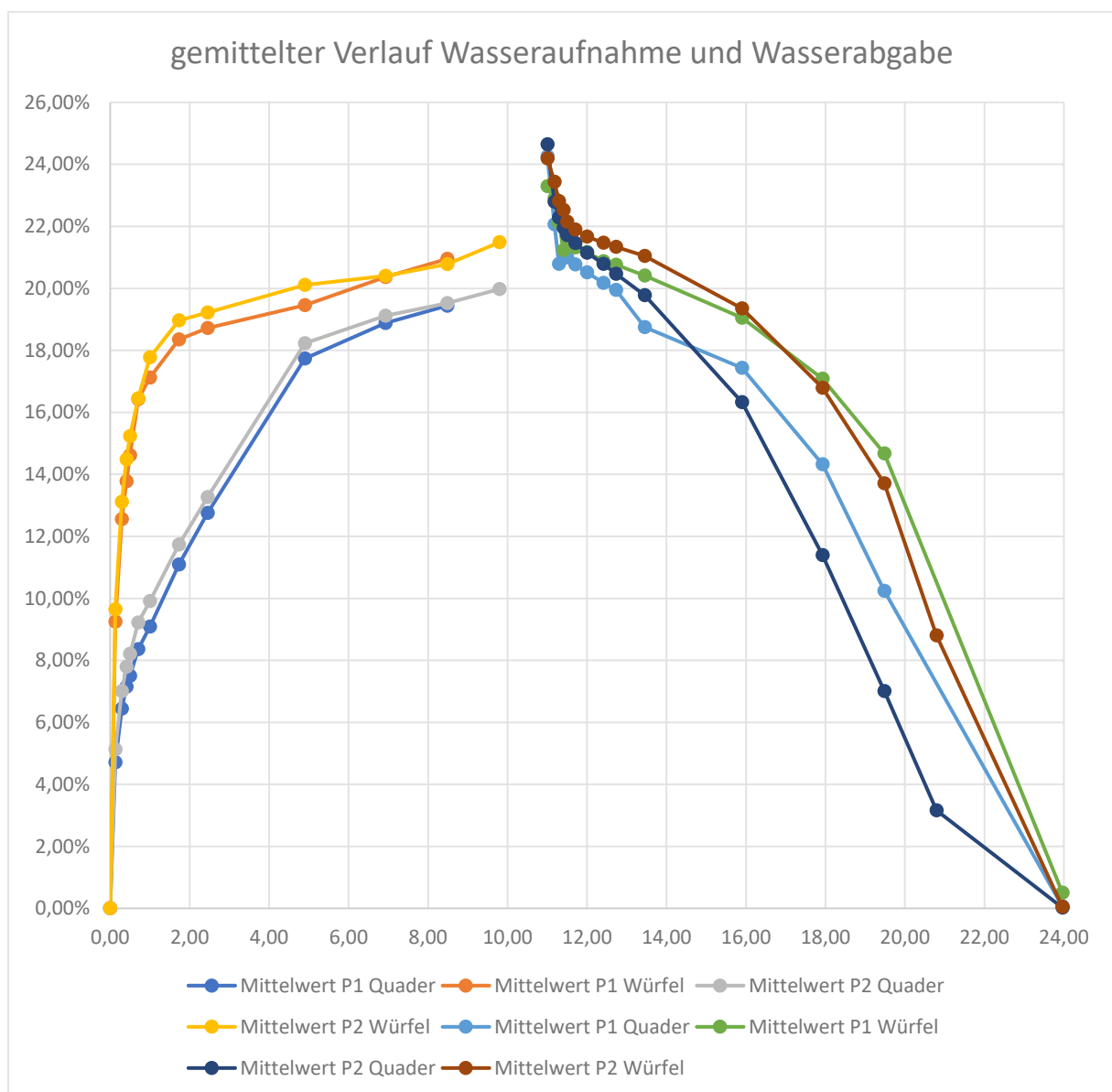


Abbildung 64: gemittelter Verlauf der Wasseraufnahme und Wasserabgabe der Serie 1 und 2; Quelle: Eigene Darstellung

D. Probekörperdaten Vibrosteine Gesamtübersicht

D.1. Stein Nr. 11

Proben-nummer	Lage/Art	Größe	Breite b [mm]	Länge a [mm]	Höhe h [mm]	Gewicht m _{dry,s} [g]	Grundfläche [mm ²]	Volumen cm ³
11A	BZ	3x3x12	30,31	30,95	120,51	149,20	938,09	113,0498
11B	O	4x4x4	39,60	40,91	41,31	92,13	1.620,04	66,9237
11B	U	4x4x8	40,62	40,91	81,71	177,52	1.661,76	135,7828
11C	U	4x4x4	40,48	40,96	41,01	90,94	1.658,06	67,9971
11C	O	4x4x8	41,01	41,02	81,57	184,34	1.682,23	137,2195
11D		FEHLT	-	-	-	-		
11E	BZ	3x3x12	30,42	30,45	121,02	154,35	926,29	112,0995
11F	O	4x4x4	40,37	39,78	40,21	86,06	1.605,92	64,5740
11F	U	4x4x8	40,27	39,85	81,64	179,93	1.604,76	131,0126
11G	U	4x4x4	40,00	40,61	40,11	90,91	1.624,40	65,1547
11G	O	4x4x8	40,25	40,21	81,46	179,82	1.618,45	131,8391
11H	O	4x4x4	40,95	40,85	41,62	95,77	1.672,81	69,6222
11H	U	4x4x8	41,43	41,34	81,22	189,06	1.712,72	139,1068
11I	BZ	3x3x12	30,75	30,39	120,94	148,46	934,49	113,0175
11J	O	4x4x4	40,47	41,75	40,39	93,62	1.689,62	68,2439
11J	U	4x4x8	41,93	40,34	81,73	177,61	1.691,46	138,2427
11K	O	4x4x4	40,33	40,89	41,07	92,62	1.649,09	67,7283
11K	U	4x4x8	40,91	41,28	81,41	183,15	1.688,76	137,4823
11L	O	4x4x4	40,48	40,85	40,07	91,78	1.653,61	66,2601
11L	U	4x4x8	40,66	40,84	81,92	182,47	1.660,55	136,0326
11M		FEHLT	-	-	-	-		
11N	O	4x4x4	41,21	40,17	41,02	90,71	1.655,41	67,9047
11N	U	4x4x4	40,47	39,72	40,95	92,48	1.607,47	65,8258
11O	O	4x4x4	40,44	39,89	40,29	87,77	1.613,15	64,9939
11O	U	4x4x8	40,71	40,15	82,66	177,47	1.634,51	135,1083
11P	O	4x4x4	40,81	41,02	41,11	92,44	1.674,03	68,8192
11P	U	4x4x8	41,13	40,75	82,18	190,90	1.676,05	137,7376
11Q	BZ	3x3x12	30,90	30,82	121,03	152,07	952,34	115,2615
							1.663,13	

Zusammenfassung Stein 11

Anzahl	Dimension	Breite b [mm]	Länge a [mm]	Höhe h [mm]	Gewicht m _{dry,s} [g]
12	4x4x4	40,47	40,62	40,76	91,44
10	4x4x8	40,89	40,67	81,75	182,23
4	3x3x12	30,60	30,65	120,88	151,02

Tabelle 62: Probekörperdaten Stein Nr. 11; Quelle: Eigene Darstellung

Probennummer	Rohdichte kg/m ³	Max Last [N]	Druckfestigkeit N/mm ²	E-Modul			Querdehnzahl			E-Modul korrekt	Querkraft korrekt
				1/3 Last	2/3 Last	Max Last	1/3 Last	2/3 Last	Max Last		
11A	1319,77										
11B	1376,64										
11B	1307,38	7022,55	4,23	3077,63	2896,46	2788,15	-0,25	0,24	1,18	j	j
11C	1337,41										
11C	1343,39	10601,70	6,30	14254,08	7402,46	3729,85	-0,37	0,39	0,06	x	j
11D											
11E	1376,90										
11F	1332,73										
11F	1373,38	8852,25	5,52	2581,79	2943,19	2862,87	0,00	0,11	0,38	j	j
11G	1395,29										
11G	1363,93	12210,30	7,54	6891,59	9262,84	8911,45	-0,57	-0,58	0,22	j	x
11H	1375,57										
11H	1359,10	11940,00	6,97	1928,88	2026,97	1264,77	0,31	0,37	0,31	j	j
11I	1313,60										
11J	1371,85										
11J	1284,77	5896,80	3,49	1465,51	1547,31	1704,09	0,56	0,69	1,53	j	x
11K	1367,52										
11K	1332,17	8062,80	4,77	2116,22	1946,34	1608,30	0,26	0,39	0,85	j	j
11L	1385,15										
11L	1341,37	5733,30	3,45	1712,70	1809,66	800,40	0,90	1,59	2,33	j	x
11M											
11N	1335,84										
11N	1404,92										
11O	1350,43										
11O	1313,54	10576,05	6,47	-14641,27	25992,15	4749,58	0,20	-0,54	1,60	x	X
11P	1343,23										
11P	1385,97	4937,55	2,95	1405,22	1346,46	1219,24	0,81	0,78	1,09	j	x
11Q	1319,35										
Mittelwert	1350,43	8583,33	5,17	2647,44				0,30			
VK	0,02	0,29	0,30	0,64				0,37			
5%-Quantil			3,17								

Tabelle 63: Einzelergebnisse Druckfestigkeit Stein Nr.11; Quelle: Eigene Darstellung

D.2. Stein Nr. 16

Proben- nummer	Lage/ Art	Größe	Breite b [mm]	Länge a [mm]	Höhe h [mm]	Gewicht m _{dry,s} [g]	Grundfläche [mm ²]	Volumen cm ³
16A	U	4x4x4	40,15	39,87	42,01	94,44	1.600,78	67,2488
16A	O	4x4x8	40,92	41,23	81,61	189,28	1.687,13	137,6868
16B	BZ	3x3x12	32,12	31,81	120,10	164,20	1.021,74	122,7106
16C	O	4x4x4	41,30	41,90	43,15	101,50	1.730,47	74,6698
16C	U	4x4x8	41,31	43,03	80,72	200,42	1.777,57	143,4854
16D	M	4x4x8	41,25	41,72	80,82	187,91	1.720,95	139,0872
16E	BZ	3x3x12	32,38	31,99	120,07	168,16	1.035,84	124,3729
16F	M	4x4x8	42,44	41,91	81,42	204,60	1.778,66	144,8185
16G	M	4x4x8	42,44	42,19	80,98	201,02	1.790,54	144,9982
16H	M	4x4x8	41,48	41,72	81,28	182,81	1.730,55	140,6587
16I	BZ	3x3x12	31,83	31,86	119,91	161,81	1.014,10	121,6012
16J	BZ	3x3x12	32,72	32,39	120,09	160,56	1.059,80	127,2715
16K	O	4x4x4	42,01	41,66	41,70	93,55	1.750,14	72,9807
16K	U	4x4x8	42,34	41,89	80,92	193,88	1.773,62	143,5215
16L	BZ	3x3x12	31,96	32,15	120,27	165,35	1.027,51	123,5791
16M	O	4x4x4	42,00	41,78	42,08	104,19	1.754,76	73,8403
16M	U	4x4x8	41,47	42,11	81,10	187,26	1.746,30	141,6251
16N	M	4x4x8	42,95	41,88	81,20	190,63	1.798,75	146,0582
16O	O	4x4x4	41,89	40,93	41,59	91,30	1.714,56	71,3085
16O	U	4x4x8	41,19	41,67	81,95	191,25	1.716,39	140,6579
16P	BZ	3x3x12	32,05	32,29	119,55	165,39	1.034,89	123,7216
16Q	M	4x4x8	41,77	42,44	81,52	193,00	1.772,72	144,5120
							1.753,93	

Zusammenfassung Stein 16

Anzahl	Dimension	Breite b [mm]	Länge a [mm]	Höhe h [mm]	Gewicht m _{dry,s} [g]
5	4x4x4	41,47	41,23	42,11	97,00
11	4x4x8	41,78	41,98	81,23	192,91
6	3x3x12	32,18	32,08	120,00	164,25

Tabelle 64: Probekörperdaten Stein Nr. 16; Quelle: Eigene Darstellung

Probennummer	Rohdichte kg/m ³	Max Last [N]	Druckfestigkeit N/mm ²	E-Modul			Querdehnzahl			E-Modul korrekt	Querkraft korrekt
				1/3 Last	2/3 Last	Max Last	1/3 Last	2/3 Last	Max Last		
16A	1404,34										
16A	1374,71	8356,80	4,95	9477,91	13727,37	19301,89	-2,48	-1,90	-0,53	x	x
16B	1338,11										
16C	1359,32										
16C	1396,80	9375,90	5,27	4389,19	4435,87	5931,08	-2,48	0,26	3,49	j	j
16D	1351,02	7660,35	4,45	-44419,10	15815,16	70738,58	-9,62	0,98	10,21	x	x
16E	1352,06										
16F	1412,80	10087,20	5,67	43961,82	12388,22	2739,28	-2,72	0,22	1,82	x	j
16G	1386,36	17740,35	9,91	23382,50	11687,50	7389,07	2,94	0,98	1,82	x	x
16H	1299,67	8426,25	4,87	9719,40	4511,62	2842,63	0,97	0,54	0,51	x	j
16I	1330,66										
16J	1261,56										
16K	1281,85										
16K	1350,88	10595,70	5,97	4718,10	6280,89	2661,27	-0,93	-0,57	0,22	j	x
16L	1338,01										
16M	1411,02										
16M	1322,22	8587,50	4,92	-10719,54	13727,37	7953,52	1,20	-0,64	3,91	x	x
16N	1305,16	7452,30	4,14	3878,35	2692,87	2833,46	6,80	6,11	12,54	j	x
16O	1280,35										
16O	1359,68	12393,30	7,22	2277,13	3023,96	2584,72	0,40	0,21	0,52	j	j
16P	1336,79										
16Q	1335,53	16275,90	9,18	14520,16	6876,39	4075,20	0,67	0,78	2,18	x	x
Mittelwert	1344,95	10631,96	6,05	3815,69				0,31			
VK	0,03	0,31	0,30	0,25				0,45			
5%-Quantil			4,30								

Tabelle 65: Einzelergebnisse Druckfestigkeit Stein Nr.16; Quelle: Eigene Darstellung

D.3. Stein Nr. 71

Proben- nummer	Lage/ Art	Größe	Breite b [mm]	Länge a [mm]	Höhe h [mm]	Gewicht m _{dry,s} [g]	Grundfläche [mm ²]	Volumen cm ³
71A	BZ	3x3x12	32,42	32,74	121,54	174,02	1.061,43	129,0063
71B	U	4x4x4	41,07	40,98	41,35	95,30	1.683,05	69,5941
71B	O	4x4x8	41,31	41,43	80,98	188,57	1.711,47	138,5951
71C	O	4x4x4	41,49	41,32	41,04	92,48	1.714,37	70,3576
71C	U	4x4x8	41,44	41,51	79,82	185,17	1.720,17	137,3043
71D	O	4x4x4	40,88	40,51	41,62	92,94	1.656,05	68,9248
71D	U	4x4x8	40,97	40,80	81,55	189,34	1.671,58	136,3170
71E	BZ	3x3x12	32,52	32,38	121,26	172,49	1.053,00	127,6865
71F	U	4x4x8	41,61	41,52	81,50	187,90	1.727,65	140,8032
71F	O	4x4x4	41,10	41,18	40,85	94,49	1.692,50	69,1385
71G	O	4x4x4	41,23	41,46	40,40	79,95	1.709,40	69,0596
71G	U	4x4x4	41,60	40,79	41,33	87,54	1.696,86	70,1314
71H	O	4x4x4	41,28	41,23	39,44	88,88	1.701,97	67,1259
71H	U	4x4x8	41,40	41,07	81,28	186,78	1.700,30	138,2002
71I	U	4x4x8	40,48	40,96	81,27	189,30	1.658,06	134,7506
71J	BZ	3x3x12	32,40	32,39	121,48	170,72	1.049,44	127,4855
71K	BZ	3x3x12	31,88	32,21	121,23	167,70	1.026,85	124,4856
71L	O	4x4x4	41,44	41,16	41,43	96,32	1.705,67	70,6659
71L	U	4x4x8	41,43	41,80	81,34	185,57	1.731,77	140,8625
71M	BZ	3x3x12	32,43	32,69	121,63	173,38	1.060,14	128,9444
71N	O	4x4x4	41,11	40,97	40,87	90,47	1.684,28	68,8364
71N	U	4x4x8	40,95	40,86	80,92	179,43	1.673,22	135,3967
71O	O	4x4x4	40,40	40,79	40,52	90,74	1.647,92	66,7736
71O	U	4x4x8	40,59	40,78	81,15	180,52	1.655,26	134,3244
71P	O	4x4x4	40,11	39,93	40,53	89,42	1.601,59	64,9125
71P	U	4x4x8	40,58	40,05	81,36	179,10	1.625,23	132,2286
71Q	BZ	3x3x12	32,35	32,15	121,23	171,58	1.040,05	126,0856
							1.687,47	

Zusammenfassung Stein 71

Anzahl	Dimension	Breite b [mm]	Länge a [mm]	Höhe h [mm]	Gewicht m _{dry,s} [g]
11	4x4x4	41,06	40,94	40,85	90,78
10	4x4x8	41,08	41,08	81,12	185,17
6	3x3x12	32,33	32,43	121,40	171,65

Tabelle 66: Probekörperdaten Stein Nr. 71; Quelle: Eigene Darstellung

Probennummer	Rohdichte kg/m ³	Max Last [N]	Druckfestigkeit N/mm ²	E-Modul			Querdehnzahl			E-Modul korrekt	Querkraft korrekt
				1/3 Last	2/3 Last	Max Last	1/3 Last	2/3 Last	Max Last		
71A	1348,93										
71B	1369,37										
71B	1360,58	10888,50	6,36	6524,75	4111,75	5348,12	0,79	0,38	13,20	j	j
71C	1314,43										
71C	1348,61	7459,65	4,34	4257,11	3888,30	9772,27	1,11	0,32	12,41	j	j
71D	1348,43										
71D	1388,97	10430,25	6,24	-441,56	-320,84	-317,40	-	-	-	x	x
71E	1350,89										
71F	1334,49	13316,40	7,87	-10142,04	19586,02	8661,40	-0,86	-1,06	0,34	x	x
71F	1366,68										
71G	1157,70										
71G	1248,23										
71H	1324,08										
71H	1351,52	10227,30	6,02	3285,16	9368,63	3180,93	-0,34	-0,96	1,30	j	x
71I	1404,82	10604,25	6,40	150829,15	21660,87	33552,33	0,05	1,00	21,95	x	x
71J	1339,13										
71K	1347,14										
71L	1363,03										
71L	1317,38	10879,95	6,28	5444,72	4014,42	4777,95	0,26	0,37	1,64	j	j
71M	1344,61										
71N	1314,28										
71N	1325,22	9321,15	5,57	6395,86	7417,17	4890,33	-0,98	-0,77	-0,25	j	x
71O	1358,92										
71O	1343,91	9446,40	5,71	2492,70	3324,94	2305,35	-0,29	-0,25	0,09	j	x
71P	1377,55										
71P	1354,47	11799,60	7,26	1665,88	2034,05	1541,06	-0,14	0,50	1,26	j	j
71Q	1360,82										
Mittelwert	1339,41	10437,35	6,20	4295,17				0,39			
VK	0,03	0,14	0,15	0,41				0,16			
5%-Quantil			4,89								

Tabelle 67: Einzelergebnisse Druckfestigkeit Stein Nr.71; Quelle: Eigene Darstellung

D.4. Stein Nr. 72

Proben- nummer	Lage/ Art	Größe	Breite b [mm]	Länge a [mm]	Höhe h [mm]	Gewicht m _{dry,s} [g]	Grundfläche [mm ²]	Volumen cm ³
72A	BZ	3x3x12	31,83	31,63	121,00	166,18	1.006,78	121,8207
72B	O	4x4x4	41,77	41,80	41,66	98,94	1.745,99	72,7378
72B	U	4x4x8	41,53	41,78	82,05	189,36	1.735,12	142,3669
72C	U	4x4x4	41,91	41,24	41,82	95,90	1.728,37	72,2804
72C	O	4x4x8	41,62	41,71	81,45	193,37	1.735,97	141,3948
72D	O	4x4x4	41,62	42,03	42,14	94,02	1.749,29	73,7150
72D	U	4x4x8	41,98	42,24	81,74	195,59	1.773,24	144,9442
72E	BZ	3x3x12	31,59	31,77	120,96	164,83	1.003,61	121,3972
72F	U	4x4x4	41,58	41,67	41,03	94,74	1.732,64	71,0902
72F	O	4x4x8	41,43	41,64	81,32	197,85	1.725,15	140,2888
72G	O	4x4x4	42,06	42,33	42,20	102,22	1.780,40	75,1329
72G	U	4x4x8	41,86	41,96	81,67	193,33	1.756,45	143,4489
72H	M	4x4x8	41,53	42,30	81,48	191,14	1.756,72	143,1375
72I	BZ	3x3x12	31,96	32,00	121,23	168,50	1.022,72	123,9843
72J	BZ	3x3x12	32,11	31,66	121,53	167,43	1.016,60	123,5477
72K	O	4x4x4	42,29	42,23	41,63	96,01	1.785,91	74,3473
72K	U	4x4x8	41,59	41,49	81,57	188,64	1.725,57	140,7547
72L	O	4x4x4	42,00	41,70	41,94	95,34	1.751,40	73,4537
72L	U	4x4x8	42,00	41,83	81,50	194,74	1.756,86	143,1841
72M	BZ	3x3x12	31,91	32,00	121,22	167,74	1.021,12	123,7802
72N	O	4x4x4	42,90	42,53	42,11	102,59	1.824,54	76,8313
72N	U	4x4x8	42,64	42,99	81,40	199,88	1.833,09	149,2138
72O	O	4x4x4	41,96	41,67	41,89	98,76	1.748,47	73,2435
72O	U	4x4x8	42,01	41,94	81,95	193,36	1.761,90	144,3877
72P	O	4x4x4	42,42	42,53	41,64	96,44	1.804,12	75,1237
72P	U	4x4x8	41,79	41,86	81,84	195,30	1.749,33	143,1651
72Q	BZ	3x3x12	32,13	31,96	121,70	166,64	1.026,87	124,9707
							1.755,40	

Zusammenfassung Stein 72

Anzahl	Dimension	Breite b [mm]	Länge a [mm]	Höhe h [mm]	Gewicht m _{dry,s} [g]
10	4x4x4	42,05	41,97	41,81	97,50
11	4x4x8	41,82	41,98	81,63	193,87
6	3x3x12	31,92	31,84	121,27	166,89

Tabelle 68: Probekörperdaten Stein Nr. 72; Quelle: Eigene Darstellung

Probennummer	Rohdichte kg/m ³	Max Last [N]	Druckfestigkeit N/mm ²	E-Modul			Querdehnzahl			E-Modul korrekt	Querkraft korrekt
				1/3 Last	2/3 Last	Max Last	1/3 Last	2/3 Last	Max Last		
72A	1364,14										
72B	1360,23										
72B	1330,08	11631,51	6,70	-14205,96	43282,87	6631,87	3,02	-1,22	0,02	x	x
72C	1326,78										
72C	1367,59	8202,36	4,72	25815,69	22798,66	77518,11	4,62	0,21	23,27	x	j
72D	1275,45										
72D	1349,42	12043,05	6,79	9606,68	6748,70	5438,29	-0,14	0,15	0,41	j	x
72E	1357,77										
72F	1332,67										
72F	1410,30	14782,80	8,57	7607,48	7235,06	5715,92	0,91	0,25	0,33	j	j
72G	1360,52										
72G	1347,73	11601,90	6,61	4603,34	5578,39	4068,15	0,19	0,28	1,66	j	j
72H	1335,36	6201,45		3108,09	5922,65	2318,94	0,04	-0,48	2,19	j	x
72I	1359,04										
72J	1355,18										
72K	1291,37										
72K	1340,20	10934,40	6,34	4775,69	3112,81	1851,16	0,79	2,89	5,39	j	x
72L	1297,96										
72L	1360,07	8115,60	4,62	69144,53	6435,12	2649,71	-0,62	-0,41	6,81	x	x
72M	1355,14										
72N	1335,26										
72N	1339,55	17435,25	9,51	6720,34	6154,82	4491,12	-0,26	0,08	0,33	j	x
72O	1348,38										
72O	1339,17	10445,25	5,93	3870,24	4430,15	3254,43	1,09	0,78	1,83	j	x
72P	1283,75										
72P	1364,16	7127,55	4,07	2583,55	2625,91	2938,30	-1,80	-0,92	1,92	j	x
72Q	1333,43										
Mittelwert	1341,51	10774,65	6,39	4487,46				0,25			
VK	0,02	0,30	0,25	0,50				0,12			
5%-Quantil			4,32								

Tabelle 69: Einzelergebnisse Druckfestigkeit Stein Nr.72; Quelle: Eigene Darstellung

D.5. Stein Nr. 74

Proben- nummer	Lage/ Art	Größe	Breite b [mm]	Länge a [mm]	Höhe h [mm]	Gewicht m _{dry,s} [g]	Grundfläche [mm ²]	Volumen cm ³
74A	BZ	3x3x12	31,24	31,30	118,81	160,80	977,81	116,1738
74B	O	4x4x4	41,57	41,30	40,92	95,93	1.716,84	70,2531
74B	U	4x4x8	41,51	41,22	80,16	181,38	1.711,04	137,1571
74C	O	4x4x4	41,04	41,18	41,66	94,71	1.690,03	70,4065
74C	U	4x4x8	41,16	41,55	80,33	185,71	1.710,20	137,3802
74D	U	4x4x4	42,60	42,77	41,33	101,24	1.822,00	75,3033
74D	O	4x4x8	42,89	42,67	80,63	190,81	1.830,12	147,5623
74E	BZ	3x3x12	31,64	31,30	119,98	160,30	990,33	118,8200
74F	O	4x4x4	41,17	41,42	41,48	90,83	1.705,26	70,7342
74F	U	4x4x8	42,09	41,84	81,12	189,64	1.761,05	142,8560
74G	M	4x4x8	41,93	41,86	80,21	190,47	1.755,19	140,7838
							1.753,52	

Zusammenfassung Stein 74

Anzahl	Dimension	Breite b [mm]	Länge a [mm]	Höhe h [mm]	Gewicht m _{dry,s} [g]
4	4x4x4	41,60	41,67	41,35	95,68
5	4x4x8	41,92	41,83	80,49	187,60
2	3x3x12	31,44	31,30	119,40	160,55

Tabelle 70: Probekörperdaten Stein Nr. 74; Quelle: Eigene Darstellung

Probennummer	Rohdichte kg/m ³	Max Last [N]	Druckfestigkeit N/mm ²	E-Modul			Querdehnzahl			E-Modul korrekt	Querkraft korrekt
				1/3 Last	2/3 Last	Max Last	1/3 Last	2/3 Last	Max Last		
74A	1384,13										
74B	1365,49										
74B	1322,42	8098,35	4,73	5230,87	4340,57	3431,17	-0,32	0,07	1,11	j	x
74C	1345,19										
74C	1351,80	8156,10	4,77	2596,71	2835,28	2170,50	-0,29	0,02	2,14	x	x
74D	1344,43										
74D	1293,08	11990,70	6,55	4060,63	4340,57	4053,94	0,47	0,07	1,46	j	x
74E	1349,10										
74F	1284,10										
74F	1327,49	6731,25	(3,82)	-546394,56	18921,52	12118,38	85,20	-2,49	-1,32	x	x
74G	1352,93	8152,95	4,65	2631,05	2374,56	2074,69	0,51	0,24	1,15	j	j
Mittel- wert	1338,20	8625,87	5,17	3974,18	3685,23			0,24			
VK	0,02	0,20	0,17	0,27	0,25			0,00			
5%-Quantil			4,66								

Tabelle 71: Einzelergebnisse Druckfestigkeit Stein Nr.74; Quelle: Eigene Darstellung

D.6. Stein Nr. 75

Proben- nummer	Lage/ Art	Größe	Breite b [mm]	Länge a [mm]	Höhe h [mm]	Gewicht m _{dry,s} [g]	Grundfläche [mm ²]	Volumen cm ³
75A	u	4x4x4	44,29	44,60	43,85	110,03	1.975,33	86,6184
75A	o	4x4x8	43,87	43,66	82,31	217,89	1.915,36	157,6536
75B	bz	3x3x12	31,4	31,45	122,18	171,33	987,53	120,6564
75C	o	4x4x4	44,10	44,24	45,05	126,65	1.950,98	87,8918
75C	u	4x4x8	45,18	44,97	81,92	228,96	2.031,74	166,4405
75E	bz	3x3x12	31,42	31,5	121,85	165,97	989,73	120,5986
75F	o	4x4x4	46,19	43,85	45,32	121,79	2.025,43	91,7926
75F	u	4x4x8	44,66	45,08	82,47	240,83	2.013,27	166,0346
75G	u	4x4x4	45,82	44,06	44,77	125,99	2.018,83	90,3830
75G	o	4x4x8	45,16	45,29	82,81	234,42	2.045,30	169,3710
							2.001,42	

Zusammenfassung Stein 75

Anzahl	Dimension	Breite b [mm]	Länge a [mm]	Höhe h [mm]	Gewicht m _{dry,s} [g]
4	4x4x4	45,10	44,19	44,75	121,12
4	4x4x8	44,72	44,75	82,38	230,53
2	3x3x12	31,41	31,48	122,02	168,65

Tabelle 72: Probekörperdaten Stein Nr. 75; Quelle: Eigene Darstellung

Probennummer	Rohdichte kg/m ³	Max Last [N]	Druckfestigkeit N/mm ²	E-Modul			Querdehnzahl			E-Modul korrekt	Querkraft korrekt
				1/3 Last	2/3 Last	Max Last	1/3 Last	2/3 Last	Max Last		
75A	1270,28										
75A	1382,08	10969,50	5,73	6982,26	8066,12	4401,50	-3,42	-1,59	7,61	j	x
75B	1419,98										
75C	1440,98										
75C	1375,63	9384,30	4,62	2257,98	1917,33	954,59	-0,02	0,09	2,42	x	x
75E	1376,22										
75F	1326,80										
						-					
						173103,1					
75F	1450,48	14740,95	7,32	-22665,12	29382,09	8	-0,70	-1,99	-8,31	x	x
75G	1393,96										
75G	1384,06	6715,20	(3,28)	7016,41	4997,58	8762,84	-0,78	0,65	-0,32	j	x
Mittel- wert	1382,05	10452,49	5,89	6999,34	1382,05						
VK	0,04	0,28	0,25	0,00	0,04						
5%-Quantil			4,73								

Tabelle 73: Einzelergebnisse Druckfestigkeit Stein Nr.75; Quelle: Eigene Darstellung

D.7. Zusammenfassung Ergebnisse Vibrosteine

Stein Nr.	Grundfläche [mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	Max Last [N]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul	Querdehn- zahl
11	1663,1252	1350,43	8583,33	5,17	2647,44	0,30
VK [-]		0,02	0,29	0,30	0,64	0,37
16	1753,9252	1344,95	10631,96	6,05	3815,69	0,31
VK [-]		0,03	0,31	0,30	0,25	0,45
71	1687,4710	1339,41	10437,35	6,20	4295,17	0,39
VK [-]		0,03	0,14	0,15	0,41	0,16
72	1755,3991	1341,51	10774,65	6,39	4487,46	0,25
VK [-]		0,02	0,30	0,25	0,50	0,12
74	1753,5184	1338,20	8625,87	5,17	3974,18	0,24
VK [-]		0,02	0,20	0,17	0,27	0,00
75	2001,4195	1382,05	10452,49	5,89	6999,34	-
VK [-]		0,04	0,28	0,25	0,00	-
Gesamt vorgeschädigt			9607,64	5,61	3231,57	0,30
VK [-]			0,11	0,08	0,18	0,01
5% Quantil				3,45		
Gesamt ungeschädigt			10072,59	5,91	4252,27	0,29
VK [-]			0,08	0,08	0,05	0,25
5% Quantil				4,42		
Gesamt		1349,42				0,30
VK [-]		0,03				0,19

Tabelle 74: Zusammenfassung der Ergebnisse Druckfestigkeitsversuche; Quelle: Eigene Darstellung

E. Biegezug Vibrosteine

E.1. Steine 11 und 16

Probennummer	Max. Biegezug $F_{\max}$ [N]	Verformung d_l bei $F_{\max}$ [mm]	Bruch in	Anmerkung	Querschnittsfläche [mm ²]	Biegezugfestigkeit N/mm ²	Mittelere Biegezugfestigkeit N/mm ²	VK
11A	262,58	0,219	Ziegel & Mörtel	sehr grobe Sieblinie an der Bruchlinie mit sehr großem Porenraum im inneren des Probekörpers. Knirschender Bruch	938,0945	1,36	1,20	
11E	89,625	0,132	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel	sehr früher knirschender und räumlich ausbreitender Bruch	926,29	0,48		0,31
11I	258,14	0,281	Ziegel & Mörtel	große Ausbrüche in der Oberfläche nach dem zuschneiden. Knirschender Bruch außerhalb der Ausbrüche	934,49	1,36		
11Q	171,46	0,232	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel	knirschender früher Bruch	952,338	0,88		
16B	399,54	0,440	Ziegel & Mörtel	früher schräger Bruch mit deutlichem knirschen	1021,74	1,84	1,86	
16E	293,09	0,221	Ziegel & Mörtel	mehrere Bruchlinien Senkrecht und waagrecht, knirschen bei Bruch und langsam	1035,84	1,33		
16I	467,52	0,290	Ziegel & Mörtel	abrupter Bruch mit leichtem knacken	1014,10	2,17		
16J	237,65	0,192	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel	langsamer knirschender Bruch bei ca. 1/3	1059,80	1,04		0,28
16L	461,33	0,229	Ziegel & Mörtel	mehrere leise knirschende Geräusche vor dem Bruch. Bruch erfolgte abrupt mit leichtem knacken	1027,51	2,09		
16P	568,74	0,270	hauptsächlich Ziegel & etwas Mörtel	leises abruptes knacken beim Bruch	1034,89	2,55		

Tabelle 75: Einzelergebnisse der Biegezugfestigkeit der Steine 11 und 16, die rot markierten Einzelwerte sind nicht in den Mittelwert eingeflossen; Quelle: Eigene Darstellung

E.2. Steine 71, 72, 74 und 75

Probenr.	Max. Biegezug $F_{\max}$ [N]	Verformung dl bei $F_{\max}$ [mm]	Bruch in	Anmerkung	Querschnitts- fläche [mm ²]	Biegezug- festigkeit N/mm ²	Mittlere Biegezug- festigkeit N/mm ²	VK
71A	549,38	0,338	Ziegel & Mörtel		1061,43	2,37		
71E	513,94	0,337	Ziegel & Mörtel		1053,00	2,26		
71J	678,58	0,367	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel	Schlagartiger lauter Bruch	1049,44	2,99		
71K	595,97	0,413	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel		1026,85	2,70	2,51	0,10
71M	563,22	0,328	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel		1060,14	2,44		
71Q	515,64	0,312	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel		1040,05	2,31		
72A	521,80	0,345	Mörtel	Vollständiger Bruch in der Mörtelfuge, äußere Vorschädigung sichtbar gewesen mit Ausbruch	1006,78	2,46		
72E	499,86	0,290	Mörtel		1003,61	2,35		
72I	524,97	0,355	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel		1022,72	2,41		0,13
72J	546,71	0,307	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel		1016,60	2,55	2,46	
72M	350,52	0,447	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel	Bruch in Bereich mit groben und vielen Poren, wenig Feinanteil	1021,12	1,61		
72Q	552,58	0,389	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel		1026,87	2,53		
75B	536,72	0,224	Ziegel & Mörtel	Schlagartiger lauter knackender Bruch	987,53	2,59	2,79	0,07
75E	623,07	0,245	Ziegel & Mörtel	Schlagartiger lauter knackender Bruch	989,73	3,00		
74A	525,02	0,214	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel		977,81	2,57		0,04
74E	488,48	0,275	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel		990,33	2,36	2,47	

Tabelle 76: Einzelergebnisse der Biegezugfestigkeit der Steine 11 und 16, die rot markierten Einzelwerte sind nicht in den Mittelwert eingeflossen; Quelle: Eigene Darstellung

F. Probekörperdaten reproduzierter Ziegelsplittbeton Gesamtübersicht

F.1. Schüttgewichte Korngrößen

Glas =	200 ml	0,2 dm ³		300 ml	0,3 dm ³	
	0-1 mm	0-1 mm	0-1 mm	0-1 mm	0-1 mm	0-1 mm
Gewicht gesamt [g]	338,56	322,33	315,16	454,81	436,05	411,08
Leergewicht Glas [g]	125,69	125,69	125,69	125,69	125,69	125,69
Delta	212,87	196,64	189,47	329,12	310,36	285,39
Rohwichte kg/dm ³	1,0644	0,9832	0,9474	1,0971	1,0345	0,9513
	1-2 mm	1-2 mm	1-2 mm	1-2 mm	1-2 mm	1-2 mm
Gewicht gesamt [g]	274,06	273,49	276,5	346,17	338,42	341,85
Leergewicht Glas [g]	125,69	125,69	125,69	125,69	125,69	125,69
Delta	148,37	147,80	150,81	220,48	212,73	216,16
Rohwichte kg/dm ³	0,74185	0,7390	0,75405	0,7349	0,7091	0,7205
	2-4 mm	2-4 mm	2-4 mm	2-4 mm	2-4 mm	2-4 mm
Gewicht gesamt [g]	278,48	276,57	273,09	343,36	340,53	335,19
Leergewicht Glas [g]	125,69	125,69	125,69	125,69	125,69	125,69
Delta	152,79	150,88	147,40	217,67	214,84	209,50
Rohwichte kg/dm ³	0,7640	0,7544	0,7370	0,7256	0,7161	0,6983
	4-8mm	4-8mm	4-8mm	2-4 mm	2-4 mm	2-4 mm
Gewicht gesamt [g]	270,47	266,1	272,49	334,63	332,65	330,83
Leergewicht Glas [g]	125,69	125,69	125,69	125,69	125,69	125,69
Delta	144,78	140,41	146,80	208,94	206,96	205,14
Rohwichte kg/dm ³	0,7239	0,7021	0,7340	0,6965	0,6899	0,6838
	8-11 mm	8-11 mm	8-11 mm	8-11 mm	8-11 mm	8-11 mm
Gewicht gesamt [g]	269,33	264,71	260,48	342,38	327,16	332,43
Leergewicht Glas [g]	125,69	125,69	125,69	125,69	125,69	125,69
Delta	143,64	139,02	134,79	216,69	201,47	206,74
Rohwichte kg/dm ³	0,7182	0,6951	0,6740	0,7223	0,6716	0,6891
	11-16 mm	11-16 mm	11-16 mm	11-16 mm	11-16 mm	11-16 mm
Gewicht gesamt [g]	269,25	271,34	263,34	333,56	328,98	325,66
Leergewicht Glas [g]	125,69	125,69	125,69	125,69	125,69	125,69
Delta	143,56	145,65	137,65	207,87	203,29	199,97
Rohwichte kg/dm ³	0,7178	0,7283	0,6883	0,6929	0,6776	0,6666
	>16mm	>16mm	>16mm	>16mm	>16mm	>16mm
Gewicht gesamt [g]	249,15	258,82	251,04	310,86	321,47	319,34
Leergewicht Glas [g]	125,69	125,69	125,69	125,69	125,69	125,69
Delta	123,46	133,13	125,35	185,17	195,78	193,65
Rohwichte kg/dm ³	0,6173	0,6657	0,6268	0,6172	0,6526	0,6455

Tabelle 77: Bestimmung Schüttrohdichte der Ziegelsplitt-Sieblinien; Quelle: Eigene Darstellung

	0-1 mm	1-2 mm	2-4 mm	4-8mm	8-11 mm	11-16 mm	>16mm
Mittlere Rohwichte kg/dm ³	1,013	0,733	0,733	0,705	0,695	0,695	0,638

Tabelle 78: Zusammenfassung Schüttrohdichte der Ziegelsplittsieblinien; Quelle: Eigene Darstellung

F.2. Serie 1

F.2.1. Sieblinie

Korngröße [mm]	0-1	1-2	2-4	4-8	8-11	11-16	>16	Summe
A (101)	10,0%	20,0%	25,0%	20,0%	15,0%	10,0%	0,0%	100%
B (102)	10,0%	17,5%	15,0%	17,5%	20,0%	15,0%	5,0%	100%
C (103)	5,0%	10,0%	12,5%	15,0%	22,5%	25,0%	10,0%	100%

SOLL-Mengenanteile Probewürfel

Probekörper 15x15x15 cm³ = 3,4 dm³ = 0,0034 m³

Erhöhungsfaktor (Probe A & B) = 1,4 [-]

Zementgehalt (Probe A & B) = 200 kg/m³ = 945 g

w/z-Wert (Probe A & B) = 0,6 = 567 g

Erhöhungsfaktor (Probe C) = 1,3 [-]

Zementgehalt (Probe C) = 200 kg/m³ = 878 g

w/z-Wert (Probe C) = 0,6 = 527 g

Korngröße [mm]	0-1	1-2	2-4	4-8	8-11	11-16	>16	Summe	Anmachwasser
A (101) [g]	478,63	692,92	865,34	666,24	492,61	328,50	0,00	3524,23	775,33
B (102) [g]	478,63	606,30	519,20	582,96	656,81	492,75	150,61	3487,26	767,20
C (103) [g]	239,31	346,46	432,67	499,68	738,92	821,24	301,22	3379,50	743,49

IST-Mengenanteile Probewürfel

Probewürfel 101 102 103

Zementgehalt = 946,00 g 945,19 g 882,86 g

Wassermenge = 568,09 g 568,71 g 446,13 g

Korngröße [mm]	0-1	1-2	2-4	4-8	8-11	11-16	>16	Summe	Anmachwasser
A (101) [g]	478,89	692,50	866,25	667,46	493,43	329,88	0,00	3528,41	779,93
B (102) [g]	478,20	606,59	519,61	583,67	657,25	496,13	152,71	3494,16	773,36
C (103) [g]	223,56	323,65	456,09	466,18	624,36	765,59	282,75	3142,18	690,70

Tabelle 79: Zusammensetzung Probewürfel Serie 1; Quelle: Eigene Darstellung

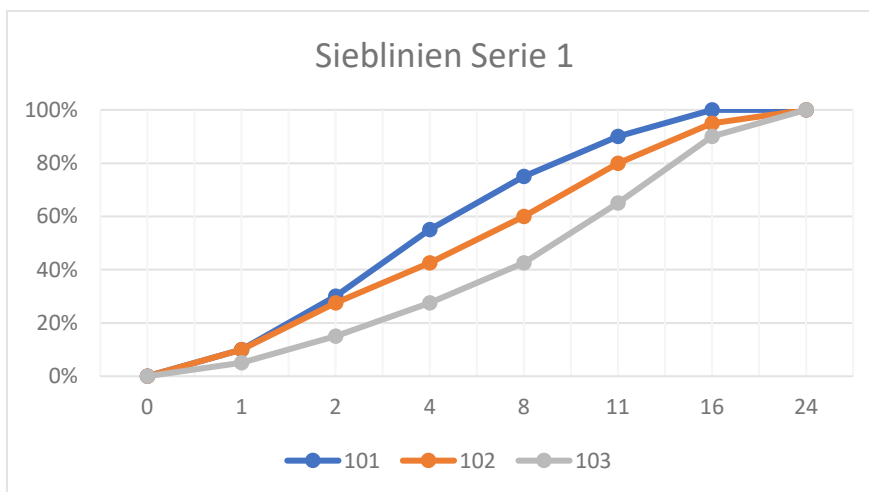


Abbildung 65: Graphische Darstellung der Sieblinien Serie 1; Quelle: Eigene Darstellung

F.2.2. Druckfestigkeit

Proben- nummer	Größe	Breite b [mm]	Länge a [mm]	Höhe h [mm]	Gewicht $m_{dry,s}$ [g]	Grundfläche [mm ²]	Volumen cm ³
101A	4x4x8	39,83	39,71	80,4	181,76	1.581,65	127,164604
101B	4x4x8	39,21	39,5	80,15	182,18	1.548,80	124,135919
101C	4x4x8	39,4	39,67	80,26	180,67	1.563,00	125,446219
101D	4x4x8	39,42	39,1	80,37	183,21	1.541,32	123,876049
101E	4x4x8	39,61	39,55	80,53	184,23	1.566,58	126,156325
101F	4x4x8	39,54	39,65	79,94	183,88	1.567,76	125,326814
101G	3x3x12	29,23	30,03	119,66	144,55	877,78	105,034784
101H	3x3x12	29,77	30,15	119,9	145,13	897,57	107,618103
101I	3x3x12	29,7	29,58	119,54	145,98	878,53	105,018998
102A	4x4x8	38,87	39,01	81,49	171,92	1.516,32	123,564811
102B	4x4x8	39,17	39,07	81,7	169,11	1.530,37	125,031384
102C	4x4x8	39,45	38,93	81,79	167,8	1.535,79	125,612141
102D	4x4x8	37,59	40	80,21	160,35	1.503,60	120,603756
102E	4x4x8	38,59	39,07	80,58	164,12	1.507,71	121,491377
102F	4x4x8	39,45	39,34	80,28	163,94	1.551,96	124,59159
102G	3x3x12	29,78	31,12	121,04	148,51	926,75	112,174256
102H	3x3x12	29,54	31,1	120,98	146,53	918,69	111,1436
102I	3x3x12	29,58	31,05	121,02	145,36	918,46	111,151908
103A	4x4x8	39,13	39,17	80,16	170,95	1.532,72	122,863004
103B	4x4x8	39,07	39,58	79,68	171,71	1.546,39	123,216403
103C	4x4x8	39,32	38,95	79,87	172,34	1.531,51	122,322023
103D	4x4x8	39,6	39,53	79,91	174,63	1.565,39	125,090155
103E	4x4x8	39,37	39,66	80,19	174,11	1.561,41	125,209805
103F	4x4x8	39,45	39,37	79,69	171,08	1.553,15	123,770245

Tabelle 80: Probekörperdaten Serie 1; Quelle: Eigene Darstellung

Probennummer	Rohdichte kg/m ³	Max Last [N]	Druckfestigkeit N/mm ²	E-Modul			Querdehnzahl			E-Modul korrekt	Querkraft korrekt
				1/3 Last	2/3 Last	Max Last	1/3 Last	2/3 Last	Max Last		
101A	1429,33	27.885,75	17,63	9.001,38	9.829,94	7.939,93	0,24	0,36	0,06	j	j
101B	1467,58	23.059,80	14,89	10.685,31	7.302,85	4.612,15	-0,01	0,36	5,65	j	j
101C	1440,22	27.415,65	17,54	11.177,37	8.044,48	6.457,52	0,66	0,12	0,24	j	j
101D	1478,98	27.004,50	17,52	3.843,45	4.503,08	4.939,90	0,21	0,28	0,26	j	j
101E	1460,33	25.357,50	16,19	3.489,88	3.010,20	2.895,01	0,14	0,22	5,89	j	j
101F	1467,20	27.612,30	17,61	32.189,14	15.066,12	11.146,00	-1,58	0,10	0,12	x	x
101G	1376,21										
101H	1348,56										
101I	1390,03										
Mittelwert	1428,72	26.389,25	16,90	7.639,48				0,27			
VK	0,03	0,06	0,06	0,44				0,33			
102A	1391,33	19.350,60	12,76	2.777,38	3.693,34	3.298,10	0,07	0,12	0,52	j	x
102B	1352,54	16.164,30	10,56	2.599,34	2.808,93	2.013,42	0,10	0,46	2,18	j	j
102C	1335,86	14.646,75	9,54	2.967,92	2.605,69	2.171,34	0,21	0,29	0,81	j	j
102D	1329,56	14.929,65	9,93	3.241,52	3.886,69	3.285,58	0,37	0,24	0,45	j	j
102E	1350,88	15.614,25	10,36	7.365,23	6.761,93	4.942,35	1,07	0,45	0,38	j	j
102F	1315,82	16.590,60	10,69	7.453,92	7.555,91	5.393,29	0,54	0,55	0,51	j	x
102G	1323,92										
102H	1318,38										
102I	1307,76										
Mittelwert	1336,23	16.216,03	10,64	4.400,89				0,36			
VK	0,02	0,10	0,10	0,49				0,27			
103A	1391,39	27.183,90	17,74	8.783,47	6.455,20	5.040,80	-0,06	0,15	0,39	x	x
103B	1393,56	21.036,00	13,60	2.936,15	3.176,27	2.183,06	0,19	0,07	0,24	j	x
103C	1408,90	21.156,75	13,81	2.793,67	3.431,32	2.804,76	0,30	0,38	1,43	j	j
103D	1396,03	19.288,50	12,32	2.511,08	2.948,44	2.644,25	0,28	0,25	1,35	j	j
103E	1390,55	20.857,65	13,36	2.469,16	3.086,62	2.323,02	0,16	0,26	1,23	j	j
103F	1382,24	15.522,45	9,99	2.852,74	2.639,19	1.508,62	0,03	0,39	2,18	j	j
Mittelwert	1393,78	20.840,88	13,47	2.712,56				0,32			
VK	0,01	0,17	0,17	0,07				0,20			

Tabelle 81: Einzelergebnisse Druckfestigkeit Serie 1; Quelle: Eigene Darstellung

F.3. Serie 2

F.3.1. Sieblinie

Korngröße [mm]	0-1	1-2	2-4	4-8	8-11	11-16	>16	Summe
A (201)	3,0%	6,0%	20,0%	30,0%	25,0%	16,0%	0,0%	100%
B (202)	2,0%	4,0%	15,0%	27,5%	25,0%	19,5%	7,0%	100%
C (203)	1,0%	2,0%	10,0%	25,0%	27,5%	22,5%	12,0%	100%

SOLL-Mengenanteile Probewürfel

Probekörper 15x15x15 cm ³	= 3,4 dm ³	= 0,0034 m ³
Erhöhungsfaktor	= 1,4 [-]	
Zementgehalt	= 100 kg/m ³	= 472,5 g
w/z-Wert	= 0,6	= 283,5 g

Korngröße [mm]	0-1	1-2	2-4	4-8	8-11	11-16	>16	Summe	Anmach-wasser
A (201) [g]	133,33	193,03	642,82	927,97	762,37	488,05	0,00	3147,59	692,47
B (202) [g]	88,89	128,68	482,12	850,64	762,37	594,82	195,79	3103,32	682,73
C (203) [g]	44,44	64,34	321,41	773,31	838,61	686,33	335,65	3064,09	674,10

IST-Mengenanteile Probewürfel

Probewürfel	201	202	203
Zementgehalt	= 475,65 g	473,57 g	475,05 g
Wassermenge	= 285,30 g	255,16 g	285,03 g

Korngröße [mm]	0-1	1-2	2-4	4-8	8-11	11-16	>16	Summe	Anmach-wasser
A (201) [g]	146,15	208,54	695,13	1001,93	824,21	527,11	0,00	3403,07	774,07
B (202) [g]	95,81	139,75	519,58	918,18	822,03	642,19	215,54	3353,08	755,24
C (203) [g]	48,73	70,43	346,39	834,81	904,12	794,18	365,40	3364,06	757,29

Tabelle 82: Zusammensetzung Probewürfel Serie 2; Quelle: Eigene Darstellung

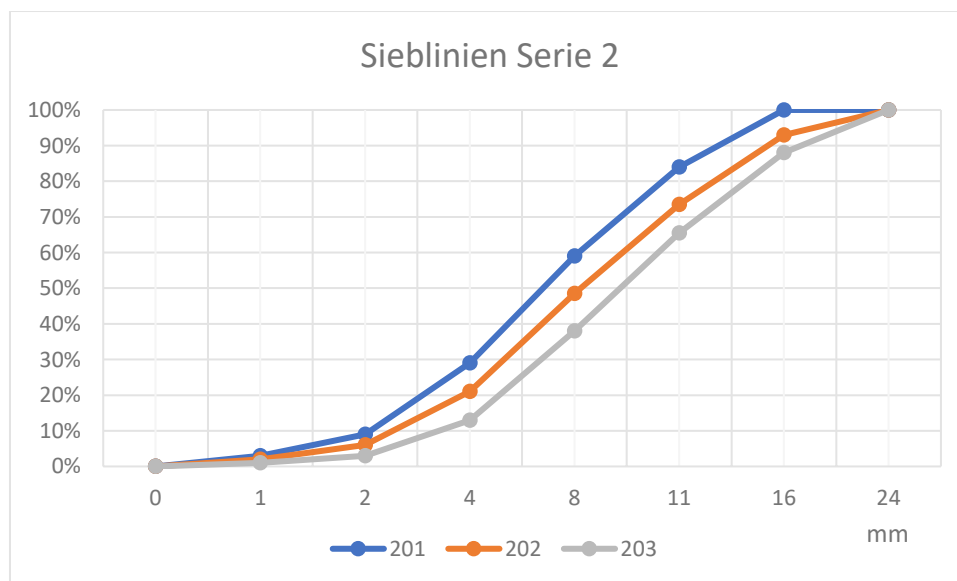


Abbildung 66: Graphische Darstellung der Sieblinien Serie 2; Quelle: Eigene Darstellung

F.3.2. Druckfestigkeit

Proben- nummer	Größe	Breite b	Länge a	Höhe h	Gewicht m _{dry,s}	Grundfläche	Volumen
		[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[mm ²]	[cm ³]
201A	4x4x8	40,73	40,31	79,7	139,28	1.641,83	130,85
201B	4x4x8	40,48	40,39	80,48	144,52	1.634,99	131,58
201C	4x4x8	40,67	40,66	79,98	139,13	1.653,64	132,26
201D	4x4x8	40,44	39,72	79,14	135,3	1.606,28	127,12
201E	4x4x8	40,27	38,84	79,86	135,8	1.564,09	124,91
201F	4x4x8	40,41	40,62	80,24	140,05	1.641,45	131,71
201G	4x4x8	39,78	40,6	80,61	137,2	1.615,07	130,19
201H	4x4x8	40,03	40,48	79,32	137,28	1.620,41	128,53
201I	4x4x8	40,78	39,97	79,73	142,16	1.629,98	129,96
201J	3x3x12	30,31	29,87	120,37	120,69	905,36	108,98
201K	3x3x12	28,06	30,47	120,24	110,91	854,99	102,80
201L	3x3x12	29,64	30,28	119,78	116,77	897,50	107,50
201M	3x3x12	31,05	30,31	119,4	122,79	941,13	112,37
202A	4x4x8	41,01	40,09	80,46	138,97	1.644,09	132,28
202B	4x4x8	38,22	39,85	80,47	129,41	1.523,07	122,56
202C	4x4x8	40,38	38,92	79,17	133,91	1.571,59	124,42
202D	4x4x8	39,99	40,08	80,8	135,52	1.602,80	129,51
202E	4x4x8	38,16	40,2	80,74	125,88	1.534,03	123,86
202F	4x4x8	40,59	40,28	79,72	132,76	1.634,97	130,34
202G	4x4x8	41,04	40,1	80,28	132,93	1.645,70	132,12
202H	4x4x8	38,23	40,86	80,43	126,16	1.562,08	125,64
202I	4x4x8	41,11	40,72	79,65	136,59	1.674,00	133,33
202J	3x3x12	30,23	30,74	119,33	118,23	929,27	110,89
202K	3x3x12	29,88	30,19	119,49	117,12	902,08	107,79
202L	3x3x12	29,42	30,11	119,19	112,54	885,84	105,58
202M	3x3x12	30,19	30,17	119,52	118,63	910,83	108,86
203A	4x4x8	41,3	41,65	80,23	136,95	1.720,15	138,01
203B	4x4x8	41,55	41,06	80,22	139,87	1.706,04	136,86
203C	4x4x8	41,17	40,83	79,73	141,7	1.680,97	134,02
203D	4x4x8	41,14	41,28	80,71	137,48	1.698,26	137,07
203E	4x4x8	41,57	40,22	80,03	139,3	1.671,95	133,81
203F	4x4x8	41,29	40	79,59	139,31	1.651,60	131,45
203G	4x4x8	41,55	39,35	80,28	136,61	1.634,99	131,26
203H	4x4x8	41,6	40,44	80,24	141,87	1.682,30	134,99
203I	4x4x8	41,5	40,08	79,92	142,55	1.663,32	132,93
203J	3x3x12	30,25	30,39	119,64	119,05	919,30	109,98
203K	3x3x12	29,68	30,32	119,91	115,83	899,90	107,91
203L	3x3x12	29,87	30,24	119,34	111,97	903,27	107,80
203M	3x3x12	29,95	30,74	119,61	112,92	920,66	110,12

Tabelle 83: Probekörperdaten Serie 2; Quelle: Eigene Darstellung

Probennummer	Rohdichte kg/m ³	Max Last [N]	Druckfestigkeit N/mm ²	E-Modul			Querdehnzahl			E-Modul korrekt	Querkraft korrekt
				1/3 Last	2/3 Last	Max Last	1/3 Last	2/3 Last	Max Last		
201A	1064,40	4.130,25	2,52	2.880,25	1.822,16	1.497,42	0,77	0,45	0,63	j	j
201B	1098,31	3.836,25	2,35	6.321,20	-56.474,82	8.946,09	-1,36	1,99	-0,18	x	x
201C	1051,96	3.207,15	1,94	1.574,81	1.521,00	1.350,51	-0,06	0,11	1,03	j	x
201D	1064,34	3.360,90	2,09	1.345,79	1.023,17	667,79	0,17	0,67	0,49	j	j
201E	1087,20	2.615,25	1,67	4.784,65	-1.964,12	-1.417,93	-1,95	-0,31	-0,08	x	x
201F	1063,32	2.676,15	1,63	1.035,33	624,74	492,36	0,06	0,09	0,16	j	x
201G	1053,84	3.530,85	2,19	-15.827,89	5.615,62	2.428,52	28,51	-4,72	-0,44	x	x
201H	1068,07	2.904,75	1,79	7.824,28	12.369,53	9.777,56	-2,10	-2,34	-1,92	x	x
201I	1093,89	4.194,15	2,57	959,33	1.043,88	935,29	0,73	0,46	0,41	x	j
201J	1107,47										
201K	1078,85										
201L	1086,21										
201M	1092,73										
Mittelwert	1428,72	26.389,25	16,90	7.639,48				0,27			
VK	0,02	0,16	0,16	0,41				0,19			
202A	1050,55	2.615,70	1,59	877,03	617,07	487,45	0,44	0,31	0,64	j	j
202B	1055,88	2.640,30	1,73	-14.291,02	54.483,21	1.802,76	6,43	-8,52	0,78	x	x
202C	1076,25	3.077,10	1,96	-	-	-	-	-	-	x	x
202D	1046,44	3.042,90	1,90	949,44	747,14	653,27	0,95	0,56	1,32	j	j
202E	1016,33	2.540,85	1,66	1.123,89	1.040,28	814,26	0,37	0,10	0,44	j	j
202F	1018,57	2.341,20	1,43	783,13	721,52	628,96	-0,59	0,22	1,07	j	j
202G	1006,15	2.034,60	1,24	1.161,11	897,67	638,27	0,32	0,39	0,50	j	j
202H	1004,16	1.920,30	1,23	5.164,78	4.756,10	4.025,13	-1,02	0,18	-0,75	x	j
202I	1024,42	3.116,55	1,86	1.568,65	1.130,21	950,24	0,14	0,56	1,21	j	j
202J	1066,19										
202K	1086,57										
202L	1065,89										
202M	1089,72										
Mittelwert	1046,70	2.592,17	1,62	1.077,21				0,33			
VK	0,03	0,16	0,16	0,24				0,51			

- Fortsetzung nächste Seite -

Probennummer	Rohdichte kg/m³	Max Last [N]	Druckfestigkeit N/mm²	E-Modul			Querdehnzahl			E-Modul korrekt	Querkraft korrekt
				1/3 Last	2/3 Last	Max Last	1/3 Last	2/3 Last	Max Last		
- Fortsetzung vorherige Seite -											
203A	992,34	1.435,35	0,83	3.261,49	5.376,17	1.965,29	1,20	1,43	1,91	j	x
203B	1022,00	2.915,70	1,71	2.070,00	1.219,92	926,31	-0,07	-0,15	0,96	j	x
203C	1057,27	3.425,25	2,04	2.017,96	1.878,63	1.080,91	0,32	0,09	0,33	j	j
203D	1003,02	2.078,40	1,22	1.145,70	597,04	412,93	-0,91	0,05	0,55	j	j
203E	1041,06	3.480,75	2,08	1.149,69	1.168,32	902,41	-0,05	0,07	1,39	j	j
203F	1059,79	4.843,80	2,93	2.516,02	1.611,11	1.349,45	-0,18	0,05	0,55	j	j
203G	1040,78	3.280,05	2,01	2.837,01	3.378,82	2.715,87	1,86	1,04	0,08	j	x
203H	1050,98	3.899,55	2,32	-780,69	-3.105,09	5.896,56	-0,82	-1,96	6,59	x	x
203I	1072,35	4.257,45	2,56	1.492,88	1.942,51	1.483,46	0,73	0,46	0,41	j	x
203J	1082,42										
203K	1073,43										
203L	1038,72										
203M	1025,42										
Mittelwert	1043,05	3.290,70	1,97	2.061,34				0,06			
VK	0,02	0,30	0,31	0,35				0,24			

Tabelle 84: Einzelergebnisse Druckfestigkeit Serie 2; Quelle: Eigene Darstellung

F.4. Serie 3

F.4.1. Sieblinie

Korngröße [mm]	0-1	1-2	2-4	4-8	8-11	11-16	>16	Summe
A (301)	4,0%	8,0%	20,0%	30,0%	25,0%	13,0%	0,0%	100%

SOLL-Mengenanteile Probewürfel

Probekörper 15x15x15 cm ³	= 3,4 dm ³	= 0,0034 m ³
Erhöhungsfaktor	= 1,4 [-]	
Zementgehalt	= 150 kg/m ³	= 708 g
w/z-Wert	= 0,6	= 425 g

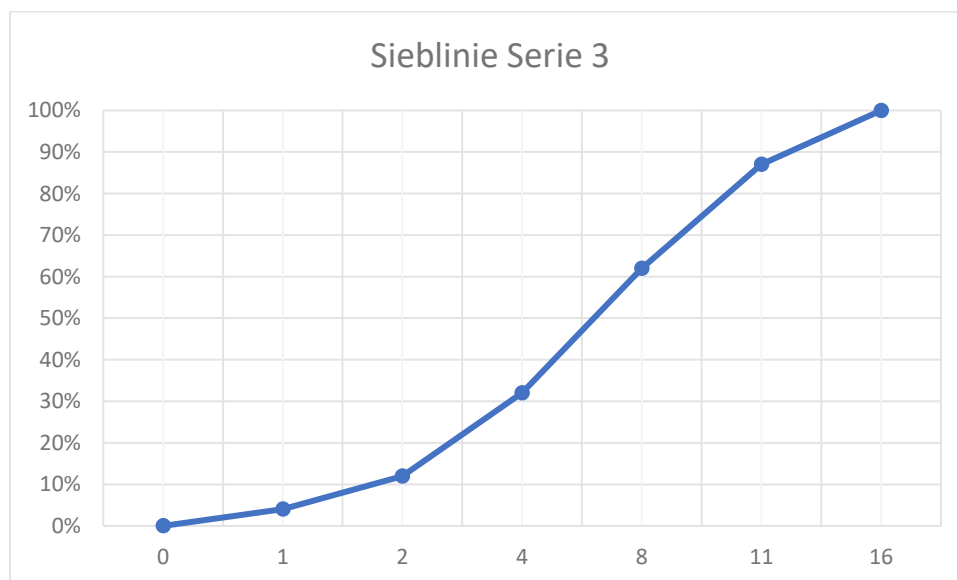
Korngröße [mm]	0-1	1-2	2-4	4-8	8-11	11-16	>16	Summe	Anmach- wasser
A (301) [g]	177,78	257,37	642,82	927,97	762,37	396,54	0	3164,86	696,27

IST-Mengenanteile Probewürfel

Probewürfel 301

Zementgehalt	= 708,75 g
Wassermenge ¹⁾	= 468,02

Korngröße [mm]	0-1	1-2	2-4	4-8	8-11	11-16	>16	Summe	Anmach- wasser ¹⁾
A (301) [g]	146,15	208,54	695,13	1001,93	824,21	527,11	0,00	3403,07	705,60

Tabelle 85: Zusammensetzung Probewürfel Serie 3; Quelle: Eigene Darstellung**Abbildung 67:** Graphische Darstellung der Sieblinien Serie 3; Quelle: Eigene Darstellung

¹⁾ Anmachwasser für die Anteile 1 bis 16 mm, 0-1 mm zusammen mit Zement angemischt und dort im Wasseranteil berücksichtigt

F.4.2. Druckfestigkeit

Probennummer	Größe	Breite b	Länge a	Höhe h	Gewicht $m_{dry,s}$	Grundfläche	Volumen
		[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[mm ²]	[cm ³]
301A	4x4x8	39,75	39,25	81,29	143,43	1.560,19	126,83
301B	4x4x8	39,23	39,21	80,87	144,66	1.538,21	124,39
301C	4x4x8	38,7	39,14	80,91	141,74	1.514,72	122,56
301D	4x4x8	39,41	39,52	78,62	139,56	1.557,48	122,45
301E	4x4x8	39,53	38,98	78,85	139,14	1.540,88	121,50
301F	4x4x8	39,63	39,15	78,56	135,8	1.551,51	121,89
301G	4x4x8	39,66	38,22	81,62	139,4	1.515,81	123,72
301H	4x4x8	39,64	38,72	81,8	137,51	1.534,86	125,55
301I	4x4x8	39,58	39,04	81,31	140,6	1.545,20	125,64
301J	3x3x12	30,29	29,58	119,79	125,02	895,98	107,33
301K	3x3x12	29,21	30,29	119,82	123,62	884,77	106,01
301L	3x3x12	30,24	30,15	119,49	123,46	911,74	108,94
301M	3x3x12	29,68	30,21	119,38	122,85	896,63	107,04

Probennummer	Rohdichte kg/m ³	Max Last [N]	Druckfestigkeit N/mm ²	E-Modul			Querdehnzahl			E-Modul korrekt	Querkraft korrekt
				1/3 Last	2/3 Last	Max Last	1/3 Last	2/3 Last	Max Last		
301A	1130,90	5.326,65	3,41	1.017,58	967,93	706,85	0,08	0,21	0,64	j	j
301B	1162,91	6.470,70	4,21	2.955,35	2.865,06	2.054,36	0,08	-0,19	0,24	j	x
301C	1156,53	5.490,15	3,62	3.085,59	2.067,55	1.509,36	0,54	0,21	0,57	j	j
301D	1139,74	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x
301E	1145,20	6.428,70	4,17	1.681,16	2.000,47	2.039,23	0,39	0,18	0,13	j	j
301F	1114,15	5.501,70	3,55	998,94	1.117,66	967,01	0,09	0,35	1,02	j	j
301G	1126,74	4.667,40	3,08	1.443,51	1.186,88	878,05	0,23	0,22	0,27	j	j
301H	1095,25	5.068,95	3,30	1.870,30	1.557,38	1.266,32	0,21	0,26	0,39	j	j
301I	1119,07	5.202,45	3,37	1.372,49	1.171,11	1.097,98	-0,35	-0,05	0,34	j	x
301J	1164,83										
301K	1166,08										
301L	1133,25										
301M	1147,70										
Mittelwert	1138,64	5.519,59	3,59	1.803,12				0,24			
VK	0,02	0,11	0,11	0,42				0,24			

Tabelle 86: Einzelergebnisse Druckfestigkeit Serie 3; Quelle: Eigene Darstellung

F.5. Serie 4

F.5.1. Sieblinie

Korngröße [mm]	0-1	1-2	2-4	4-8	8-11	11-16	>16	Summe
A (301)	4,0%	8,0%	20,0%	30,0%	25,0%	13,0%	0,0%	100%
A + B (401 + 402)	4,0%	10,0%	22,0%	30,0%	24,0%	10,0%	0,0%	100,0%

SOLL-Mengenanteile Probewürfel

Probekörper 15x15x15 cm³ = 3,4 dm³ = 0,0034 m³

Erhöhungsfaktor = 1,4 [-]

Zementgehalt = 150 kg/m³ = 708 g

w/z-Wert = 0,6 = 425 g

Korngröße [mm]	0-1	1-2	2-4	4-8	8-11	11-16	>16	Summe	Anmachwasser
A + B (401 + 402) [g]	184,61	334,08	734,30	963,67	760,03	316,77	0,00	3293,46	724,56

IST-Mengenanteile Probewürfel

Probewürfel 401 402

Zementgehalt = 713,92 g 714,35 g

Wassermenge¹⁾ = 466,30 g 466,12 g

Korngröße [mm]	0-1	1-2	2-4	4-8	8-11	11-16	>16	Summe	Anmachwasser ¹⁾
A (401) [g]	186,1	336,54	736,44	965,45	763,37	319,48	0,00	3307,38	686,68
B (402) [g]	186,53	336,68	736,81	965,62	763,77	319,2	0,00	3308,61	687,88

Tabelle 87: Zusammensetzung Probewürfel Serie 4; Quelle: Eigene Darstellung

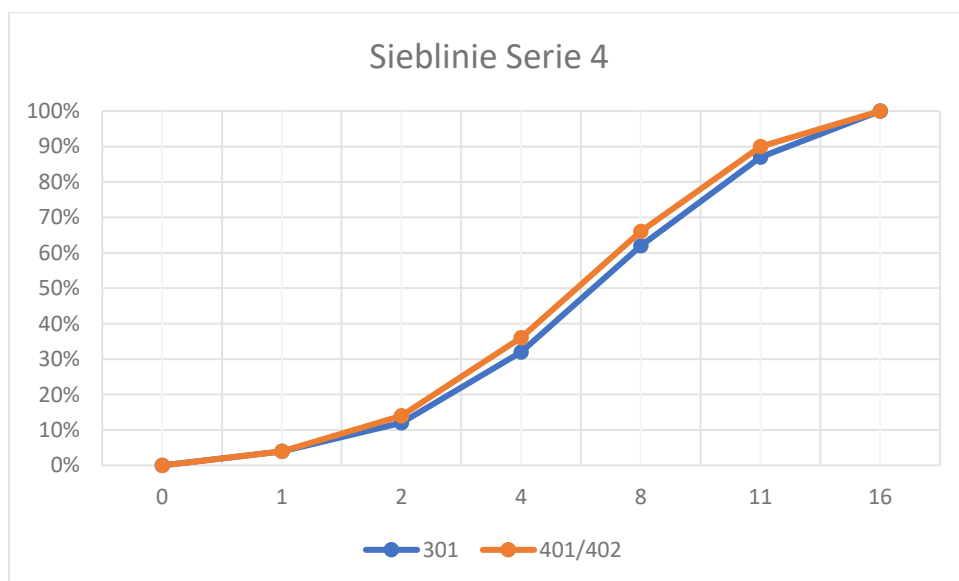


Abbildung 68: Graphische Darstellung der Sieblinien Serie 4; Quelle: Eigene Darstellung

¹⁾ Anmachwasser für die Anteile 1 bis 16 mm, 0-1 mm zusammen mit Zement angemischt und dort im Wasseranteil berücksichtigt

F.5.2. Druckfestigkeit

Proben- nummer	Größe	Breite b	Länge a	Höhe h	Gewicht m _{dry,s}	Grundfläche	Volumen
		[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[mm ²]	[cm ³]
401A	4x4x8	40,37	39,91	81,19	162,37	1.611,17	130,81
401B	4x4x8	40,59	39,64	81,11	165,00	1.608,99	130,50
401C	4x4x8	40,23	39,28	81,31	160,41	1.580,23	128,49
401D	4x4x8	40,56	40,56	81,31	164,01	1.645,11	133,76
401E	4x4x8	40,28	40,60	81,56	170,00	1.635,37	133,38
401F	4x4x8	40,51	40,68	81,46	170,12	1.647,95	134,24
401G	4x4x8	40,59	40,64	81,32	166,54	1.649,58	134,14
401H	4x4x8	40,28	40,66	81,50	167,72	1.637,78	133,48
401I	4x4x8	39,93	40,71	81,47	161,81	1.625,55	132,43
401J	3x3x12	30,31	30,03	120,77	134,77	910,21	109,93
401K	3x3x12	29,61	30,35	120,75	139,1	898,66	108,51
401L	3x3x12	30,12	30,31	121,28	140,99	912,94	110,72
401M	3x3x12	30,05	30,18	121,44	138,55	906,91	110,14
402A	4x4x8	39,84	40,58	81,36	165,76	1.616,71	131,54
402B	4x4x8	39,93	40,48	81,27	166,61	1.616,37	131,36
402C	4x4x8	40,42	39,72	81,22	163,91	1.605,48	130,40
402D	4x4x8	40,19	40,59	81,13	167,39	1.631,31	132,35
402E	4x4x8	40,21	40,01	81,19	169,36	1.608,80	130,62
402F	4x4x8	40,14	39,87	80,81	164,83	1.600,38	129,33
402G	4x4x8	40,09	40,85	81,60	162,02	1.637,68	133,63
402H	4x4x8	40,78	40,32	81,15	164,98	1.644,25	133,43
402I	4x4x8	40,43	40,67	80,96	163,26	1.644,29	133,12
402J	3x3x12	30,47	30,44	120,88	140,76	927,51	112,12
402K	3x3x12	30,45	30,02	120,66	141,96	914,11	110,30
402L	3x3x12	30,37	29,91	120,75	138,19	908,37	109,69
402M	3x3x12	30,22	30,21	120,59	143,75	912,95	110,09

Tabelle 88: Probekörperdaten Serie 4; Quelle: Eigene Darstellung

Probennummer	Rohdichte kg/m ³	Max Last [N]	Druckfestigkeit N/mm ²	E-Modul			Querdehnzahl			E-Modul korrekt	Querkraft korrekt
				1/3 Last	2/3 Last	Max Last	1/3 Last	2/3 Last	Max Last		
401A	1241,26	8.984,70	5,58	1.562,48	1.473,13	1.020,43	-0,05	0,28	0,81	j	j
401B	1264,32	10.537,65	6,55	1.658,29	1.801,63	1.624,94	0,26	0,26	0,79	j	j
401C	1248,44	9.045,60	5,72	1.726,90	1.776,57	1.089,92	0,04	0,24	1,24	j	j
401D	1226,11	12.025,65	7,31	3.136,94	3.564,66	3.558,41	0,53	0,17	0,52	j	j
401E	1274,55	9.150,30	5,60	1.820,75	1.239,30	957,50	0,17	0,27	1,42	j	j
401F	1267,27	10.890,15	6,61	2.586,84	2.359,67	1.692,00	-0,27	0,14	1,27	j	j
401G	1241,50	9.220,65	5,59	1.786,61	1.678,84	1.399,87	0,68	0,56	1,36	j	x
401H	1256,52	7.828,95	4,78	2.251,40	2.127,37	2.114,24	0,71	0,35	0,68	j	j
401I	1221,82	11.114,40	6,84	4.895,24	4.075,17	4.155,65	0,27	-0,07	0,19	j	x
401J	1226,01										
401K	1281,87										
401L	1273,38										
401M	1258,00										
Mittelwert	1252,39	9.866,45	6,06	2.380,60				0,24			
VK	0,02	0,13	0,12	0,43				0,27			
402A	1260,19	9.137,40	5,65	1.913,59	1.783,11	1.460,05	0,13	0,47	1,09	j	j
402B	1268,33	9.579,60	5,93	2.125,30	1.910,97	1.582,80	-0,22	0,10	1,00	j	x
402C	1257,00	7.885,50	4,91	2.598,56	2.102,39	1.484,90	0,63	0,46	1,08	j	j
402D	1264,77	11.797,95	7,23	2.549,75	3.097,02	2.796,65	-0,12	-0,04	0,38	j	x
402E	1296,60	11.121,00	6,91	2.232,09	2.280,05	1.903,35	0,27	0,13	0,85	j	x
402F	1274,52	9.346,80	5,84	3.681,17	2.863,25	2.543,71	0,58	0,72	1,19	j	j
402G	1212,41	9.074,40	5,54	2.497,56	2.309,70	1.754,38	0,87	0,51	1,89	j	j
402H	1236,45	9.876,60	6,01	2.063,02	1.895,98	1.436,46	0,73	0,36	1,59	j	j
402I	1226,40	9.232,50	5,61	2.110,09	2.160,00	1.936,67	0,63	0,71	1,57	j	j
402J	1255,47										
402K	1287,08										
402L	1259,88										
402M	1305,72										
Mittelwert	1261,91	9.672,42	5,96	2.419,01				0,54			
VK	0,02	0,11	0,11	0,21				0,25			

Tabelle 89: Einzelergebnisse Druckfestigkeit Serie 4; Quelle: Eigene Darstellung

G. Biegezugfestigkeit reproduzierter Ziegelsplittbeton

G.1. Probewürfel Serie 1 und 2

Probennr.	Max. Biegezug $F_{\max}$ [N]	Verformung dl bei $F_{\max}$ [mm]	Bruch in	Anmerkung	Querschnitts- fläche [mm ²]	Biegezug- festigkeit N/mm ²	Mittlere Biegezug- festigkeit N/mm ²	VK
101G	538,94	0,222	Ziegel & Mörtel	klar zu hörendes knacken bei Bruch	877,78	3,07		
101H	688,46	0,248	Ziegel & Mörtel	lauter Bruch	897,57	3,82	3,79	0,15
101I	779,86	0,295	Ziegel & Mörtel	lauter Bruch	878,53	4,50		
102G	637,3	0,239	Ziegel & Mörtel	klar zu hörendes knacken bei Bruch	926,75	3,31		
102H	565,01	0,354	Ziegel & Mörtel	lauter Bruch	918,69	2,97	3,13	0,05
102I	593,34	0,256	Ziegel & Mörtel	klar zu hörendes knacken bei Bruch	918,46	3,12		
201J	195,17	0,157	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel	knirschender Bruch	905,36	1,08		
201K	107,2	0,286	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel	knirschender Bruch mit vorbruchverhalten	854,99	0,62	1,02	0,24
201L	202,81	0,219	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel	leise knirschender Bruch	897,50	1,12		
201M	241,33	0,167	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel	knirschender Bruch	941,13	1,27		
202J	212,29	0,130	Ziegel & Mörtel	kein klarer Bruch zu hören	929,27	1,11		
202K	193	0,243	Ziegel & Mörtel	leises knirschen bei Bruch	902,08	1,06	1,19	0,09
202L	239,32	0,235	Ziegel & Mörtel	leises knirschen bei Bruch	885,84	1,35		
202M	228,06	0,284	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel	knirschender Bruch	910,83	1,24		
203J	163,01	0,193	Ziegel & Mörtel	leises knacken bei Bruch	919,30	0,88		
203K	165,91	0,132	Ziegel & Mörtel	leises knacken bei Bruch	899,90	0,91		
203L	109,19	0,181	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel	leises knacken bei Bruch	903,27	0,60	0,75	0,19
203M	118,53	0,183	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel	knirschender langsamer Bruch, kaum Zementhaftung	920,66	0,63		

Tabelle 90: Einzelergebnisse der Biegezugfestigkeit der Probewürfel der Serie 1 und 2, die rot markierten Einzelwerte sind nicht in den Mittelwert eingeflossen; Quelle: Eigene Darstellung

G.2. Probewürfel Serie 3 und 4

Probenr.	Max. Biegezug $F_{\max}$ [N]	Verformung dl bei $F_{\max}$ [mm]	Bruch in	Anmerkung	Querschnitts- fläche [mm ²]	Biegezug- festigkeit N/mm ²	Mittlere Biegezug- festigkeit N/mm ²	VK
301J	270,14	0,240	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel	leises knirschen bei Bruch	895,98	1,53		
301K	415,84	0,192	Ziegel & Mörtel	schleifendes knirschen bei Bruch	884,77	2,33	1,80	0,18
301L	287,08	0,242	hauptsächlich Mörtel & etwas Ziegel	sehr leises knacken bei Bruch	911,74	1,57		
301M	320,15	0,162	Ziegel & Mörtel	sehr leises knacken bei Bruch	896,63	1,77		
401J	436,68	0,185	hauptsächlich Ziegel & etwas Mörtel	knirschend knackender Bruch	910,21	2,40		
401K	588,92	0,293	hauptsächlich Ziegel & etwas Mörtel	lauter Bruch	898,66	3,24	3,26	0,16
401L	671,19	0,344	hauptsächlich Ziegel & etwas Mörtel	lauter knackender Bruch	912,94	3,64		
401M	684,07	0,369	hauptsächlich Ziegel & etwas Mörtel	lauter abrupter Bruch	906,91	3,75		
402J	520,76	0,222	hauptsächlich Ziegel & etwas Mörtel	leiser knackender Bruch	927,51	2,77		
402K	579,25	0,229	hauptsächlich Ziegel & etwas Mörtel	leises knacken bei Bruch	914,11	3,17	3,39	0,17
402L	598,79	0,245	hauptsächlich Ziegel & etwas Mörtel	lautes knacken bei Bruch	908,37	3,31		
402M	795,05	0,28	hauptsächlich Ziegel & etwas Mörtel	lauter abrupter Bruch	912,95	4,32		
Gesamtmittelwert Probe 4						3,32		0,17

Tabelle 91: Einzelergebnisse der Biegezugfestigkeit der Probewürfel der Serie 3 und 4, die rot markierten Einzelwerte sind nicht in den Mittelwert eingeflossen; Quelle: Eigene Darstellung