

**TU**

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

## **DIPLOMARBEIT**

Master´s Thesis

# **STRUKTURELLE FESTIGUNG VON AFLENZER KALKSANDSTEIN DURCH BIOMINERALISATION**

STRUCTURAL CONSOLIDATION OF AFLENZER CALCAREOUS ARENITE VIA BIOMINERALISATION

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs unter  
der Leitung von

a.o.Univ.-Prof. Mag. Dr. Andreas Rohatsch  
am  
Institut für Ingenieurgeologie E203

und  
Priv. Doz. Dr. Dipl. Biol. Katja Sterflinger  
am  
Institut für angewandte Mikrobiologie H791

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

durch

**Ingrid Rulofs**  
9925070  
Hernalser Hauptstraße 189  
1170 Wien

# INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG.....	3
ABSTRACT .....	5
1 Einleitung.....	7
1.1 Problemstellung / Zielsetzung .....	7
1.1.1 Geologische und petrologische Grundlagen des Aflenzer Kalksandsteines.....	8
1.1.2 Technische Kennwerte des Aflenzer Kalksandsteins .....	9
1.2 Verwitterung und Schadensbilder.....	10
1.2.1 Verwitterungsprozesse.....	10
1.2.2 Schadensbilder.....	12
1.3 Konservierung und Restaurierung von Denkmälern aus porösem Naturstein .....	12
1.4 Kalkwasserfestigung.....	13
1.4.1 Chemische Vorgänge bei der Kalkwasserfestigung.....	14
1.5 Bakterielle Festigung – Biomineralisation .....	16
1.5.1 Chemische Vorgänge bei der bakteriellen Biomineralisierung.....	18
2 Methodik.....	20
2.1 Angewandte Prüfmethoden.....	20
2.1.1 Rohdichtebestimmung .....	20
2.1.2 Massenbezogene Wasseraufnahme .....	21
2.1.3 Wasseraufnahmeverhalten.....	22
2.1.4 Wasserabgabeverhalten.....	22
2.1.5 Ultraschallmessungen .....	23
2.1.6 Biegezugfestigkeit .....	24
2.1.7 Keimzahlbestimmung.....	25
2.1.8 PAS- Färbung .....	26
3 Versuchsdurchführung .....	27
3.1 Probenauswahl .....	27
3.2 Vorbehandlung der Proben und Auswirkungen.....	29
3.3 Rohdichtebestimmung.....	30

3.4	Wasseraufnahme .....	31
3.5	Wasseraufnahmeverhalten .....	31
3.6	Wasserabgabeverhalten .....	33
3.7	Ultraschallmessungen.....	34
3.8	Allgemeine Grundlagen zu <i>Bacillus cereus</i> .....	35
3.9	Verwendete Applikationslösungen und Applikationstechnik .....	36
3.9.1	Herstellung der Bakterienkultur .....	38
3.9.2	Applikation von Bakterien und Kalkwasser.....	39
3.9.3	Applikation von Bakterien und Wasser .....	40
3.9.4	Applikation von Kalkwasser .....	41
3.10	Lagerung der Proben.....	41
4	Beschreibung der Ergebnisse.....	42
4.1	Nachweis der Besiedelung der beimpften Proben mit Bakterien.....	42
4.1.1	Keimzahlbestimmung.....	42
4.1.2	PAS Färbung .....	43
4.2	Rohdichtebestimmung.....	52
4.3	Wasseraufnahme .....	56
4.4	Wasseraufnahmeverhalten .....	59
4.5	Wasserabgabeverhalten .....	65
4.6	Ultraschallmessungen.....	70
4.7	Biegezugfestigkeit an Prismen.....	75
5	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	77
5.1	Prismen.....	77
5.2	Zylinder.....	78
6	Diskussion und Ausblick .....	79
	Literaturverzeichnis .....	83
	Verwendete Normen.....	89
	Anhang.....	90

## KURZFASSUNG

Die Frage der Konservierungsmöglichkeiten von Kalksandsteinen stellt in der Praxis einen häufig diskutierten Punkt dar. Die heute als Standard verwendete Methode der Festigung mit Kieselsäureester steht jedoch in einigen Punkten im Widerspruch zur CHARTA VON VENEDIG (1964/1989). Diese fordert vor allem den Einsatz von Materialien, die denen des ursprünglichen Objekts weitgehend entsprechen. Um gerade das Problem des Fremdkörperaspektes zu lösen, beschäftigt sich diese Arbeit mit der Möglichkeit der Konsolidierung von Kalksandstein mit Kalkwasser (Kalziumhydrat). Hierbei besteht die neu gebildete Bindemittelmatrix aus Kalziumkarbonat und kommt somit dem Gefüge des Kalksandsteines sehr nahe. Gezielt wird der Aflenzer Kalksandstein für die Untersuchungen herangezogen, da bei ihm ein spezieller Aspekt zu Tage tritt. Nach dem Abbau kommt es während der Lagerung zu einer Nachfestigung des Gefüges, deren Ursache bis heute im Wesentlichen noch ungeklärt ist. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit neben dem Aspekt der Kalkwasserfestigung auch die Möglichkeit einer Verbesserung des Gefüges mittels Bakterien, in diesem Fall dem *Bacillus cereus*, einem häufig vorkommenden Bodenbakterium, getestet. Zudem soll festgestellt werden, ob durch Zugabe von Kalkwasser, als Kalziumquelle für das Bakterium eine verbesserte Festigungswirkung erzielt werden kann.

Für die Untersuchungen wurden Probekörper aus Aflenzer Kalksandstein mit dreierlei Applikationslösungen getränkt. Diese waren Kalkwasser, Kalkwasser mit Bakterien und Wasser mit Bakterien. Um Veränderungen festzuhalten wurden die Proben jeweils vor und nach der Behandlung verschiedenen Untersuchungen unterzogen. Um ein möglichst breites Spektrum abzudecken wurden Rohdichte, Wasseraufnahme, Wasseraufnahmeverhalten, Wasserabgabeverhalten, Ultraschallgeschwindigkeit und Biegezugfestigkeit bestimmt. Mit Hilfe dieser Untersuchungen sollten Veränderungen im Gefüge durch Neubildung von Kalziumkarbonat nachgewiesen werden. Des Weiteren wurden zum Nachweis der Bakterien und deren Eindringtiefe Keimzahlbestimmungen und PAS Färbungen durchgeführt.

Die jeweiligen Ergebnisse waren jedoch nicht so aussagekräftig und eindeutig wie erhofft worden war. Aus den Resultaten ließ sich bei keiner der drei angewandten Applikationslösungen eine deutliche Tendenz einer Verbesserung oder Verschlechterung erkennen. Die Veränderungen waren zwar durchaus messbar, in wieweit jedoch Veränderungen in der zweiten Kommastelle relevant sind, sei dahingestellt. Das Problem liegt hierbei nicht unbedingt an einem Fehlschlag der Festigungsversuche, als vielmehr an zum Teil nicht aussagekräftigen oder für den jeweiligen Zweck nicht treffenden, zu unsensiblen Untersuchungsmethoden.

## ABSTRACT

The question of options for the conservation of Aflenzer Calcerous Arenite is under frequent discussion. The current accepted standard method of consolidation uses silicic acid ester which however, in some aspects contravenes the CHARTA OF VENICE (1964). The CHARTA OF VENICE states that applied materials should be as equal as possible to the original materials. Therefore, to resolve this foreign-material-problem, this Masters Thesis deals with the possibility of structural consolidation of Calcerous Arenite by using lime water (Calciumhydrate). In this case the new built binder matrix consists of Calciumcarbonate, which comes very close to the natural structure of Calcerous Arenite. In this study Aflenzer Calcerous Arenite was chosen because of its special characteristic which is that the strength of the stone will increase after its mining. The reason for this post-mining-increase of strength is not yet known.

In addition to the subject of consolidation of Calcerous Arenite by using limewater, this work will deal with the possibility of enhancing the structure of the stone by using bacteria. In this case we will use the *Bacillus cereus*, a very common soil-dwelling bacteria. It will also check whether the addition of lime water as a Calcium-source to the bacteria will improve the consolidating effect.

To carry out these trials, three different solutions were applied to the test specimens. These were limewater, limewater with bacteria and bacteria with water. To identify differences caused by the application of these solutions the specimens will be checked before and after the consolidation cycle. To obtain a comprehensive spectrum of investigations, bulk density, water absorption, water absorption over time, as well as water delivery, water delivery over time, ultrasonic velocity and bending tensile strength were tested. By using these measurements, changes of structure were verified. To identify the depth of penetration and the existence of the bacteria after the consolidation process, the bacteria were counted and a PAS-reaction test was carried out.

Though the particular effects were not as significant and definite as hoped, the results did not show a clear result for any of the three application solutions. The changes were quite measurable, but the question remains if these changes were really significant. But in this case, the problem is not that the consolidation methods themselves are not effective, but rather that the investigation methods are not suitable for this purpose because they are far too crude and insensitive.

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Problemstellung / Zielsetzung

Die Problemstellung der Arbeit liegt in der Frage der Konservierungsmöglichkeiten von Kalksandstein, speziell dem Aflenzer Kalksandstein. Bei diesem Baustoff ist vor allem das Problem des Absandens hervorzuheben, bei dem es zu einem allmählichen Ablösen der Sandkörner an der Oberfläche kommt. Diese Problematik zeigt sich für jeden deutlich, der den Verfall oder die ständigen Renovierungsmaßnahmen der zum Teil Jahrhunderte alten Gebäude oder Denkmäler aus Kalksandstein betrachtet. Die konventionelle Methode zur Festigung ist heute die Konsolidierung mittels Kieselsäureester. Diese Methode hat jedoch zwei gravierende Nachteile. Zum Ersten kommt es häufig zu einer Überfestigung des behandelten Bereiches an der Oberfläche, und somit zu einer Krustenbildung. Zum Anderen bildet das neue Bindemittel einen Fremdkörper im Originalmaterial, was den Forderungen der CHARTA VON VENEDIG (1964/1989) widerspricht.

Das Ziel dieser Arbeit liegt daher in der Überprüfung der Möglichkeit der Festigung von Kalksandsteingefügen mittels Biomineralisierung im Vergleich zur ebenfalls nicht konventionellen Kalkwasserfestigung, da mit diesen Methoden eine Bindemittelmatrix aus  $\text{CaCO}_3$  gebildet wird, die dem ursprünglichen Material nahe kommt. Zu diesem Zweck werden unter zu Hilfenahme von Kalkwasser, Kalkwasser und Bakterien sowie Leitungswasser und Bakterien diese 3 unterschiedlichen Methoden unter Laborbedingungen an Probekörpern aus Aflenzer Kalksandstein getestet. Ähnliche Versuchsanordnungen wurden bereits in früheren Arbeiten von KERNER (2005) und ZEUGSWETTER (2008) getroffen. Hier wurden diese Methoden jedoch an Kalkputzen getestet. In beiden genannten Arbeiten kam es durchaus zur Verstärkung des Gefüges durch die Applikation von Bakterien und/oder Kalkwasser.

Für diese Arbeit wurde daher der Aflenzer Kalksandstein herangezogen, da dieser die Eigenschaft besitzt, dass er nach dem Abbau an Festigkeit gewinnt. Eine weitere Fragestellung ist, ob durch Zugabe von Kalkwasser als Kalziumquelle ein größerer Festigungserfolg erzielt werden kann. An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass in dieser Arbeit erstmals eine Langzeitlagerung der behandelten Proben über einen Zeitraum von zwei Jahren stattfand.

Für die Bewertung der Ergebnisse wurden neben der Veränderung der Festigkeitseigenschaften durch Bestimmung der Biegezugfestigkeit, auch die Änderungen von Rohdichte, Ultraschallgeschwindigkeit und Wasseraufnahmeverhalten herangezogen. Abschließend sollen dann mögliche, sinnvolle Maßnahmen, die in der Praxis anwendbar wären, aufgezeigt werden.

### **1.1.1 Geologische und petrologische Grundlagen des Aflenzer Kalksandsteines**

Der Aflenzer Kalksandstein (W-Leibnitz), der als Baustein häufige Verwendung fand, zählt zu den Leithakalken des Badenium der österreichischen Tertiärbecken und entstand somit vor ca. 15 Millionen Jahren.

Den Hauptbestandteil des Aflenzer Kalksandsteins bilden kleine Fossilien (Foraminiferen und Kalkrotalgen) oder gleichkörniger Sand aus Bruchstücken von Kalkrotalgen und größeren Molluskenschalen. Die Verkittung dieser Organismenreste erfolgte in der Regel mit Kalkspat, der die Bruchstücke mit einem Kristallüberzug versieht. (KIESLINGER, 1932)

Das mächtigste Vorkommen des Aflenzer Kalksandsteins liegt nördlich des Kalksteinbruches Retznei an der Straße zwischen Retznei und Aflenz. Dort befinden sich die „Römerhöhlen“ von Aflenz bei Leibnitz. (PLASS, 1988)



Abbildung 1: „Römerhöhlen“ von Aflenz bei Leibnitz

<http://www.wagna.at/flaviasolva/sites/aktuell.html>

### **1.1.2 Technische Kennwerte des Aflenzer Kalksandsteins**

Es lassen sich nach KIESLINGER (1932) und GSCHEIDER (2002) zwei Varietäten des Aflenzer Kalksandsteins unterscheiden:

Die Farbe der Varietät A reicht von hellgrau bis hellgelb. Das Gefüge ist feinkörnig mit einer großen Anzahl gesteinsbildender Komponenten wie Foraminiferen und Kalkalgen.

Die Farbstufung der Varietät B erstreckt sich von hellgelb bis gelbbraun und das Gefüge ist gleichmäßig grobkörnig mit einer geringen Anzahl an Großfossilien.

Tabelle 1 gibt eine Übersicht der technischen Kennwerte dieses Kalksandsteines in seinen unterschiedlichen Ausbildungen.

	Varietät A	Varietät B
Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1,95 – 1,96	1,74 – 1,75
Reindichte [g/cm <sup>3</sup> ]	2,70 – 2,71	
Dichtigkeitsgrad [%]	72 – 65	
Gesteinshohlraum [%]	35 – 28	
Korngröße [mm]	≤ 2,0 mm	
Einaxiale Würfeldruckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	8,8 – 16,4	7,8 – 10,2
Biegezugfestigkeit (prismatisch) [N/mm <sup>2</sup> ]	5,0 – 5,2	2,1 – 2,5
Massenbezogene Wasseraufnahme nach 24 h Wasserlagerung [%]	10,4 - 12	13,9 – 16,3
Ultraschallgeschwindigkeit [km/s]	2,8 – 3,1	2,2 – 2,4

*Tabelle 1: Technische Kennwerte des Aflenzer Kalksandsteins  
JATZKO (2004)*

## **1.2 Verwitterung und Schadensbilder**

Bauwerke und Denkmäler aus Naturstein sind zahlreichen natürlichen und anthropogenen Einflüssen ausgesetzt, die eine Verwitterung des Gesteines bewirken.

Dabei spielt bei nahezu allen Verwitterungsprozessen Wasser entweder als Lösungsmittel und Transportmittel für Säuren und Basen oder durch sein Vorhandensein überhaupt (z.B. Quellen, Frostsprengung, Rosten, Kapillardruck, hygrisches Dehnen, Besiedelung durch Pilze, Algen, Bakterien, etc.) eine entscheidende Rolle.

### **1.2.1 Verwitterungsprozesse**

Die Verwitterungsprozesse werden im Allgemeinen in physikalische, chemische und biologische Verwitterung unterschieden. Dabei sind die einzelnen Prozesse nicht immer von einander unabhängig und treten meist in Kombination auf.

Die nachstehende Klassifizierung orientiert sich an FITZNER & SNETHLAGE (1982).

## **Physikalische Verwitterungsprozesse**

Unter der physikalischen Verwitterung wird die mechanische Zerstörung des Gesteins infolge von Spannungen verstanden. Darunter fallen unter anderem die Frostsprengung, also die Zerstörung des Gesteins zufolge der Eisbildung innerhalb der Porenräume, die Salzverwitterung, bei der das Gefüge durch den Kristallisationsdruck oder Hydratationsdruck im Porenraum zerstört wird, sowie das Quellen von Tonmineralen oder die Sprengung durch die Volumsvergrößerung von rostenden Eisenteilen.

## **Chemische Verwitterungsprozesse**

Alle Vorgänge, bei denen Gesteine gelöst oder in eine andere Form überführt werden, zählen zur chemischen Verwitterung. Durch im Porenwasser gelöste Salze oder sorbierte gasförmige Schadstoffe ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ) kann die Löslichkeit von im Gestein befindlichen Komponenten beachtlich verändert werden.

Chemische und physikalische Verwitterung können nicht immer getrennt voneinander betrachtet werden, da Ursachen und Wirkungen dieser Prozesse eng miteinander verbunden sind, z.B. Salzlösung und Sprengung infolge des Kristallisations- oder Hydratationsdruckes.

## **Biologische Verwitterungsprozesse**

Unter dieser Form der Verwitterung werden schädigende Einflüsse von Mikroorganismen wie Algen, Flechten, Moose, Bakterien, Schimmelpilze und Insekten zusammengefasst. Dabei bilden die Mikroorganismen organische und anorganische Säuren, die die Lösung von Mineralen aus dem Gestein, und damit eine Gefügeschwächung bewirken (BRILL, 1995).

Zahlreiche Studien der letzten Jahrzehnte haben den Beitrag dieser Kleinstlebewesen zum Verfall und der Verwitterung von Bauwerken belegt. (STERFLINGER u.a., 2006).

### **1.2.2 Schadensbilder**

Ein Schadensbild, das sich an Aflenzer Kalksandstein zeigt ist das Absanden, zumeist in Folge von Salzkristallisation und erneuter Lösung der Salze. Nach SAUDER (1995) tritt das Absanden vor allem bei Sedimentgesteinen auf, deren Körner durch ein Bindemittel verkittet sind, wie das auch bei Aflenzer Kalksandstein der Fall ist. Dabei lockert sich durch Veränderung oder Auflösen des Bindemittels der Gefügeverband des Gesteins und es kommt zum Abrieseln einzelner Körner. Da in der vorliegenden Arbeit Möglichkeiten einer Festigung des Gefüges untersucht wurden, wird auf das Problem des Absandens eingegangen, auch wenn es sich hierbei nicht um eines der häufigsten Schadensbilder handelt. Mittels einer Festigung könnte dem Auflösen des Gefügeverbands entgegengewirkt werden.

### **1.3 Konservierung und Restaurierung von Denkmälern aus porösem Naturstein**

Die Konservierung und Restaurierung von Denkmälern bilden eine Disziplin, welche sich aller Wissenschaften und Techniken bedient, die zur Erforschung und Erhaltung des kulturellen Erbes beitragen können (CHARTA VON VENEDIG 1964/1989). Das vordringliche Ziel, die Erhaltung von Denkmälern erfordert eine dauernde Pflege derselben. Da durch äußere Umwelteinflüsse oder Mängel in der Bausubstanz aber Schäden auftreten können, für deren Behebung die Möglichkeiten der Erhaltung nicht ausreichen, ist zeitweise eine Restaurierung der Bausubstanz notwendig.

Unter Restaurierung werden Wiederherstellungsmaßnahmen an beschädigten oder verfallenen Objekten verstanden. (KUNSTLEXIKON, 1996). Ziel ist es, die ästhetischen, künstlerischen und historischen Werte zu bewahren. Restaurierung erfolgt auf der Basis der kritischen Interpretation des Kunstwerkes und endet dort, wo die Hypothese beginnt (CHARTA VON VENEDIG, 1964/1989). Sie erfolgt in der

Regel durch farbliche und plastische Ergänzungen von Fehlstellen sowie durch Korrektur oder Entfernung früherer Zutaten aus Überarbeitungen. Zu beachten ist, dass vorhandene Originalteile nach der Restaurierung nicht neu wirken, sondern historisches Zeugnis bleiben sollen (KIESLINGER, 1979).

Einer Restaurierung gehen häufig konservierende Maßnahmen voraus, das bedeutet die rein materielle Sicherung des vorliegenden Bestandes. Während eine Restaurierung Ausnahmecharakter behalten sollte, bedarf Kunst und Kulturgut kontinuierlicher Wartung und Pflege durch Konservierung.

Unter Konservierung versteht man also die Stabilisierung des Ist-Zustands, wohingegen die Restaurierung über die reine Stabilisierung eines beschädigten Objektes hinausgeht.

Nicht jedes Verfahren zur Konservierung oder Restaurierung ist für jeden Schadensfall anwendbar. Deshalb muss vor Erstellung eines Konzeptes eine Schadensanalyse erarbeitet werden, wobei Bauwerk und Schäden immer in ihrer Gesamtheit gesehen werden sollten (FLEISCHER u.a., 2006).

#### **1.4 Kalkwasserfestigung**

Die Kalkwasserfestigung ist derzeit keine konventionelle Festigungsmethode. Die klassische Methode bildet die Festigung mit Kieselsäureester. Hierbei wird in den Porenräumen des Gesteins ein neues, rein mineralisches, auf Silizium basierendes Bindemittel in den Hohlräumen gebildet. Als Ergebnis dieser Behandlung kommt es in den entsprechenden Bereichen zu einer Festigung des Gefüges. Nach GROBE u.a. (2001) wird dabei die Festigkeit des ursprünglichen Gesteins zumeist überschritten. Es kommt häufig zu einer Schalenbildung im oberflächennahen Bereich, hinter der die Verwitterung fortschreiten kann.

Obwohl die Fortschritte in der Rezeptur der Kieselsäureester in den letzten Jahren markant sind, bilden die  $\text{SiO}_2$ -Gele einen Fremdkörper im Aflenzer Kalksandstein. Im Gegensatz hierzu steht die Kalkwasserfestigung, deren neu gebildete Bindemittelmatrix aus Kalziumkarbonat besteht und somit dem Gefüge des Aflenzer Kalksandsteines sehr nahe kommt.

Nach Ettl u.a. (2005) ist Kalkwasser eine klare, gesättigte Lösung von Kalziumhydroxid in Wasser. Es entsteht durch das Absetzenlassen von Kalkmilch. Diese wiederum wird beim Einsumpfvorgang von gelöschtem Kalk gebildet. Das Kalziumhydroxid setzt sich bereits nach wenigen Stunden ab und das darüber stehende Wasser löst mit der Zeit Kalziumhydroxid aus der Suspension, bis es gesättigt ist.

Die Löslichkeit von  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  beträgt 1,7g/Liter  $\text{H}_2\text{O}$  (KNOBLAUCH & SCHNEIDER, 1995).

Bei der Kalkwasserfestigung wird nun diese gesättigte Kalziumhydroxid- Lösung in das Gestein eingebracht, die mit dem  $\text{CO}_2$  der Luft zu Kalziumkarbonat ausreagiert und so das Gefüge festigt.

Die Festigung mit Kalkwasser ist nach KERNER (2005) eine relativ „sanfte“ Festigungsmethode und kann nur zur Festigung von Putzen oder Natursteinen mit geringer Schädigung, wie minimaler Gefügezerstörung oder Absanden verwendet werden. Große Risse oder Hohlstellen können mit Kalkwasser nicht überbrückt werden.

#### 1.4.1 Chemische Vorgänge bei der Kalkwasserfestigung

Ziel der Kalkwasserfestigung ist eine Konsolidation des Kalksandsteines. Dabei dringt die aufgebrauchte  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  -Lösung durch die Kapillaren des Gesteins in dessen Porenräume ein und bildet dort nach Gleichung 1 Kalziumkarbonat neu.

Die Beschreibung der chemischen Vorgänge basiert auf Ettl u.a. (2005)

*Gleichung 1:*



Bei dieser Reaktion liegt das Kalziumhydroxid in ionisierter Form vor. Siehe Gleichung 2.

*Gleichung 2:*

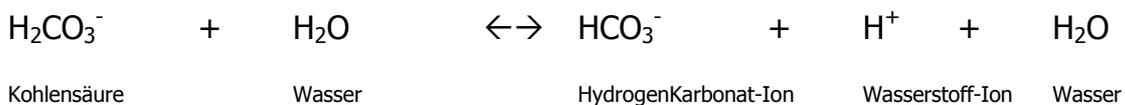


Außerdem muss das Kohlendioxid im Wasser gelöst (als Kohlensäure) vorliegen, damit eine Karbonatisierung, also eine Neubildung von  $\text{CaCO}_3$  stattfinden kann (siehe Gleichung 3). Die Dissoziation des Kohlendioxids im Wasser läuft in zwei Schritten in basischer Umgebung ab (siehe Gleichung 4 und Gleichung 5). Hierbei kommt es durch die Reaktion von  $\text{OH}^-$  und  $\text{H}^+$  zu  $\text{H}_2\text{O}$  zu einem Absinken des pH-Wertes.

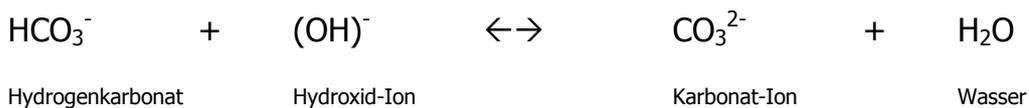
*Gleichung 3:*



*Gleichung 4:*



*Gleichung 5:*



Diese Dissoziationsstufen sind stark vom vorliegenden pH-Wert abhängig. Liegt der pH-Wert einer Lösung zwischen 6,4 und 10,3, so liegt hauptsächlich  $\text{HCO}_3^-$  vor, im Bereich darüber und darunter  $\text{CO}_3^{2-}$ . Abbildung 2 veranschaulicht diesen Umstand.

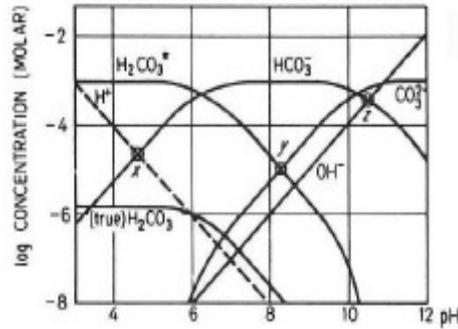


Abbildung 2: Gleichgewicht von  $\text{CO}_3^{2-}$  und  $\text{HCO}_3^-$  in Abhängigkeit vom pH-Wert  
STUMM & MORGAN, 1996

Als Endprodukt der Kalkwasserfestigung bilden sich Kalziumkarbonatkristalle, indem das Karbonat-Ion mit dem Kalzium-Ion eine feste Verbindung eingeht (siehe Gleichung 6).

Gleichung 6



## 1.5 Bakterielle Festigung – Biomineralisation

Die Konsolidierung durch Biomineralisation wurde bereits in mehreren Arbeiten behandelt. Sowohl bei RODRIGUEZ- NAVARRO u.a. (2002) als auch bei KERNER (2005) und ZEUGSWETTER (2008) wurden die Untersuchungen jedoch an Putzflächen und nicht wie in der vorliegenden Arbeit an Kalksandstein vorgenommen. Da die Erfolge der mittels biomineralisierenden Bakterien gefestigten Proben bei KERNER (2005) und ZEUGSWETTER (2008) positiv bewertet wurden, soll nun die Möglichkeit einer bakteriellen Festigung am Aflenzer Kalksandstein getestet werden.

Die Biomineralisation ist, im Gegensatz zum chemischen Prozess der Kalkwasserfestigung, ein Vorgang, bei dem als Folge der Lebenstätigkeit von

Organismen mineralische Produkte, Biominerale entstehen. Viele dieser Biominerale bestehen aus meist schwer löslichen Kalziumsalzen (Kalzit, Aragonit, Apatit).

Über den Prozess der Biomineralisierung werden unter anderem Schalen von Mollusken (Schnecken, Muscheln) und Skelette von Einzellern, beide Bestandteile des Kalksandsteins, aus Kalziumkarbonat aufgebaut.

Organisch ausgefällter Kalk besteht aus einer organischen Matrix und einem anorganischen Mineral. Das Verhältnis zwischen organischem und anorganischem Material kann dabei stark variieren. Mikroorganismen wandeln mittels ihrem Stoffwechsel gelöste Stoffe in ungelöste Stoffe um. Durch Ablagerung dieser Stoffwechselprodukte an organischem Material entstehen kissen- oder knollenförmige Kalkablagerungen.

Da das so gebildete kristalline Schutznetz des Bakteriums dem ursprünglichen Material des Gesteins entspricht, bietet sich diese Methode zur Festigung von Aflenzer Kalksandstein an.

Nach WEINER & DOVE (2003) wird der Prozess der Biomineralisation, abhängig vom Ausmaß der biologischen Kontrolle, in zwei unterschiedliche Gruppen eingeteilt.

- Biologisch induzierte Mineralisation
- Biologisch kontrollierte Mineralisation

Unter *biologisch induzierter Mineralisation* wird die sekundäre Fällung von Mineralen durch Interaktion zwischen Umwelt und biologischer Aktivität verstanden. Hierbei werden gelöste Stoffe durch die Stoffwechselfähigkeit von Mikroorganismen in ungelöste Substanzen übergeführt. Die Organismen haben jedoch selbst kaum einen Einfluss auf Art oder Beschaffenheit der gebildeten Minerale.

Ein Kennzeichen von Mineralen, die durch biologisch induzierte Mineralisation entstanden sind, ist nach WEINER & DOVE (2003) ihre Heterogenität. Diese Heterogenität charakterisiert auch anorganisch gefällte Mineralien.

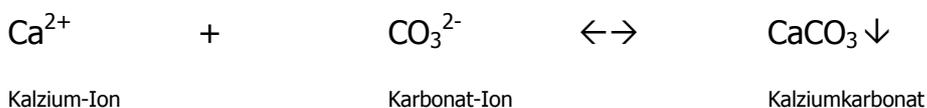
Bei der *biologisch kontrollierten Mineralisation* bedienen sich die Organismen zellulärer Aktivität um Keimbildung, Wachstum, Morphologie und die endgültige Position des gebildeten Minerals zu regeln.

### 1.5.1 Chemische Vorgänge bei der bakteriellen Biomineralisierung

Nach RODRIGUEZ-NAVARRO u. a, (2002) handelt es sich bei der bakteriell induzierten Kalziumkarbonatausfällung um einen komplexen Prozess, bei dem aerobe, heterotrophe Bakterien zur Ausfällung von Kalziumkarbonat einen direkten und einen indirekten Beitrag leisten.

Dabei lautet die maßgebende Gleichung zur Bildung von Kalziumkarbonat wie folgt:

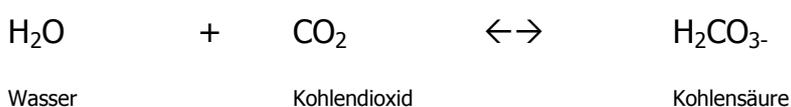
*Gleichung 7:*



Das in Gleichung 7 benötigte Kalzium muss, damit das Bakterium Stoffwechsel betreiben kann, in der Umgebung vorliegen.

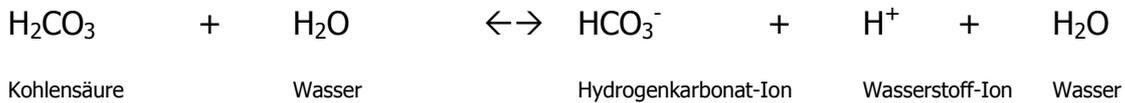
Das Karbonat-Ion aus Gleichung 7 entsteht durch Lösung von Kohlendioxid aus der Luft oder der Atmung des Bakteriums in Wasser. Die Löslichkeit von Kohlendioxid in Wasser ist vom Kalkgehalt (Kalk- Kohlensäure- Gleichgewicht) und dem pH-Wert des Wassers abhängig. Die Absorption von Kohlensäure in Wasser läuft nach folgender Gleichung ab:

*Gleichung 8:*



Die Kohlensäure dissoziiert, abhängig vom pH-Wert im Wasser, in zwei Stufen. Da die Kohlensäure eine sehr schwache Säure ist, gibt sie nach Gleichung 9 bei der Lösung in Wasser ein Proton ab.

*Gleichung 9:*



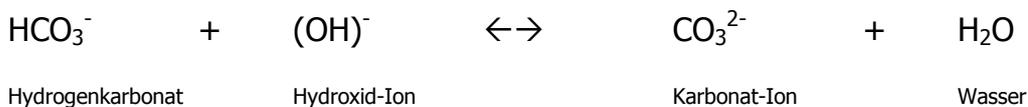
Zwischen einem pH-Wert von 6,4 und 10,6 liegt in der Lösung hauptsächlich  $\text{HCO}_3^-$  vor. Bei niedrigem pH-Wert ( $\text{pH} < 6,4$ ) dissoziiert das Hydrogenkarbonat-Ion nach folgender Gleichung weiter:

*Gleichung 10:*



Bei hohem pH-Wert ( $\text{pH} > 10,4$ ) wird das Karbonat-Ion gemäß Gleichung 11 gebildet.

*Gleichung 11:*



Liegt der pH-Wert also über 10,6 oder unter 6,4 wird also hauptsächlich  $\text{CO}_3^{2-}$  gebildet (Abbildung 2 veranschaulicht diesen Umstand).

Gleichung 10 und Gleichung 11 liefern das in Gleichung 7 benötigte Karbonat-Ion, mit dem es gemäß Gleichung 7 zu Kalziumkarbonat ausgefällt wird.

## **2.1 Angewandte Prüfmethode**

Beim Werkstoff Naturstein können, auch wenn bei zwei Proben der gleichen Gesteinsart auf den ersten Blick kaum Unterschiede bestehen, bei den technischen Eigenschaften unterschiedliche Werte auftreten. Untersuchungsergebnisse wie Rohdichte, Ultraschallgeschwindigkeit, Wasseraufnahmeverhalten und Wasserabgabeverhalten können somit nicht verallgemeinert werden. Jede Gesteinsprobe muss für sich untersucht, und die Ergebnisse vor und nach der Festigung der jeweiligen Probe verglichen werden.

Die Auswahl der Prüfmethode erfolgte mit der Überlegung, dass die Zerstörung an den Proben möglichst gering sein soll, um die Ergebnisse nicht zu verfälschen. Nur mittels einer möglichst zerstörungsfreien Methode ist die direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse vor und nach der Festigung gewährleistet.

Da ein direkter Vergleich der Biegezugfestigkeit an ein und demselben Probekörper vor und nach der Behandlung nicht möglich ist, wurde eine Reihe von unbehandelten Probekörpern als Referenzreihe zurückgestellt. So können bei der Biegezugfestigkeit die Ergebnisse der Referenzreihe mittels vergleichenden statistischen Mitteln mit den Werten der behandelten Probekörper in ein Verhältnis gesetzt werden.

Durch die Behandlung der Proben mit Kalkwasser, Bakterien und Kalkwasser sowie Bakterien und Wasser, soll neues Kalziumkarbonat in den Poren gebildet werden. Dadurch soll das Gefüge gestärkt, und das Absanden verringert werden. Um die Neubildung des Kalziumkarbonats nachzuweisen, wurden folgende Prüfmethode gewählt.

### **2.1.1 Rohdichtebestimmung**

Um überprüfen zu können, ob Luft in den Poren durch neu gebildetes Kalziumkarbonat ersetzt wurde, kommt das Verfahren der Rohdichtebestimmung

zur Anwendung. Bei einer erfolgreichen Festigung kommt es zu einer Verringerung des Porenanteils und somit sollte eine messbare Erhöhung der Rohdichte nachzuweisen sein.

Die Bestimmung der Rohdichte erfolgt nach ÖNORM EN 1936 (2007-02-01) unter Anwendung des Auftriebsverfahren ohne Umhüllung. Unter der Rohdichte  $\rho_{rh}$  wird die Trockenmasse der Raumeinheit eines Gesteines einschließlich vorhandener Gesteinhohlräume verstanden.

Abweichend von der Norm wurden die Proben nicht im Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt, sondern noch warm gewogen.

Die Rohdichte errechnet sich aus folgendem Zusammenhang:

$$r_b = m_d / (m_s - m_h) * \rho_{rh}$$

$m_d$  Trockenmasse des Probekörpers [g]

$m_s$  Masse des gesättigten Probekörpers [g]

$m_h$  Masse des in Wasser eingetauchten Probekörpers [g]

$\rho_{rh}$  Dichte des Wassers [kg/m<sup>3</sup>]

### **2.1.2 Massenbezogene Wasseraufnahme**

Dieses Verfahren kommt zur Anwendung, da eine Verringerung des Porenvolumens zu einer niedrigeren Wasseraufnahme führt und somit nach einer erfolgreichen Behandlung eine messbare Abnahme nachzuweisen sein sollte.

Die massenbezogene Wasseraufnahme bei atmosphärischem Druck  $A_b$  ergibt sich als die auf die Trockenmasse  $m_d$  bezogene Differenz der Feuchtmass  $m_s$  und der Trockenmasse  $m_d$ .

Die Bestimmung der massenbezogenen Wasseraufnahme erfolgt nach ÖNORM EN 13755 (2008-07-01).

Die Bestimmung der benötigten Trockenmasse  $m_d$ , erfolgt wie in 2.1.1 beschrieben.

Die massenbezogene Wasseraufnahme errechnet sich aus folgender Formel:

$$A_b = (m_s - m_d) / m_d * 100\%$$

$m_d$  Masse des getrockneten Probekörpers [g]

$m_s$  Masse des gesättigten Probekörpers [g]

### **2.1.3 Wasseraufnahmeverhalten**

Mit Hilfe dieser Methode lässt sich eine Neubildung von Calciumkarbonat insofern nachweisen, als eine Abnahme des Porendurchmesser zu einer erhöhten Kapillarwirkung führt, und somit eine messbare Beschleunigung der Wasseraufnahme zu erwarten wäre. Auch eine Verzögerung der Wasseraufnahme wäre denkbar, da in der Literatur hydrophobe Eigenschaften der behandelten Prüfkörper erwähnt werden (z.B. ZEUGSWETTER 2008 ).

Die Bestimmung des Wasseraufnahmeverhaltens erfolgte wie die Bestimmung der massenbezogenen Wasseraufnahme. Die Proben wurden jedoch in vorher festgelegten Zeitintervallen aus dem Wasser genommen, das Haftwasser mit einem Tuch abgetupft, gewogen und wieder in das Wasser eingestellt. Dadurch lässt sich nicht nur feststellen wie viel Feuchtigkeit das Material aufnehmen kann, sondern auch mit welcher Geschwindigkeit.

Die Veränderung des Wasseraufnahmeverhaltens kann Aufschluss über eine Veränderung der Porenstruktur geben.

### **2.1.4 Wasserabgabeverhalten**

Ähnlich dem Wasseraufnahmeverhalten soll das Wasserabgabeverhalten darstellen, wie lange das Material Wasser speichern kann, bzw. wie lange es dauert, bis es ausgetrocknet ist.

Hierfür wurden die Proben aus dem Wasserbad genommen, das Haftwasser mit einem Tuch abgetupft und gewogen, danach auf einen Rost gestellt, sodass die Proben von allen Seiten austrocknen konnten. Wie auch bei den Wasseraufnahmeversuchen wurden die Probekörper in vorher festgelegten Intervallen gewogen.

Die Änderung des Wasserabgabeverhaltens kann Aufschluss über eine Veränderung der Gefügestruktur geben.

### **2.1.5 Ultraschallmessungen**

Durch Ultraschallmessungen kann zerstörungsfrei eine Veränderung des Gefüges nachgewiesen werden. Für diese Diplomarbeit wurde das sogenannte Laufzeitverfahren, bei dem Laufzeit und damit Fortpflanzungsgeschwindigkeit die relevanten Größen sind, angewandt.

Die Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit erfolgte nach ÖNORM EN 14579:2004.

Die errechnete Durchgangsgeschwindigkeit ist nach FLEISCHER (2002) bei inhomogenen Stoffen wie Naturstein abhängig von verschiedensten Gefügeeigenschaften wie Korngrößenverteilung, Porosität, Rohdichte und Wassergehalt.

Da auch die Feuchtigkeit im Messobjekt die Messergebnisse beeinflussen, wurden die Proben vor dem Messen mit dem Ultraschallgerät bei 70°C bis zur Massenkonstanz getrocknet.

Die Temperatur hingegen hat bei porösen Materialien einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Ultraschallgeschwindigkeit.

Die Geschwindigkeit der Schallausbreitung lässt sich wie folgt ermitteln:

$$V = L/T \quad [\text{km/s}]$$

V      Schallgeschwindigkeit [km/s]

L      Wegstrecke (Distanz der Messköpfe) [mm]

T      Zeit, die der Impuls benötigt, um die Strecke zurückzulegen [ $\mu\text{s}$ ]

Für die Untersuchung wurden auf den Probekörpern 7 Messstellen in insgesamt 3 verschiedene Richtungen markiert. Die jeweilige Messdistanz wurde mit einem Messschieber auf 0,1mm genau bestimmt. Bei der Messung werden vom Sender des Gerätes (Ultrasonic Tester Fa. Labek) kontinuierlich Ultraschallwellen mit einer Frequenz von 40kHz ausgesandt, die am Empfänger registriert werden. Mittels einer Presse kann ein gleichmäßiger Anpressdruck von 7MPa und damit eine bessere Vergleichbarkeit gewährleistet werden.

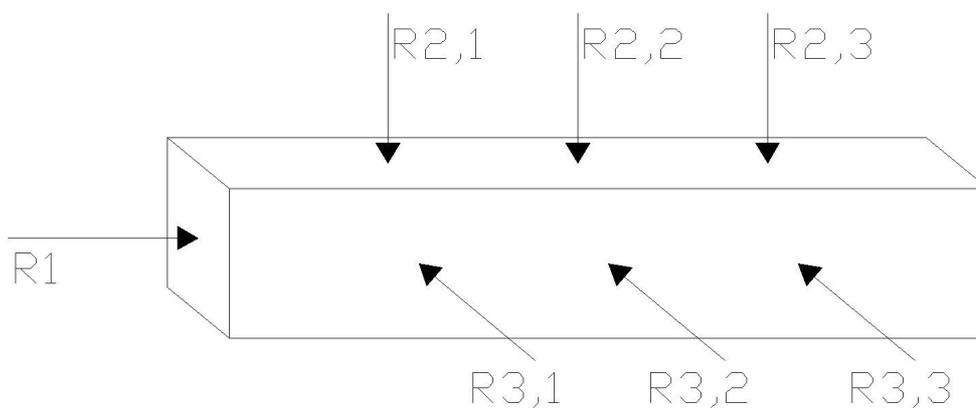


Abbildung 3: Darstellung der Messpunkte an einem Prismatischen Probekörper

### 2.1.6 Biegezugfestigkeit

Mit Hilfe dieser Methode lässt sich eine Neubildung von Kalziumkarbonat insofern nachweisen, als behandelte Probekörper im Vergleich zu den Referenzproben einen statistisch erhöhten Wert aufweisen müssten. Der Nachteil dieser Methode liegt jedoch darin, dass ein Vergleich eben nur mit statistischen Mitteln gezogen werden kann.

Die Bestimmung der Biegezugfestigkeit erfolgt nach ÖNORM EN 12372 (2007-02-01).

Unter Biegezugfestigkeit wird der Quotient aus maximalem Biegemoment bei der Bruchlast und dem Widerstandsmoment verstanden.

Für diese Arbeit wurde die Bestimmung des maximalen Biegemomentes unter Mittenlast gewählt.

Für die Bestimmung der Biegezugfestigkeit wurden die Proben im Trockenschrank, von der Norm abweichend bei einer Temperatur von 60°C bis zur Massenkonzanz getrocknet, und danach auf Raumtemperatur abgekühlt.

Die Abmessungen der Proben entsprachen hierbei nicht den Vorgaben der ÖNORM. Die prismatischen Proben hatten eine Abmessung von ca. 40 x 40 x 200 mm.

Die Stützweite beträgt somit gemäß ÖNORM  $3,5 h = 3,5 \times 40 = 140$  mm.

Zur Ermittlung der Bruchlast wurden die Prüfkörper auf zwei Auflagerrollen gelagert. Die Belastung erfolgte über eine Biegerolle in der Mitte zwischen den beiden Auflagerrollen. Über eine computergesteuerte Spindelpresse wurde eine Belastung mit einer Geschwindigkeit von 10 N/s aufgebracht.

Die Biegezugfestigkeit  $R_{tf}$  errechnet sich aus:

$$R_{tf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad [\text{N/mm}^2]$$

F	Bruchlast [N]
l	Abstand zwischen den Biegeauflagern [mm]
b	Breite des Probekörpers an der Bruchfläche [mm]
h	Höhe des Prüfkörpers [mm]

### 2.1.7 Keimzahlbestimmung

Für diese Methode wird mit dem Stemmeisen etwa 1g von jedem Probekörper abgeschlagen und im Mörser auf Sandkorngröße zerrieben. 1g des so gewonnenen Steinmehls wird nun in einem Kolben mit 10ml einer sterilen, 0,001%-igen Tween80- Lösung (in 0,9% NaCl) vermischt, und eine Stunde auf dem Schüttelinkubator ausgeschüttelt. Tween ist ein Detergenz, das die Oberflächenspannung herabsetzt und zum Ablösen der Zellen vom Substratum (Steinoberfläche) dient. In weiterer Folge werden 2 weitere Verdünnungsstufen dieser Lösung im Verhältnis 1:10 hergestellt. Je Verdünnungsstufe wird eine

Platte- PCA (Plate Count Agar, Caseinpepton-Glucose-Hefeextrakt-Agar)- beimpft und über Nacht bei 28°C gelagert. Am darauffolgenden Tag werden die Platten durch Zählen der Kolonien ausgewertet.

### **2.1.8 PAS- Färbung**

Bei der PAS- Färbung (Perjodsäure Schiff Reaktion) wird der durch manche Bakterien erzeugte Schleimfilm mit einem magentafarbenen Farbstoff gefärbt und somit die Bakterienaktivität nachgewiesen.

Hierfür werden mit dem Stemmeisen etwa 1cm<sup>3</sup> große Bruchstücke von den Probekörpern abgeschlagen. Dabei wird darauf geachtet, dass das Probestück nicht nur oberflächennahe sondern auch tieferliegende Bereiche beinhaltet.

Die Probekörper werden in je einem Rollglas mindestens 30 Minuten in 70% Ethanol angefeuchtet und bei 4°C gelagert. Anschließend werden sie etwa 5 bis 8 Minuten in 0,75% Perjodsäurelösung ,und dann ca. 5 Minuten in 70% Ethanol geschüttelt. Danach werden sie weitere 5 Minuten unter fließendem Leitungswasser gespült. Nach dem gründlichen Entfernen des Wassers folgt die Färbung, indem die Proben ca. 30 Sekunden mit Schiff's Reagenz behandelt werden. Das Reagenz wird danach wieder gründlich ausgeleert. Als nächster Schritt werden die Bruchstücke zwei mal etwa 3 Minuten lang in 0,6%-iger Natriumsulfidlösung geschüttelt und abschließend dann noch etwa 10 Minuten lang unter fließendem Wasser gespült. Die Lagerung der Proben bis zu ihrer Auswertung erfolgt in 70% Ethanol bei 4°C.

Das Resultat der PAS Färbung wird dann unter dem Mikroskop betrachtet und fotografiert.

### 3.1 Probenauswahl

Die Untersuchungen wurden an Probekörpern aus Aflenzer Kalksandstein unter Laborbedingungen durchgeführt.

Für die Versuche standen insgesamt 54 prismatische und 12 zylindrische Probekörper zur Verfügung. Die Basis der prismatischen Probekörper war ca. 4 x 4 cm und einer Höhe von ca. 20cm. Die Zylinder hatten eine kreisförmige Basis mit ca. 5cm Durchmesser und ebenfalls einer Höhe von ca. 20cm.

Da Naturstein ein sehr inhomogener Baustoff ist, wurde eine erste Reihe von Voruntersuchungen durchgeführt, um möglichst gleichartig homogene Prüfkörperserien zu gewährleisten. Diese Voruntersuchungen bestanden aus der Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit, der Rohdichte und der Wasseraufnahme, sowie dem visuellen Befund. Nach der Auswertung wurden die Probekörper mit der größten Abweichung von den jeweiligen Mittelwerten (vgl. Tabelle 2 und Tabelle 3, rote Markierungen) ausgeschieden.

Probe Nr.	$v_m$ [km/s]	w [%]	Probe Nr.	$v_m$ [km/s]	w [%]
1	2,97	11,37	28	2,82	12,48
2	2,74	14,09	29	3,58	8,35
3	2,89	13,86	30	3,2	8,47
4	3,53	8,63	31	3,64	5,86
5	3,02	12,78	32	2,67	14,11
6	2,91	12,95	33	2,77	11,49
7	3	12,53	34	2,96	12,07
8	2,79	13,56	35	3,04	11,64
9	4,23	4,03	36	2,71	14,01
10	3	11,94	37	2,87	12,88
11	2,96	12,05	38	3,04	10,99
12	2,76	13,63	39	2,89	13
13	2,81	13,58	40	2,92	12,78
14	2,84	12,79	41	2,78	13,86
15	2,69	13,19	42	3,19	9,94

16	2,97	12,73	43	2,79	12,96
17	2,93	13,13	44	3,45	7,01
18	3,08	11,85	45	3,31	9,55
19	2,97	12,19	46	2,77	14,24
20	3,09	11,68	47	3,63	6,05
21	2,53	14,36	48	2,79	13,57
22	2,92	12,69	49	2,86	12,87
23	2,81	13,69	50	2,76	14,43
24	2,85	13,69	51	2,98	11,72
25	2,92	13,44	52	2,59	15,11
26	2,97	11,97	53	4,16	5,52
27	2,9	12,53	54	2,86	13,2
		<b>v<sub>m</sub> [km/s]</b>	<b>w [%]</b>		
<b>Mittelwert</b>		3	11,91		
<b>Standardabweichung</b>		0,38	2,47		

Tabelle 2: Ergebnisse der 1. Voruntersuchungen für eine Probenauswahl der Prismatischen Proben

Probe Nummer 42 wurde ihrer Inhomogenität wegen ausgeschieden. Nach dem Ausscheiden der Proben Nr. 4, 9, 29, 30, 31, 42, 44, 45, 47 und 53 blieben für den weiteren Verlauf 44 Proben über. Von diesen 44 Prismen wurden 11 Stück als Referenzproben für die Biegezugfestigkeitsversuche zurückgelegt.

Für die zylindrischen Probekörper lauteten die Ergebnisse wie folgt:

Probe Nr.	v <sub>m</sub> [km/s]	w [%]
1A	2,46	14,38
2A	2,39	15,25
3A	2,64	14,57
4A	2,67	13,97
5A	2,40	15,40
6A	2,56	14,33
7A	2,43	14,47
8A	2,44	14,58
9A	2,52	14,60
10A	2,41	14,81
11A	2,48	14,78
12A	2,45	15,06

	$v_m$ [km/s]	w [%]
Mittelwert	2,49	14,68
Standardabweichung	0,11	0,39

*Tabelle 3: Ergebnisse der Voruntersuchungen für die zylindrischen Proben*

Wegen der geringen Anzahl wurden hier keine Probekörper ausgeschieden. Obwohl mit den zylindrischen Probekörpern keine Biegezugfestigkeitsversuche durchgeführt werden sollten, wurden zur Sicherheit 3 Probekörper als Referenzproben zurückgestellt.

### **3.2 Vorbehandlung der Proben und Auswirkungen**

Nach der Durchführung einer Versuchsreihe, Ultraschallmessung und Wasseraufnahme, an den prismatischen Probekörpern trat folgendes Problem auf. Nach einer Messung der Trockenmasse und der damit verbundenen, folgenden Untersuchung des Wasseraufnahmeverhaltens an einem Probekörper, wurde eine niedrigere Trockenmasse, sowie eine erhöhte Wasseraufnahme als bei der vorangegangenen Bestimmung der Wasseraufnahme festgestellt.

Als Ursache für die Veränderung der Untersuchungsergebnisse wurde das beim Schneiden der Probekörper entstandene Steinmehl, das die Poren der Probekörper verstopfen würde, herangezogen. Um ein Herauslösen dieses Steinmehls, was die Untersuchungsergebnisse während der weiteren Behandlung der Proben beeinflussen hätte können, auszuschließen, wurden die Probekörper im Ultraschallbad gereinigt. Hierfür wurden die wassersatten Proben für 1 Minute im Ultraschallbad belassen.

Da es nach der durchgeführten Reinigung zu einer Abnahme der Ultraschallgeschwindigkeit bei allen Prismen um im Mittel 0,17km/s, und einer Zunahme der Wasseraufnahmefähigkeit von im Durchschnitt 12,95% auf 14,02% kam, wurden alle bisher durchgeführten Voruntersuchungen erneut durchgeführt.

Für die Zylinder wurde die Reinigung mit Ultraschall bereits vor den Untersuchungen durchgeführt. Hier gab es daher nur eine Reihe von Voruntersuchungen.

Als Frage bleibt anzumerken, ob die Veränderung der Ultraschallgeschwindigkeit und der Wasseraufnahmefähigkeit auf eine zerstörende Wirkung des Ultraschalls zurückzuführen sind, oder darauf, dass die nach einer Reinigung nun offenen Poren eben einfach andere Werte bewirken.

Diese Problematik muss aber, da sie über den Umfang dieser Diplomarbeit hinausgeht, an dieser Stelle unbeantwortet im Raum stehen bleiben.

### 3.3 Rohdichtebestimmung

Die Rohdichte der prismatischen Probekörper lag in der Versuchsreihe zwischen 1,67 und 1,78 g/cm<sup>3</sup>. Die Schwankungsbreite liegt somit bei 0,11 g/cm<sup>3</sup>. Der Mittelwert lag hier bei 1,72 g/cm<sup>3</sup>, die Standardabweichung bei 0,03 g/cm<sup>3</sup>.

Die Rohdichte der zylindrischen Probekörper lag in der Versuchsreihe zwischen 1,70 und 1,77 g/cm<sup>3</sup>. Die Schwankungsbreite liegt somit bei 0,07 g/cm<sup>3</sup>. Der Mittelwert lag hierbei bei 1,74 g/cm<sup>3</sup>, die Standardabweichung bei 0,02 g/cm<sup>3</sup>.

PRISMEN				ZYLINDER	
Probe Nr.	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Probe Nr.	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Probe Nr.	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
1	1,70	14	1,68	27	1,72
2	1,75	15	1,73	28	1,68
3	1,73	16	1,73	32	1,67
5	1,78	17	1,72	33	1,67
6	1,75	18	1,72	34	1,71
7	1,70	19	1,71	35	1,68
8	1,70	20	1,73	36	1,74
10	1,72	21	1,67	37	1,76
11	1,72	22	1,75	38	1,71
12	1,69	23	1,72	39	1,69
13	1,73	24	1,69	40	1,71
				25	1,75
				26	1,77
				41	1,69
				43	1,73
				46	1,71
				48	1,71
				49	1,69
				50	1,71
				51	1,69
				52	1,69
				54	1,73
				1A	1,76
				2A	1,70
				3A	1,76
				5A	1,72
				6A	1,75
				7A	1,72
				10A	1,74
				11A	1,72
				12A	1,72

Tabelle 4: Rohdichte [g/cm<sup>3</sup>]

### 3.4 Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahme der prismatischen Probekörper lag in der Versuchsreihe zwischen 12,11 und 15,82 %. Die Schwankungsbreite liegt somit bei 3,71%. Der Mittelwert lag hierbei bei 14,00 %, die Standardabweichung bei 0,92 %.

Die Wasseraufnahme der zylindrischen Probekörper lag in der Versuchsreihe zwischen 14,33 und 15,40 %. Die Schwankungsbreite liegt somit bei 1,07 %. Der Mittelwert lag hierbei bei 14,86 %, die Standardabweichung bei 0,40 %.

PRISMEN								ZYLINDER	
Probe Nr.	w [%]								
1	12,25	14	14,17	27	13,82	25	14,43	1A	14,44
2	15,26	15	14,29	28	13,93	26	13,09	2A	15,25
3	14,78	16	13,91	32	15,10	41	14,55	3A	14,57
5	13,77	17	13,88	33	13,68	43	13,79	5A	15,68
6	14,00	18	12,74	34	13,51	46	14,68	6A	14,46
7	13,61	19	12,86	35	13,40	48	14,26	7A	14,60
8	14,95	20	12,26	36	14,91	49	14,10	10A	14,81
10	13,07	21	15,82	37	13,61	50	15,26	11A	14,79
11	13,29	22	13,81	38	12,11	51	12,15	12A	15,15
12	14,52	23	14,56	39	14,65	52	15,48		
13	14,58	24	15,76	40	13,71	54	13,55		

*Tabelle 5: massenbezogene Wasseraufnahme [%]*

### 3.5 Wasseraufnahmeverhalten

In Diagramm 1 lässt sich die Wasseraufnahme der Proben (in Massenprozent) in Abhängigkeit der Zeit ablesen. Es zeigt sich eine rasche Wasseraufnahme in den ersten Minuten, wobei nach etwas 7 Minuten eine Sättigung der Proben eintritt, was durch die nahezu gleichbleibenden Messwerte im späteren Verlauf zu erkennen ist.

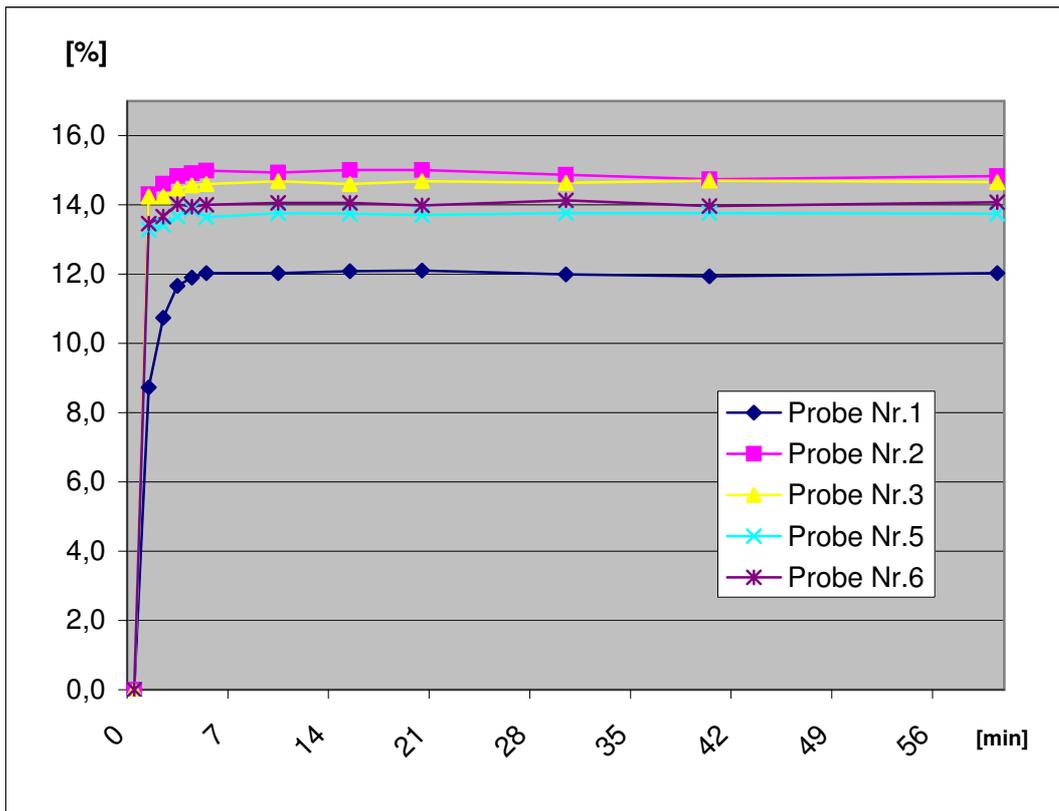


Diagramm 1: Wasseraufnahmeverhalten der Proben 1, 2, 3, 4, 5 und 6 in Massenprozent

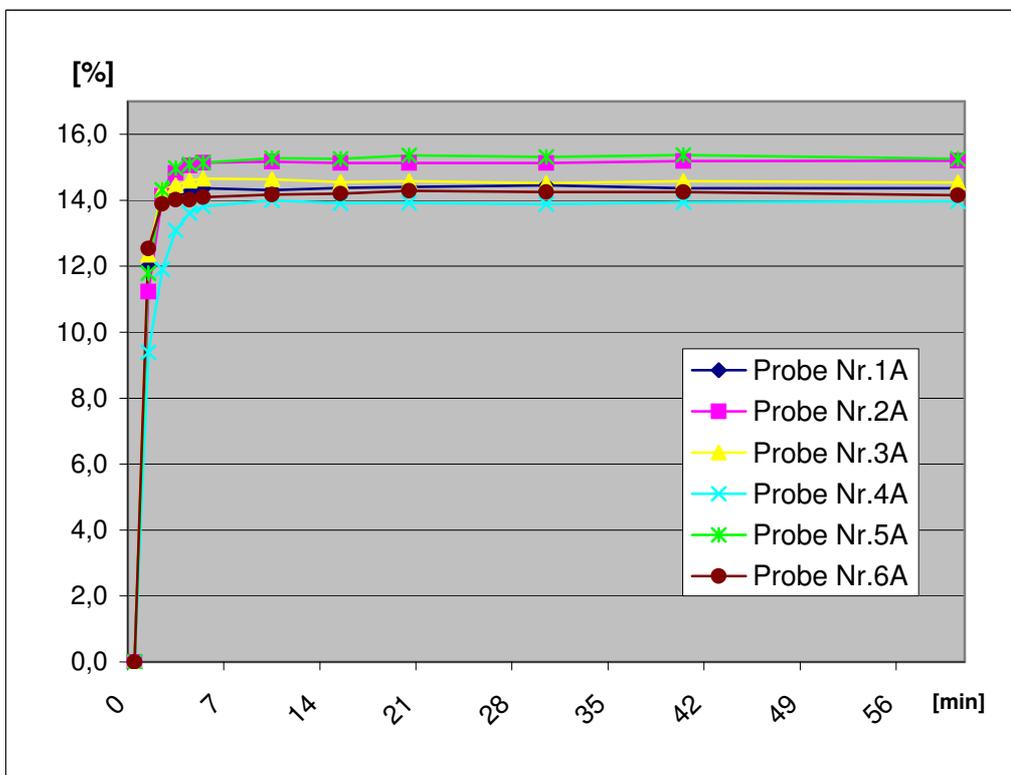


Diagramm 2: Wasseraufnahmeverhalten der Proben 1A, 2A, 3A, 4A, 5A und 6A

### 3.6 Wasserabgabeverhalten

In Diagramm 3 ist die Wasserabgabe der Proben (in Massenprozent) in Abhängigkeit der Zeit aufgetragen. Als Startwerte der Proben werden die letzten Messwerte des Wasseraufnahmeverhaltensversuchs herangezogen. Hierzu muss bemerkt werden, dass die Probekörper nach Abschluss dieser vorangegangenen Untersuchung noch etwa 4 Monate im Wasser gelagert wurden. Im Zuge dieser Lagerung hat sich der Wert der Wasseraufnahme im Schnitt nochmals um 2,27% erhöht, weshalb die Anfangswerte für die Wasserabgabeverhaltensversuche nicht mit den letzten gemessenen Werten der Wasseraufnahmeverhaltensversuche übereinstimmen.

Während innerhalb des ersten Tages die Wasserabgabe relativ rasch abnimmt, zeigt sich in den nächsten 3 Tagen eine immer geringer werdende Wasserabgabe. Nach einer Gesamtzeit von etwa 4 Tagen zeigt sich eine nahezu vollkommene Austrocknung der Proben.

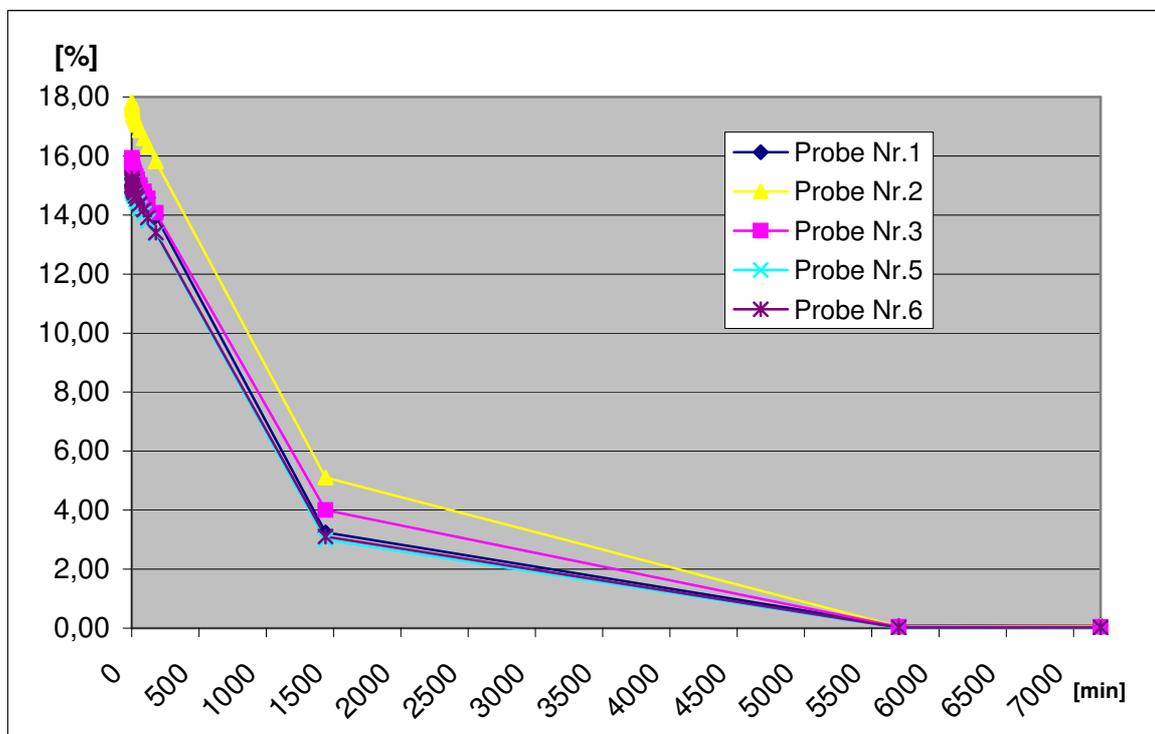


Diagramm 3: Wasserabnahmeverhalten der Probekörper 1, 2, 3, 4, 5 und 6 in Massenprozent

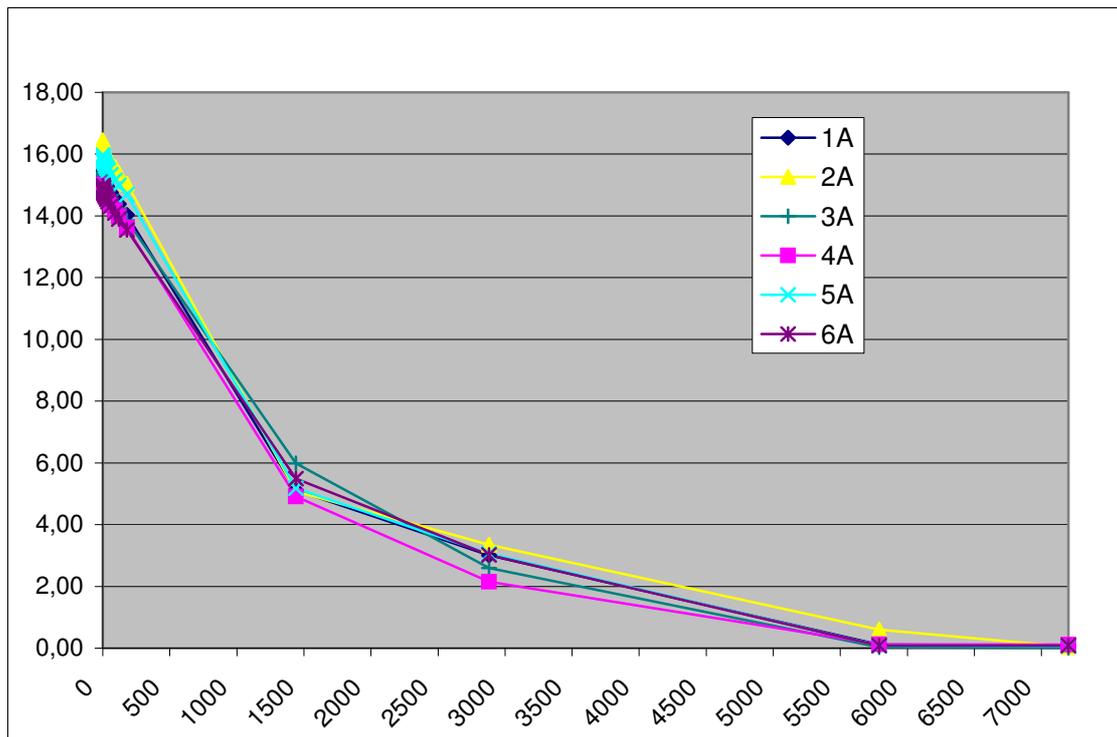


Diagramm 4: Wasserabnahmeverhalten der Probekörper 1A, 2A, 3A, 4A, 5A und 6A

### 3.7 Ultraschallmessungen

Die Ultraschallmessungen an den prismatischen Probekörpern ergaben in der Versuchsreihe zwischen 2,17 und 2,88 km/s. Die Schwankungsbreite liegt somit bei 0,72 km/s. Der Mittelwert lag hierbei bei 2,60 km/s, die Standardabweichung bei 0,14 km/s.

Die Ultraschallmessungen an den zylindrischen Probekörpern ergaben in der Versuchsreihe zwischen 2,16 km/s und 2,31 km/s. Die Schwankungsbreite liegt somit bei 0,15 km/s. Der Mittelwert lag hierbei bei 2,26 km/s, die Standardabweichung bei 0,10 km/s.

PRISMEN								ZYLINDER	
Probe Nr. v [km/s]									
1	2,81	14	2,58	27	2,56	25	2,62	1A	2,16
2	2,17	15	2,61	28	2,63	26	2,76	2A	2,23
3	2,54	16	2,58	32	2,43	41	2,48	3A	2,26
5	2,53	17	2,70	33	2,63	43	2,62	5A	2,21
6	2,50	18	2,79	34	2,65	46	2,37	6A	2,31
7	2,67	19	2,74	35	2,67	48	2,56	7A	2,21
8	2,50	20	2,84	36	2,45	49	2,61	10A	2,18
10	2,80	21	2,41	37	2,73	50	2,46	11A	2,28
11	2,74	22	2,61	38	2,77	51	2,88	12A	2,27
12	2,57	23	2,51	39	2,49	52	2,49		
13	2,51	24	2,45	40	2,57	54	2,78		

Tabelle 6: Ultraschallgeschwindigkeit [km/s] gemessen über die größte Distanz

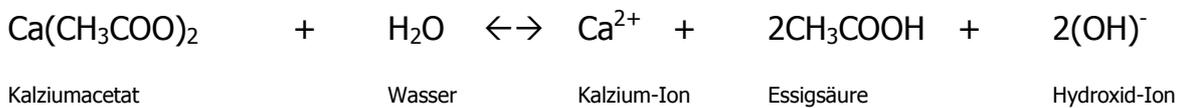
### 3.8 Allgemeine Grundlagen zu *Bacillus cereus*

Für diese Arbeit wurde das Bakterium *Bacillus cereus* verwendet, ein fakultativ anaerobes Bakterium. Das heißt, dass es sowohl in An- wie auch in Abwesenheit von Sauerstoff Stoffwechsel betreiben kann. Dieser Bakterienstamm zählt, mit einer Konzentration mit bis zu einer Million Individuen pro Gramm, zu den häufigsten, kultivierbaren Bodenbakterien. (BECKER, 2005). Es kommt auch in Getreide und Reis vor, und kann in verdorbenen Lebensmitteln Toxine bilden, die zu Übelkeit, Erbrechen, Bauchkrämpfen und Durchfall führen. Unter ungünstigen Umweltbedingungen kann *Bacillus cereus* sehr widerstandsfähige Dauersporen, sogenannte Endosporen bilden. Diese Sporen weisen eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber Hitze, Austrocknung, Strahlung und extreme pH-Werte auf und bleiben über Jahre bis Jahrzehnte hinweg lebensfähig. Zur Biomineralisation im Bereich der Baudenkmalpflege wurde dieses Bakterium schon wiederholt untersucht. (CASTANIER et al., 2000; LE MÉTAYER-LEVREL et al., 1999; ORIAL et al., 1993).

Da dem *Bacillus cereus* für seine Stoffwechsellätigkeit Kalzium in seiner Umgebung vorliegen muss, wurde es als Teil der Nährlösung in Form von

Kalziumacetat zugeführt. Kalziumacetat dissoziiert in Wasser nach folgender Gleichung (BROCK, 1991):

*Gleichung 12:*



### **3.9 Verwendete Applikationslösungen und Applikationstechnik**

Als Grundstoffe wurden Kalkwasser und *Bacillus cereus* herangezogen.

Um die Wirkung dieser Bestandteile zu untersuchen, wurden folgende Kombinationen gewählt. Zum einen sollte die Wirkung von Kalkwasser alleine, und zum anderen die des Bakteriums untersucht werden. Um den Feuchtigkeitsbedarf sicherzustellen, wurde daher als zweites Medium die Kombination des Bakteriums mit Wasser gewählt. Eine weitere Fragestellung war, ob sich das Vorhandensein von Kalkwasser als zusätzlicher Kalziumlieferant positiv auf den Stoffhaushalt des Bakteriums auswirkt. Deshalb wurde als drittes Medium der *Bacillus cereus* in Kombination mit Kalkwasser hergestellt.

Um die Eindringung der verschiedenen Versuchsmedien zu gewährleisten, wurde für die Proben als Applikation das Tränken gewählt.

Dabei wurden jeweils 11 Prismen und 3 Zylinder mit Bakterien und Kalkwasser behandelt, 11 Prismen und 3 Zylinder mit Bakterien und Leitungswasser und 11 Prismen und 3 Zylinder mit Kalkwasser.

Tabelle 7 bis Tabelle 9 geben einen Überblick über die aufgebrachten Applikationslösungen auf die Probekörper.

<b>PRISMEN</b>			
<b>Probe Nr.</b>	<b>Aufgebrachte Applikationslösung</b>	<b>Probe Nr.</b>	<b>Aufgebrachte Applikationslösung</b>
1	Leitungswasser und <i>Bacillus cereus</i>	14	Kalkwasser und <i>Bacillus cereus</i>
2	Leitungswasser und <i>Bacillus cereus</i>	15	Kalkwasser und <i>Bacillus cereus</i>
3	Leitungswasser und <i>Bacillus cereus</i>	16	Kalkwasser und <i>Bacillus cereus</i>
5	Leitungswasser und <i>Bacillus cereus</i>	17	Kalkwasser und <i>Bacillus cereus</i>
6	Leitungswasser und <i>Bacillus cereus</i>	18	Kalkwasser und <i>Bacillus cereus</i>
7	Leitungswasser und <i>Bacillus cereus</i>	19	Kalkwasser und <i>Bacillus cereus</i>
8	Leitungswasser und <i>Bacillus cereus</i>	20	Kalkwasser und <i>Bacillus cereus</i>
10	Leitungswasser und <i>Bacillus cereus</i>	21	Kalkwasser und <i>Bacillus cereus</i>
11	Leitungswasser und <i>Bacillus cereus</i>	22	Kalkwasser und <i>Bacillus cereus</i>
12	Leitungswasser und <i>Bacillus cereus</i>	23	Kalkwasser und <i>Bacillus cereus</i>
13	Leitungswasser und <i>Bacillus cereus</i>	24	Kalkwasser und <i>Bacillus cereus</i>

*Tabelle 7:*

<b>PRISMEN</b>			
<b>Probe Nr.</b>	<b>Aufgebrachte Applikationslösung</b>	<b>Probe Nr.</b>	<b>Aufgebrachte Applikationslösung</b>
27	Kalkwasser	25	ohne
28	Kalkwasser	26	ohne
32	Kalkwasser	41	ohne
33	Kalkwasser	43	ohne
34	Kalkwasser	46	ohne
35	Kalkwasser	48	ohne
36	Kalkwasser	49	ohne
37	Kalkwasser	50	ohne
38	Kalkwasser	51	ohne
39	Kalkwasser	52	ohne
40	Kalkwasser	54	ohne

*Tabelle 8*

<b>ZYLINDER</b>	
Probe Nr.	Aufgebrachte Applikationslösung
1A	Kalkwasser und <i>Bacillus cereus</i>
2A	Kalkwasser und <i>Bacillus cereus</i>
3A	Kalkwasser und <i>Bacillus cereus</i>
5A	Leitungswasser und <i>Bacillus cereus</i>
6A	Leitungswasser und <i>Bacillus cereus</i>
7A	Leitungswasser und <i>Bacillus cereus</i>
10A	Kalkwasser
11A	Kalkwasser
12A	Kalkwasser

Tabelle 9

### 3.9.1 Herstellung der Bakterienkultur

Vor der Herstellung der Bakterienhauptkultur muss eine Vornährlösung hergestellt werden. Diese dient dazu, dem Bakterium von Beginn an best mögliche Wachstumsbedingungen zu schaffen. Die genaue Verfahrensweise bis zur Herstellung der Hauptkultur wurde der Diplomarbeit von Kerner (2005) und den Produktblättern von CALCITE 2000 entnommen.

Für die Anfertigung der Vornährlösung wurden 1% Bacto Casiton mit 0,1%  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  in einer Phosphatpufferlösung gelöst und durch Zugabe von HCl bzw. NaOH auf einen pH-Wert von 6,5 eingestellt. Anschließend wurde die so hergestellte Vornährlösung mit deionisiertem Wasser auf einen Liter aufgefüllt. Die hierbei verwendete 10mM Phosphatpufferlösung dient zur Stabilisierung des pH-Wertes. Für die Herstellung werden von  $K_2HPO_4$  und  $NaH_2PO_2 \cdot H_2O$  die Molgewichte bestimmt und anschließend für die Pufferlösung je 10mM der Stoffe in 500ml deionisiertem Wasser gelöst.

$K_2HPO_4$       10mM entsprechen 1,74 g

$NaH_2PO_2$       10mM entsprechen 1,38 g

Die so hergestellte Vornährlösung wurde, um alle noch in der Lösung vorhandenen Keime abzutöten, nun autoklaviert (121°C/15 min). Nach dem Abkühlen auf

Raumtemperatur wurde die sterile Lösung mit dem *Bacillus cereus* beimpft und 24h bei 28°C geschwenkt.

Für die Herstellung der Hauptnährlösung wurden 1% Bacto Casiton, sowie 1%  $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COOH})_2$  und 0,2%  $\text{K}_2\text{CO}_3$  in deionisiertem Wasser gelöst, auf 1 Liter aufgefüllt und der pH-Wert mit HCl und NaOH auf 8 eingestellt. Es folgte die Autoklavierung (121°C/15 min) der soeben hergestellten Hauptnährlösung in 2 Erlenmeyerkolben á 500ml. Nach dem Abkühlen der Lösung auf Raumtemperatur wurde der Inhalt jedes Kolbens mit je 1ml Vorkultur beimpft. Diese Hauptkultur wurde ebenfalls im Brutschrank bei 28°C für eine Dauer von 43h geschwenkt.

Nach dieser Zeit wurde an der Hauptkultur eine Bakterienzählung in der Thomakammer vorgenommen. Hierfür wurde die Hauptkultur im Verhältnis 1:4 verdünnt und durch zu Hilfenahme der Thomakammer unter dem Mikroskop ausgezählt. Dies geschah für jeden der beiden Kolben separat. Die Auszählung der Thomakammer ergab :

Kolben 1     ca.  $1,0 * 10^7$  Keime/ml Hauptkultur

Kolben 2     ca.  $1,2 * 10^7$  Keime/ml Hauptkultur

Für das Beimpfen der Probekörper mit der Hauptkultur wurden beide Kolben in einem zuvor 15 min bei 121°C autoklavierten Gefäß gemischt.

### **3.9.2 Applikation von Bakterien und Kalkwasser**

Das hierfür benötigte Kalkwasser wurde am 2.12.2005 hergestellt. Zu diesem Zeitpunkt lag der pH-Wert bei ca. 12. Fünf Tage später am 7.12.2005 wurden die hierfür ausgewählten Proben (A1 bis A3 und 14 bis 24) 5 Minuten in diesem Kalkwasser getränkt. Dabei lag der pH-Wert bei ca. 11.

Da es nach RODRIGUEZ-NAVARRO et al. (2003) bei einem zu hohen pH-Wert zu einer Keimzahlreduktion kommt, wurden die mit Kalkwasser getränkten Probekörper einige Tage lang liegen gelassen. Damit die Probekörper hierbei nicht austrocknen, wurden sie über den gesamten Versuchszeitraum in einer Kunststoffbox (Fa. Curver ) auf ein bis zwei Zentimeter feuchten Blähtonkugeln (Fa. Leka) gelagert. Nach der Lagerung sollte der pH-Wert für die Bakterien nun

bei etwa 8,5 liegen, um eine maximale bakteriell induzierte Karbonatbildung zu erreichen.

Am 9.12.2005 wurden die Proben, deren pH-Wert an der Oberfläche nun ca. 7 betrug, in der zuvor hergestellten Nährlösung samt Hauptkultur der Bakterien etwa eine Minute lang getränkt.

Vier Tage später am 13.12.2005 wurde, um ein gutes Bakterienwachstum zu gewährleisten, eine zuvor hergestellte Nährlösung mit einer handelsüblichen Sprühflasche möglichst gleichmäßig auf die Proben aufgebracht. Die Herstellung dieser Nährlösung entsprach der in 3.9.1 hergestellten Nährlösung für die Hauptkultur.

Am 19.12.2005 wurde erneut Kalkwasser ( $\sim$ pH9) gleichmäßig auf die Probekörper aufgebracht.

### **3.9.3 Applikation von Bakterien und Wasser**

Die hierfür vorgesehenen Probekörper (A5 bis A7, 1 bis 8 und 10 bis 13) wurden, da der *Bacillus cereus* für seine Stoffwechsellätigkeit auch Feuchtigkeit benötigt, zwei Tage vor der Beimpfung mit den Bakterien am 7.12.2005 fünf Minuten lang in reinem Leitungswasser getränkt.

Damit die Probekörper nicht austrocknen, wurden sie über den gesamten Versuchszeitraum in einer Kunststoffbox (Fa. Curver) auf ein bis zwei Zentimeter feuchten Blähtonkugeln (Fa. Leka) gelagert.

Am 9.12.2005 wurden die Proben, deren pH-Wert an der Oberfläche ca. 7 ist, in der zuvor hergestellten Nährlösung samt Hauptkultur der Bakterien (siehe 3.9.1) etwa eine Minute lang getränkt.

Vier Tage später am 13.12.2005 wurde, um ein gutes Bakterienwachstum zu gewährleisten, eine zuvor hergestellte Nährlösung mit einer handelsüblichen Sprühflasche möglichst gleichmäßig auf die Proben aufgebracht. Die Herstellung dieser Nährlösung entsprach der in 3.9.1 hergestellten Nährlösung für die Hauptkultur.

Am 19.12.2005 wurde mittels einer Sprühflasche erneut Leitungswasser gleichmäßig auf die Probekörper aufgebracht.

### **3.9.4 Applikation von Kalkwasser**

Für die Applikation des Kalkwassers auf die Probekörper wurde am 19.12.2005 Kalkwasser hergestellt. Am 20.12.2005 wurden dann die dafür vorgesehenen Proben (10A bis 12A, 27, 28 und 32 bis 40) in das Kalkwasser getaucht und dort für die nächste Zeit gelagert. Zu diesem Zeitpunkt lag der pH-Wert des Kalkwassers bei ca. 11.

Da am 27.12.2005 der pH-Wert nur noch bei 7 lag, wurde erneut Kalkwasser hergestellt. Dieses wurde am 29.12.2005 mit dem alten Kalkwasser vermengt, sodass das Gemisch beider einen pH-Wert von 10,5 hatte.

Nach etwa zweieinhalb Wochen Lagerung im Kalkwasser wurden die Probekörper am 16.01.2006 herausgenommen und langsam, in Alufolie gewickelt, zwei Wochen lang getrocknet. Danach wurden sie noch vom 30. 01.2006 bis zum 03.02.2006 bei 40°C im Trockenschrank getrocknet.

### **3.10 Lagerung der Proben**

Um das Austrocknen der Proben zu verhindern wurden, wie oben beschrieben, die mit Bakterien getränkten Proben in einer Kunststoffbox (Fa. Curver) gelagert. Am Boden dieser Box wurden außerdem etwa ein bis zwei Zentimeter feuchte Blähtonkugeln eingelegt.

Um eine für das Bakterienwachstum günstige Umgebungstemperatur zu gewährleisten, wurden beide Boxen bei konstanten 28°C gelagert.

Die Lagerung erfolgte dann über etwa 2 Jahre lang, da aus verschiedenen Gründen die Arbeit mehrmals unterbrochen und die Untersuchungen ausgesetzt werden mussten. Am 10.04.2008 wurden die Versuche wieder ungehindert fortgesetzt. Die Lagerung erfolgte bei relativ hoher Luftfeuchtigkeit, jedoch ohne Kontrolle derselben und ohne Zugabe von Nährlösung.

#### 4.1 Nachweis der Besiedelung der beimpften Proben mit Bakterien

Zum Nachweis der erfolgreichen Besiedelung der Proben durch das Bakterium *Bacillus cereus* nach einem Zeitraum von etwa zwei Jahren wurden zwei unterschiedliche Verfahren angewendet. Für einen direkten Nachweis des Bakteriums wurde die Methode der Tippplattenzählung gewählt. Um das Vorhandensein auf den Probekörpern auch indirekt überprüfen zu können wurde die Möglichkeit der PAS - Färbung eingesetzt.

##### 4.1.1 Keimzahlbestimmung

Durch die Bestimmung der Keimzahlen, konnte auch noch nach zwei Jahren eine Besiedelung mit Bakterien nachgewiesen werden.

Die Keimzahlbestimmung lieferte folgende Ergebnisse:

Probe Nr.	Kulturen	Probe Nr.	Kulturen
1	2,4E+04	14	1,3E+05
2	3,3E+04	15	9,6E+04
3	1,1E+05	16	2,6E+05
5	1,8E+05	17	9,3E+04
6	1,5E+05	18	1,4E+05
7	6,5E+05	19	1,4E+05
8	1,6E+05	21	1,1E+05
10	2,0E+05	22	2,6E+05
11	1,3E+05	23	2,1E+05
13	2,3E+05		
1A	4,5E+04	5A	1,4E+05
2A	1,6E+05	6A	2,6E+05
3A	1,2E+05	7A	4,1E+05

Tabelle 10: Ergebnisse der Tippplattenzählung nach der Behandlung der Probekörper

### 4.1.2 PAS Färbung

Auf den folgenden Abbildungen lässt sich mittels Färbung eine Eindringtiefe bis ca 5mm feststellen. Diese Färbung ist dabei jedoch meist nicht flächig, sondern eher punktuell ausgebildet. Des weiteren zeigt sich in den Abbildungen eine überwiegend deutlichere Färbung der mit Bakterien und Leitungswasser behandelten Proben, als bei den mit Bakterien und Kalkwasser behandelten.

Mit Bakterien und Kalkwasser behandelte Probekörper:

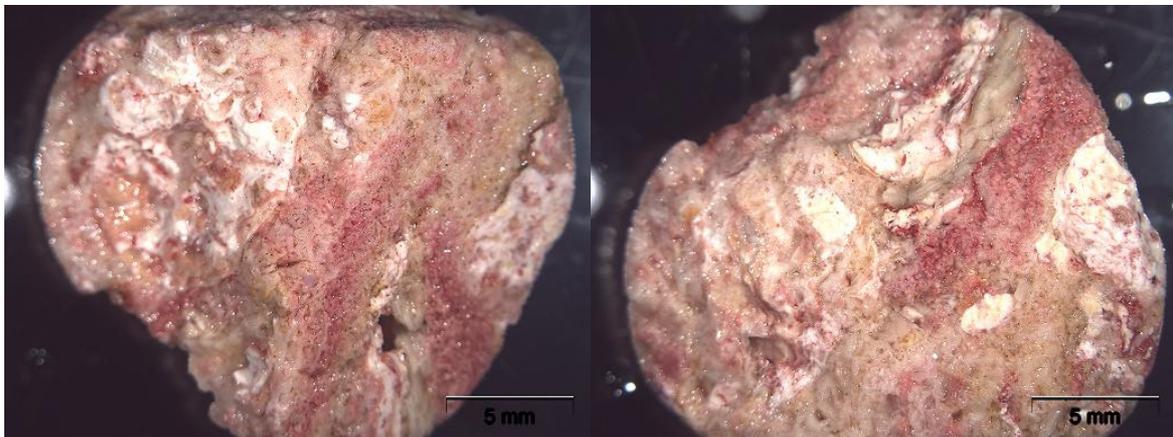


Abbildung 4: Probe A1 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) einen Tag nach der Behandlung mit Bakterien und Kalkwasser

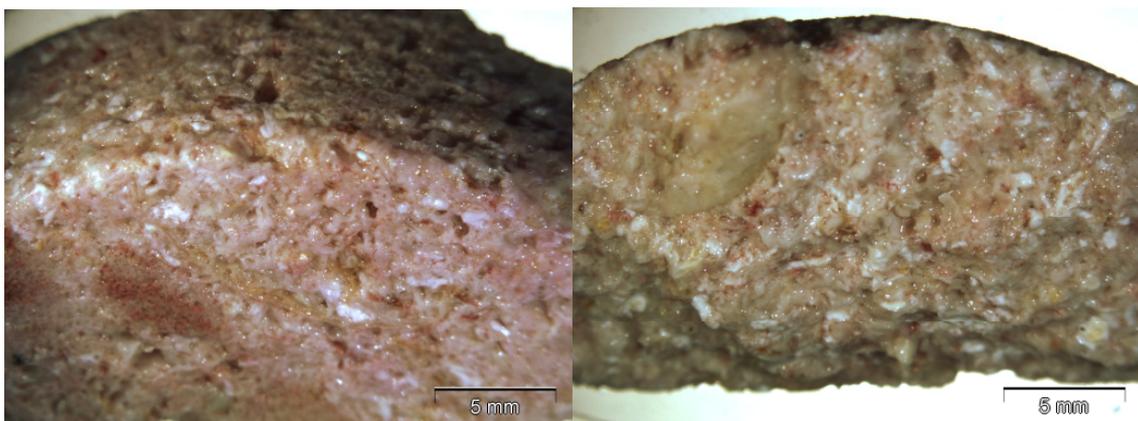
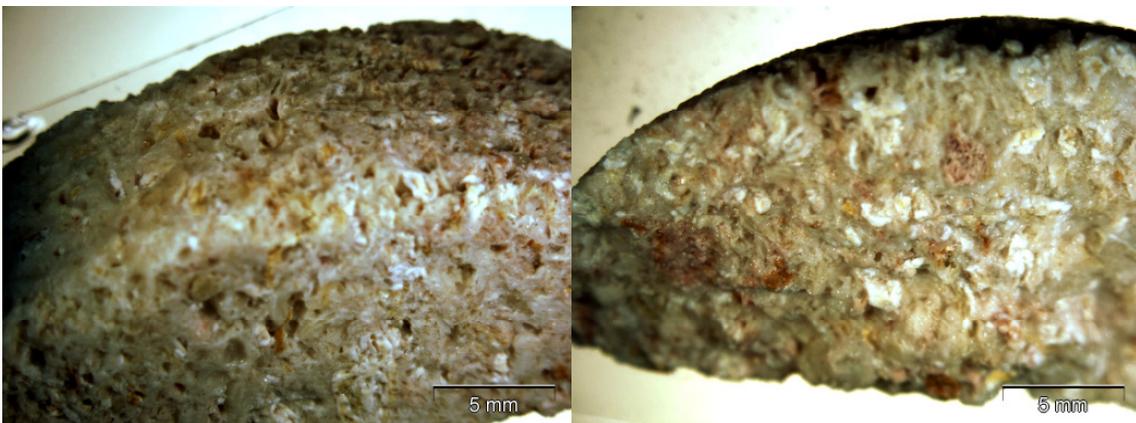


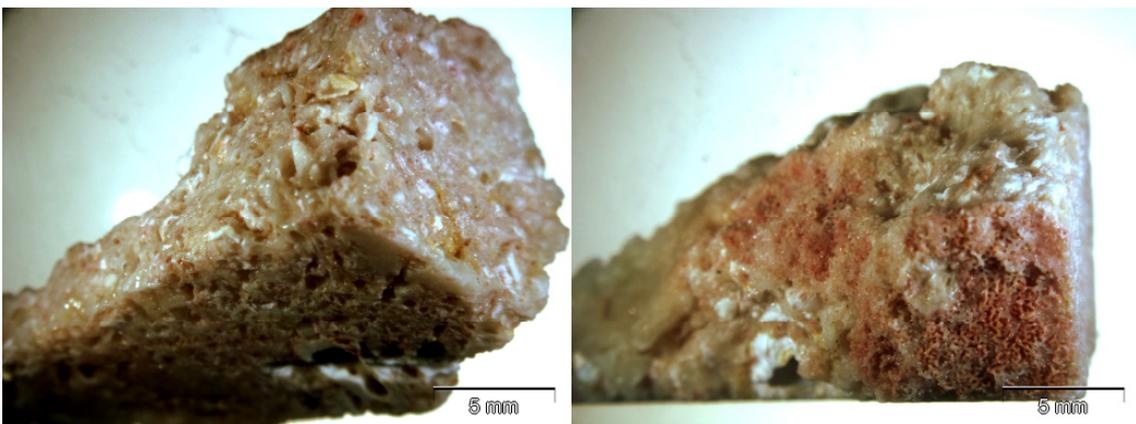
Abbildung 5: Probe A1 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren



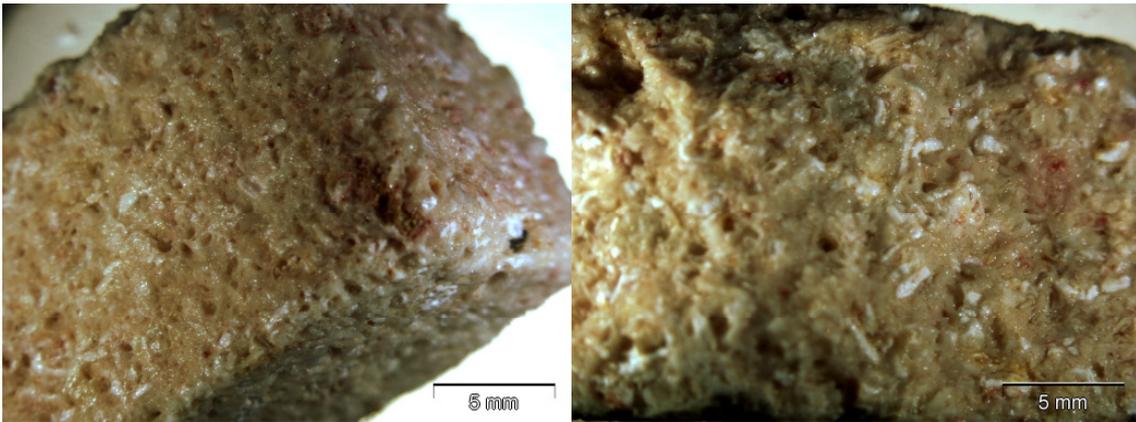
*Abbildung 6: Probe A2 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*



*Abbildung 7: Probe A3 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*



*Abbildung 8: Probe 14 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*



*Abbildung 9: Probe 15 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*



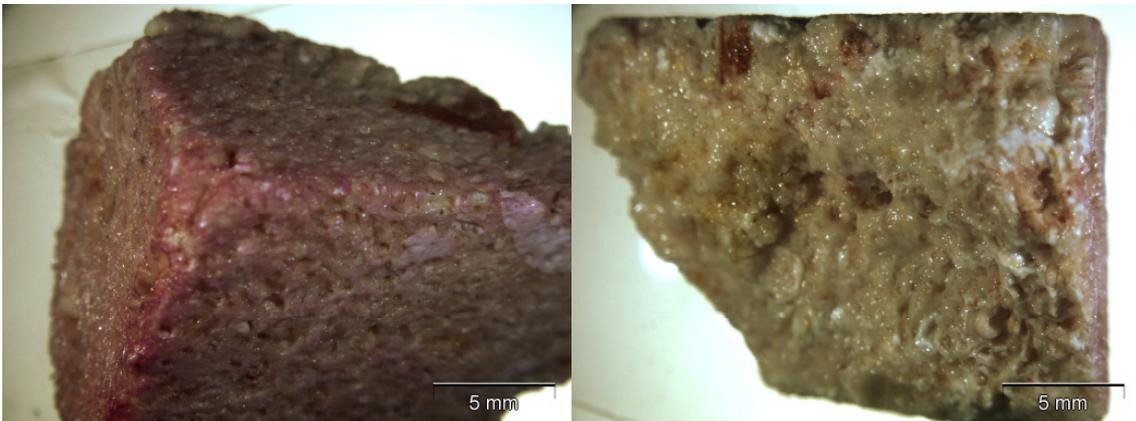
*Abbildung 10: Probe 16 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*



*Abbildung 11: Probe 17 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*



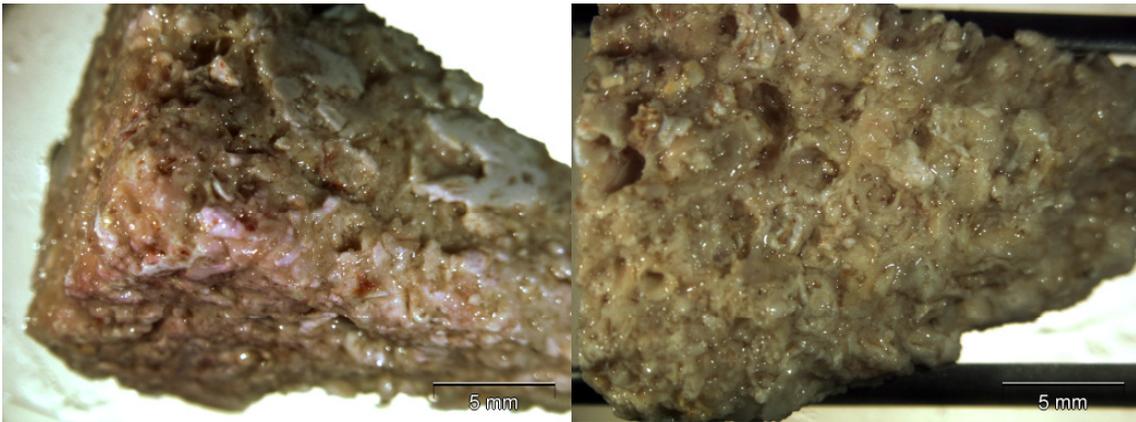
*Abbildung 12: Probe 18 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*



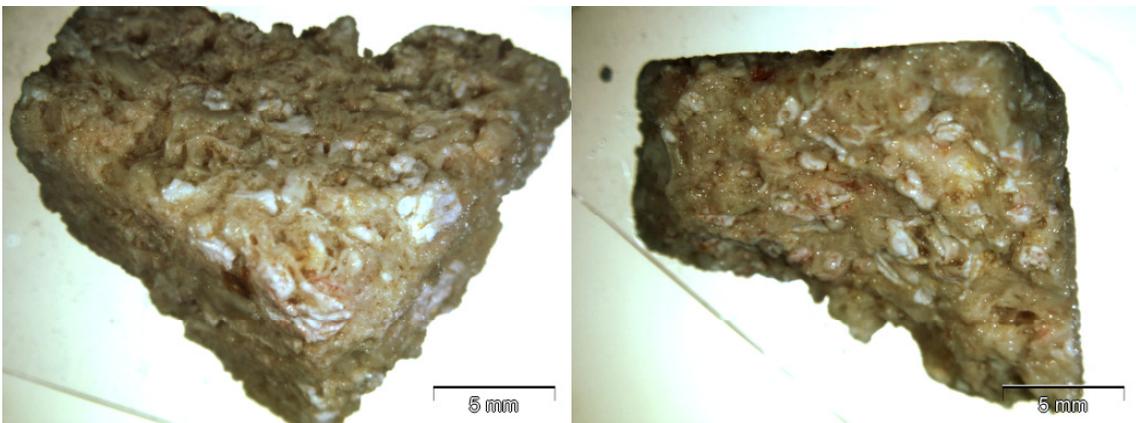
*Abbildung 13: Probe 19 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*



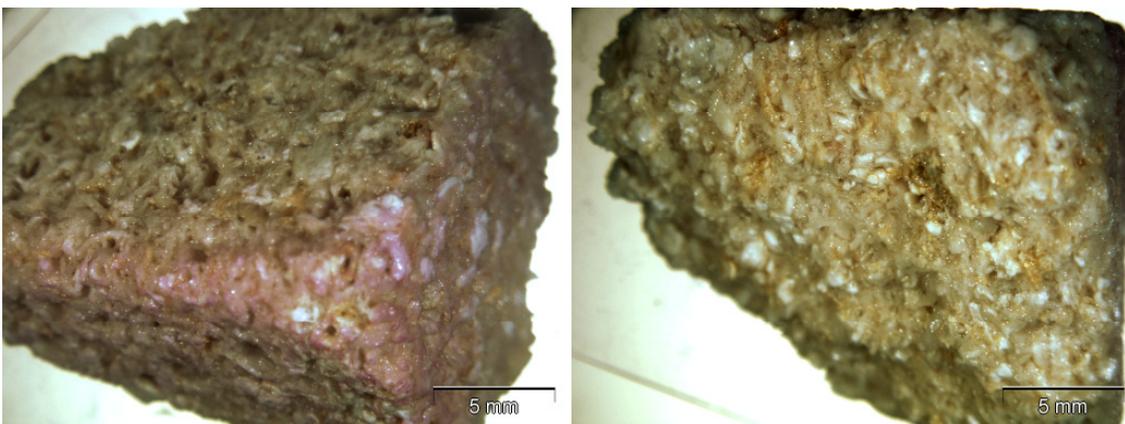
*Abbildung 14: Probe 20 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*



*Abbildung 15: Probe 21 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*

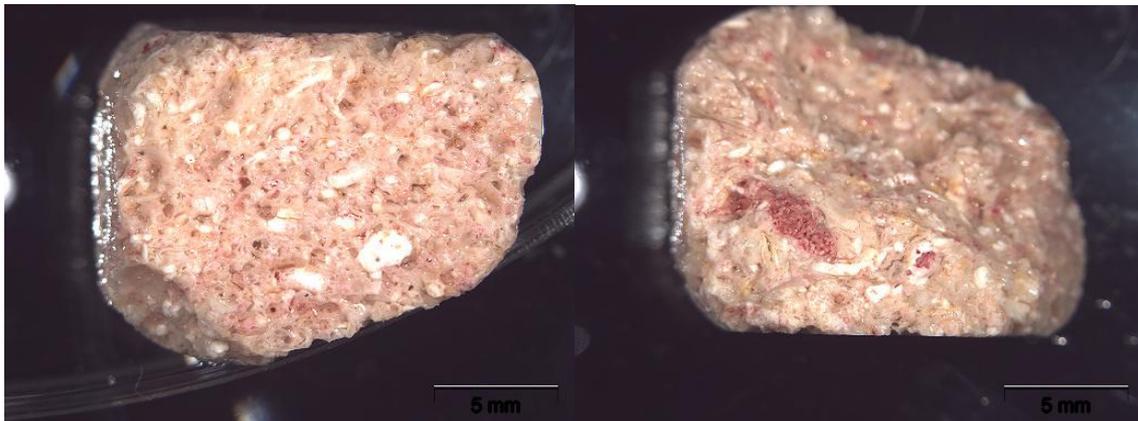


*Abbildung 16: Probe 22 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*

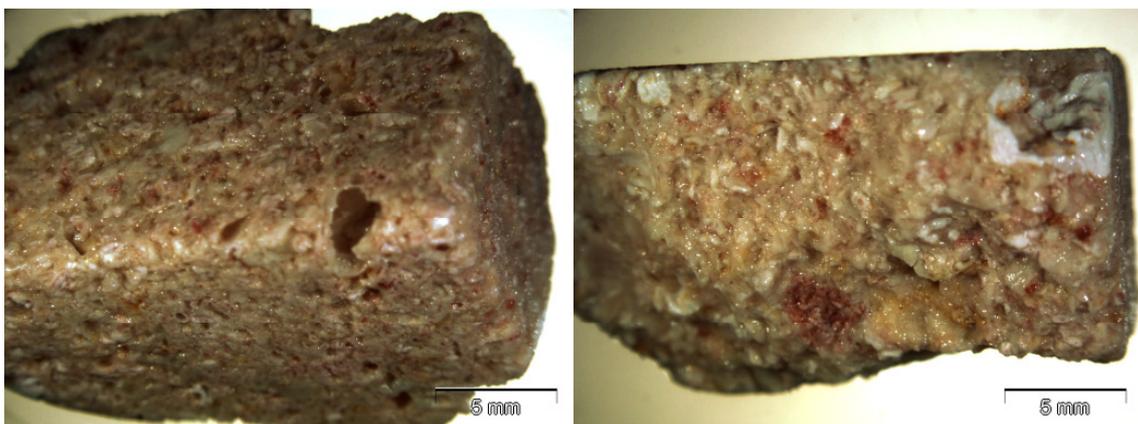


*Abbildung 17: Probe 23 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*

Mit Bakterien und Leitungswasser behandelte Probekörper:



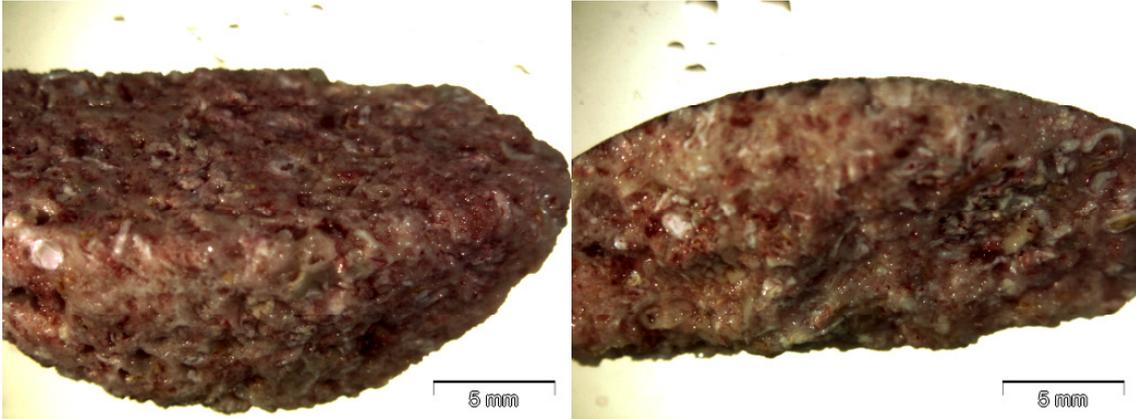
*Abbildung 18: Probe 01 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) einen Tag nach der Behandlung mit Bakterien und Leitungswasser*



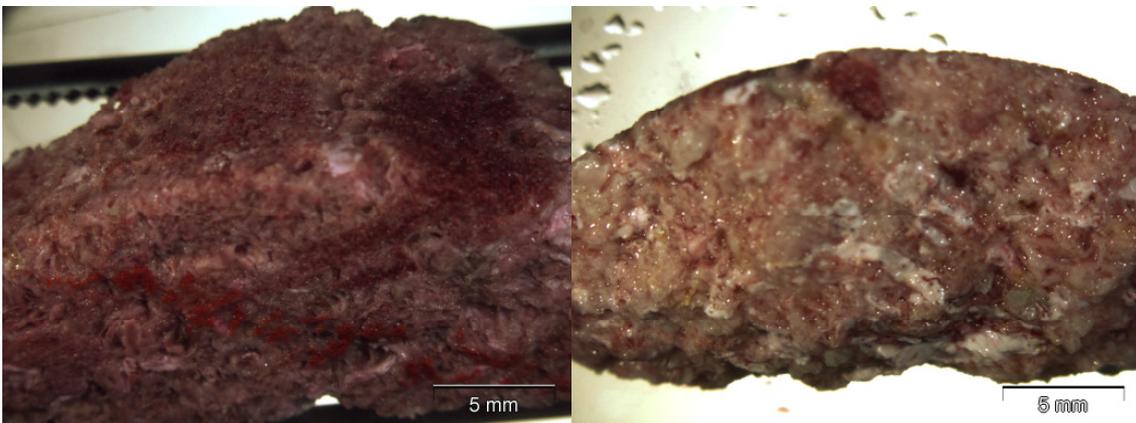
*Abbildung 19: Probe 01 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*



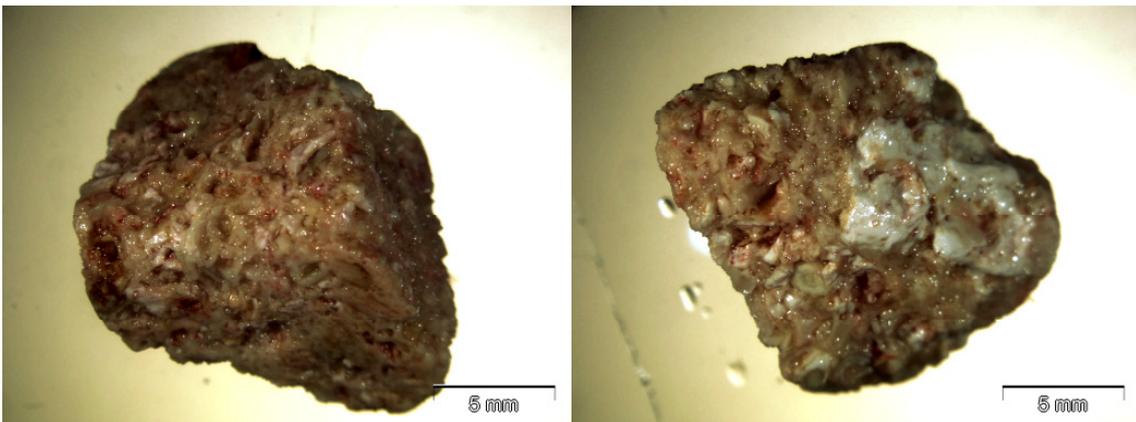
*Abbildung 20: Probe A5 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*



*Abbildung 21: Probe A6 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*



*Abbildung 22: Probe A7 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*



*Abbildung 23: Probe 02 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*



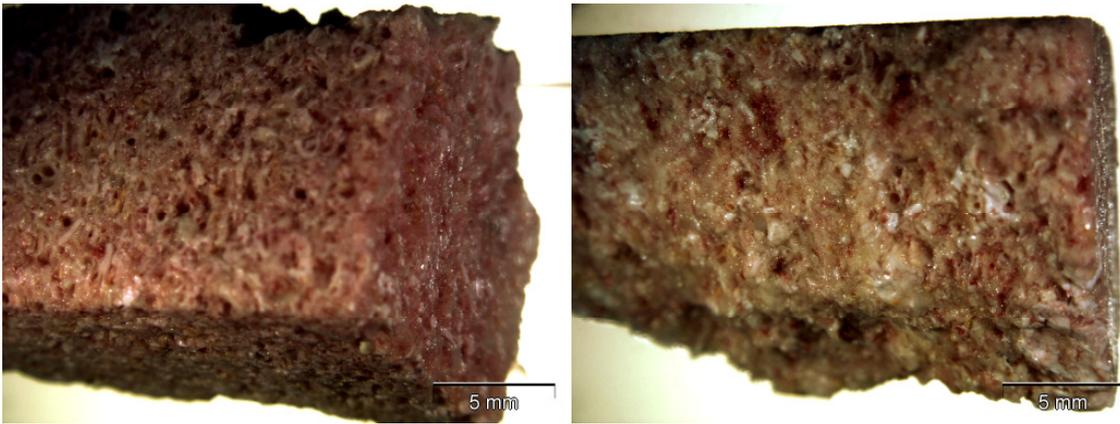
*Abbildung 24: Probe 03 Außenseite (links) und Bruchfläche (links) nach 2 Jahren*



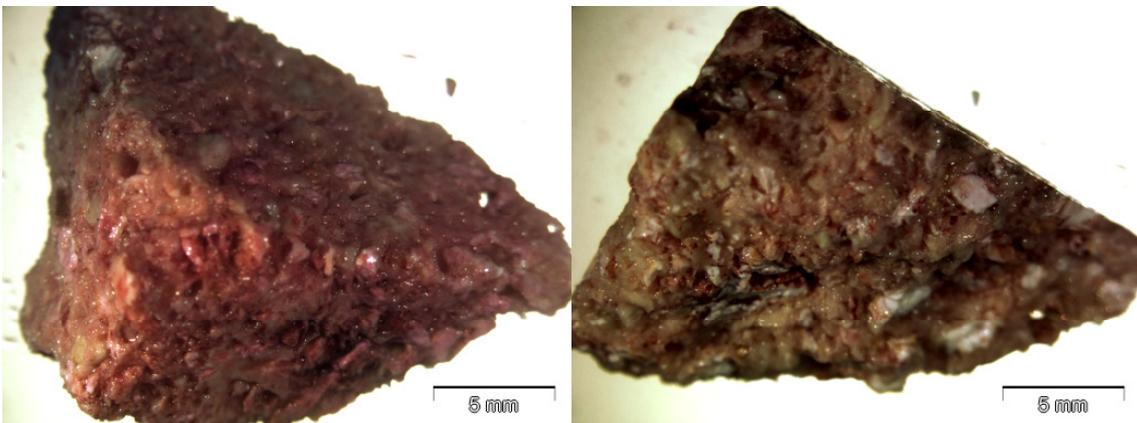
*Abbildung 25: Probe 05 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*



*Abbildung 26: Probe 06 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*



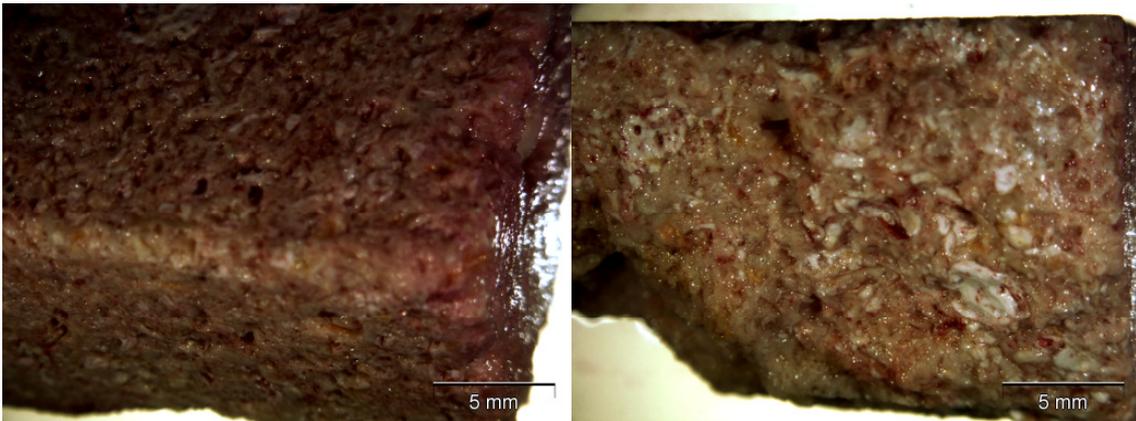
*Abbildung 27: Probe 07 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*



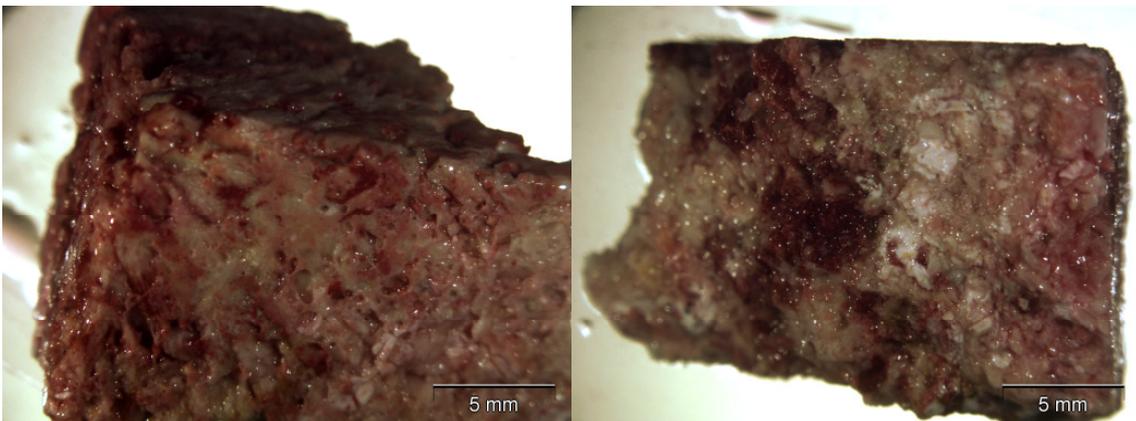
*Abbildung 28: Probe 08 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*



*Abbildung 29: Probe 10 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*



*Abbildung 30: Probe 11 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*



*Abbildung 31: Probe 13 Außenseite (links) und Bruchfläche (rechts) nach 2 Jahren*

## **4.2 Rohdichtebestimmung**

Nach der Festigung der Probekörper mit Kalkwasser, Kalkwasser und Bakterien sowie Wasser und Bakterien, wurde erneut eine Rohdichtebestimmung durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in  $\text{g/cm}^3$  angegeben und in der folgenden Tabelle sowie den nachstehenden Diagrammen dargestellt:

Bakterien und Wasser			Bakterien und Kalkwasser			Kalkwasser		
Probe Nr.	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]		Probe Nr.	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]		Probe Nr.	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	
	unbehandelt	behandelt		unbehandelt	behandelt		unbehandelt	behandelt
1	1,70	1,71	14	1,68	1,68	27	1,72	1,72
3	1,74	1,75	15	1,73	1,74	28	1,69	1,68
5	1,78	1,78	16	1,73	1,74	32	1,67	1,67
6	1,75	1,76	17	1,72	1,72	33	1,67	1,66
7	1,70	1,71	18	1,72	1,72	34	1,71	1,71
8	1,70	1,72	19	1,71	1,72	35	1,68	1,68
10	1,72	1,73	20	1,73	1,73	36	1,74	1,75
11	1,72	1,72	21	1,67	1,67	37	1,76	1,76
13	1,73	1,73	22	1,75	1,76	38	1,71	1,72
			23	1,72	1,72	39	1,69	1,69
						40	1,71	1,72
5A	1,72	1,73	1A	1,77	1,76	10A	1,74	1,75
6A	1,75	1,81	2A	1,70	1,69	11A	1,72	1,73
7A	1,72	1,73	3A	1,76	1,75	12A	1,72	1,73

Tabelle 11: Vergleich der Rohdichte vor und nach der jeweiligen Behandlung

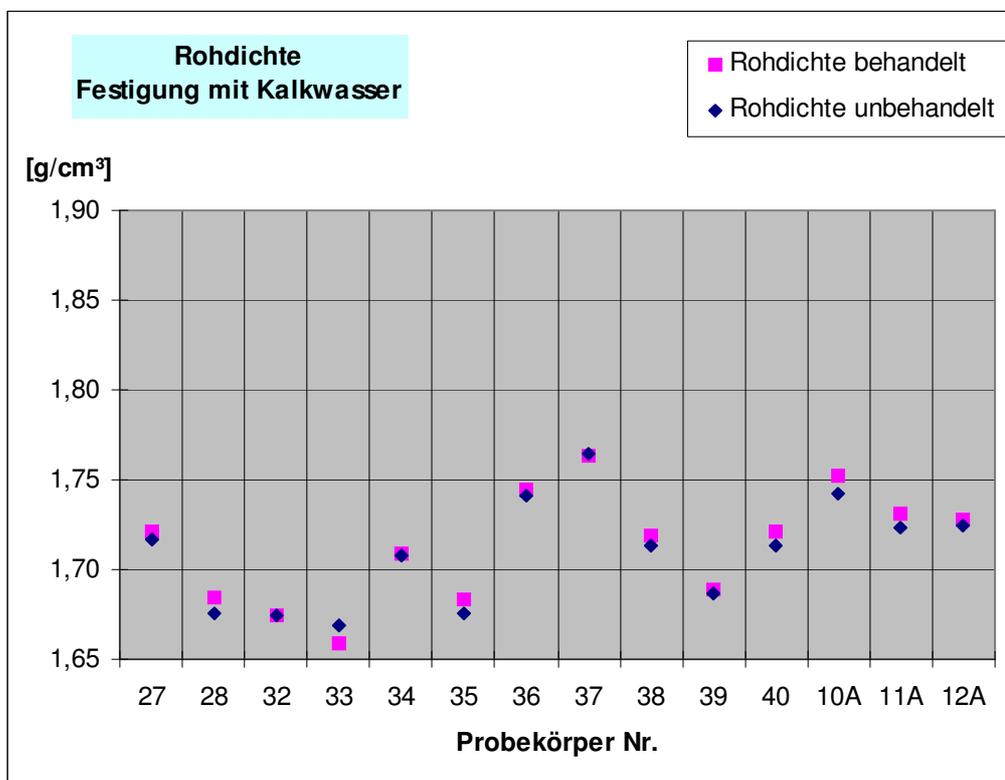


Diagramm 5: Vergleich der Rohdichte der Probekörper vor und nach der Festigung mit Kalkwasser

Generell betrachtet sind die Abweichungen der Rohdichten sowohl bei den Prismen, als auch bei den Zylindern vor und nach der Behandlung mit Kalkwasser geringfügig verändert, nämlich erhöht, auch wenn man streng genommen diese Veränderungen als nicht signifikant zu bewerten hat.

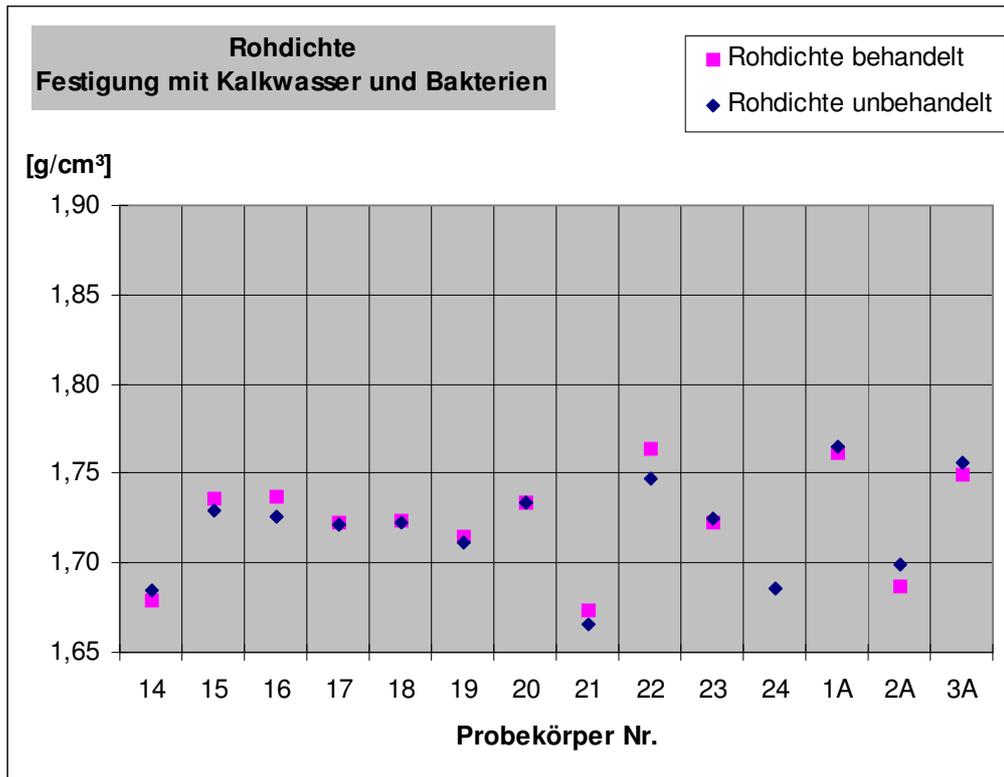


Diagramm 6: Vergleich der Rohdichte der Probekörper vor und nach der Festigung mit Kalkwasser und Bakterien

Auch bei den mit Kalkwasser und Bakterien behandelten prismatischen Probekörpern zeigt sich eine geringfügige Zunahme der Rohdichte um durchschnittlich  $0,004 \text{ g/cm}^3$ , und bei den zylindrischen Proben eine geringfügige Abnahme der Rohdichte um im Mittel  $0,007 \text{ g/cm}^3$ . Beide Werte sind also erneut als nicht signifikant einzustufen.

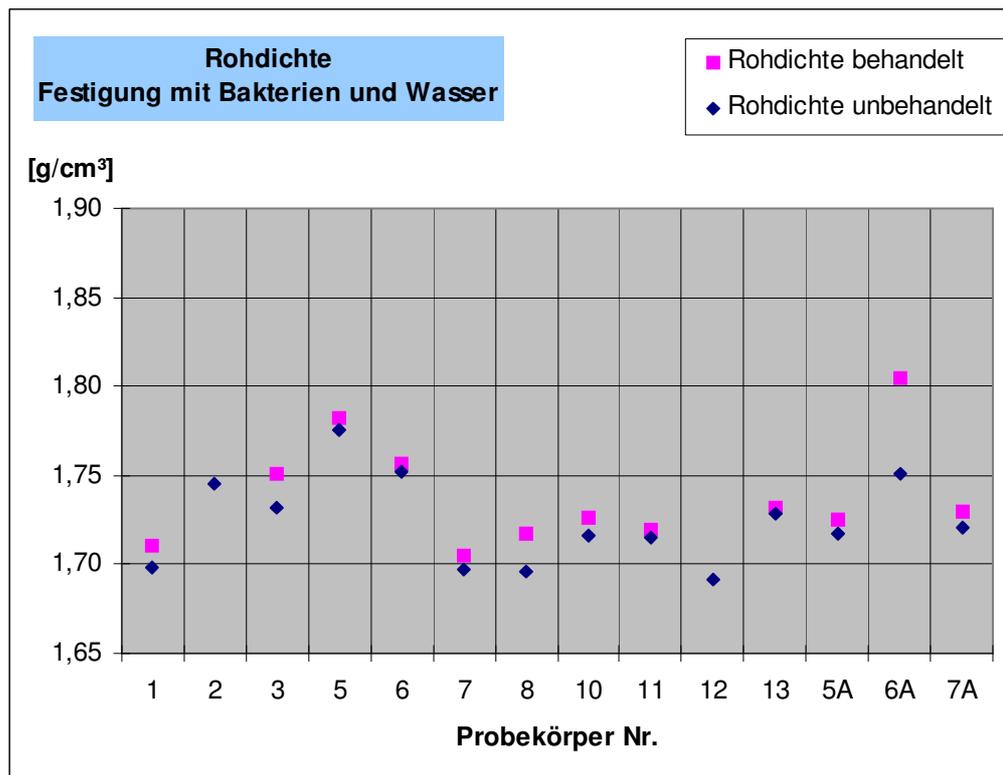


Diagramm 7: Vergleich der Rohdichte der Probekörper vor und nach der Festigung mit Wasser und Bakterien

Die Versuche zur Rohdichtebestimmung an den mit Bakterien und Wasser behandelten Proben zeigt sowohl bei den prismatischen wie auch bei den zylindrischen Probekörpern eine leichte Zunahme derselben nach der Behandlung. Dennoch ist auch diese mit durchschnittlich  $0,008 \text{ g/cm}^3$  rechnerisch nicht signifikant. Bei den Zylindern liegt sie rein statistisch um im Mittel  $0,023 \text{ g/cm}^3$  höher. Dieser Wert ist jedoch nicht wirklich aussagekräftig, da für die Mittelwertbildung nur drei Probekörper zur Verfügung standen und die Veränderung der Rohdichte einer der Prüfkörper stark abweicht (siehe Probe 6A).

Die Veränderungen der Rohdichte sind zwar eher gering und daher im mathematischen Sinn als nicht signifikant zu bezeichnen, doch zeigt sich jeweils ein eindeutiger Trend für Zylinder und Prismen.

Die unterschiedlichen Tendenzen der Zylinder und Prismen könnten durch die unterschiedliche Prüfkörpergeometrie erklärt werden, da dabei das Verhältnis von

Oberfläche zu Volumen ein Anderes ist. Durch die größere Oberfläche der Prismen ( $O/V = \text{ca. } 1,1$ ) im Vergleich zum Volumen stünde den Applikationsmedien hier mehr Angriffsfläche als bei den Zylindern ( $O/V = \text{ca. } 0,9$ ) zur Verfügung.

### 4.3 Wasseraufnahme

Die Veränderung der Wasseraufnahme der Probekörper nach deren Behandlung lässt sich in der folgenden Tabelle sowie den Diagrammen ablesen:

Bakterien und Wasser			Bakterien und Kalkwasser			Kalkwasser		
Probe Nr.	w [%]		Probe Nr.	w [%]		Probe Nr.	w [%]	
	unbehandelt	behandelt		unbehandelt	behandelt		unbehandelt	behandelt
1	12,25	12,12	14	14,17	14,32	27	13,83	13,82
3	14,78	14,61	15	14,29	14,05	28	13,93	13,85
5	13,77	13,59	16	13,91	13,63	32	15,10	15,12
6	14,00	13,94	17	13,88	13,53	33	13,68	13,12
7	13,61	13,25	18	12,74	12,77	34	13,51	12,92
8	14,95	14,61	19	12,86	12,92	35	13,40	12,85
10	13,07	12,95	20	12,26	12,08	36	14,91	14,74
11	13,30	13,04	21	15,82	15,51	37	13,61	13,19
13	14,58	14,37	22	13,81	13,28	38	12,11	11,84
			23	14,56	14,36	39	14,65	14,59
						40	13,71	13,30
5A	15,68	15,34	1A	14,44	14,56	10A	14,81	14,77
6A	14,46	14,50	2A	15,25	15,10	11A	14,79	14,74
7A	14,60	14,54	3A	14,57	14,51	12A	15,15	15,27

Tabelle 12: Vergleich der Wasseraufnahmen vor und nach der jeweiligen Behandlung

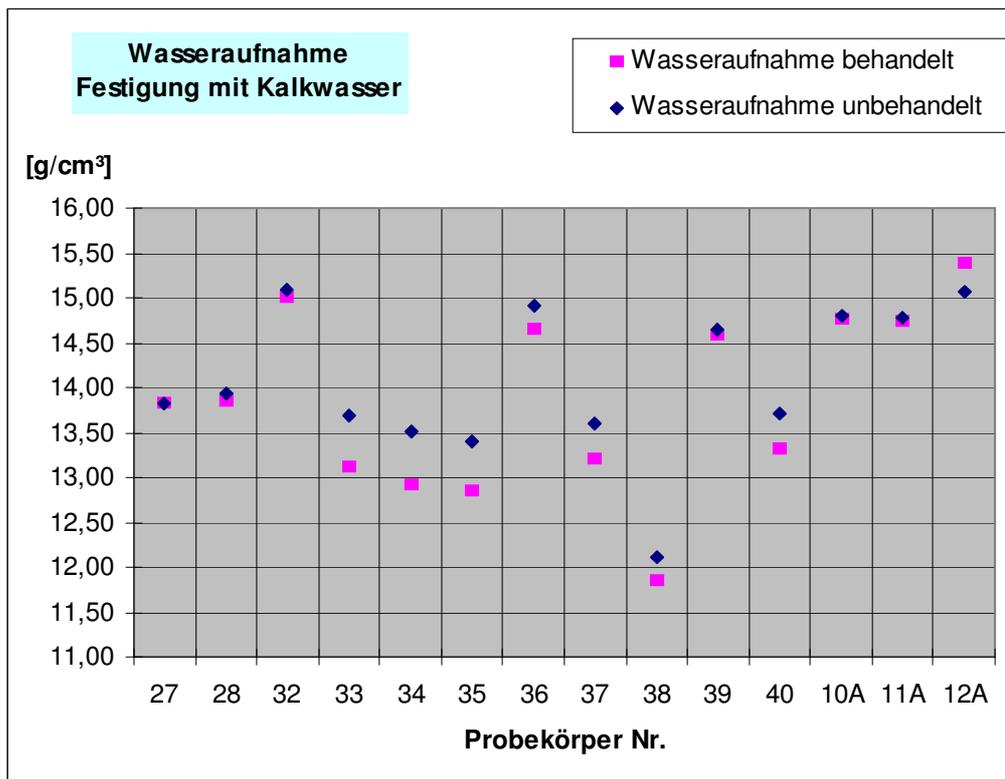


Diagramm 8: Vergleich der Wasseraufnahme der Probekörper vor und nach der Festigung mit Kalkwasser

Die Ergebnisse zeigen eine Abnahme der Wasseraufnahme der mit Kalkwasser behandelten Proben nach der Festigung. Dabei nahm die Wasseraufnahme der Prismen von im Durchschnitt 13,86 Massen-% auf 13,58 Massen-%, also um 2,04% ab. Die Wasseraufnahme der Zylinder nahm von 14,92 Massen-% auf 14,96 Massen-% also um 0,29% zu.

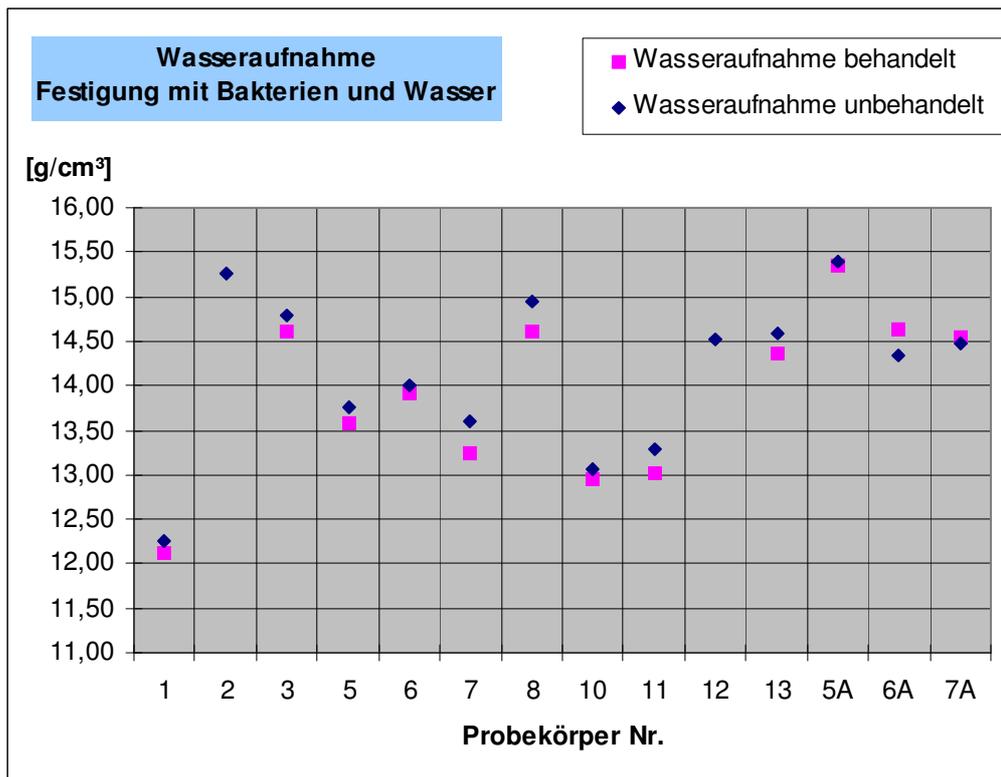


Diagramm 9: Vergleich der Wasseraufnahme der Probekörper vor und nach der Festigung mit Wasser und Bakterien

Hier zeigen die Ergebnisse eine Verringerung der Wasseraufnahme der mit Wasser und Bakterien behandelten Proben nach der Festigung. Dabei nahm die Wasseraufnahme der Prismen von im Durchschnitt 13,81 Massen-% auf 13,61 Massen-%, also um 1,47% ab. Die Wasseraufnahme der Zylinder nahm von 14,92 Massen-% auf 14,83 Massen-% also um 0,55% ab.

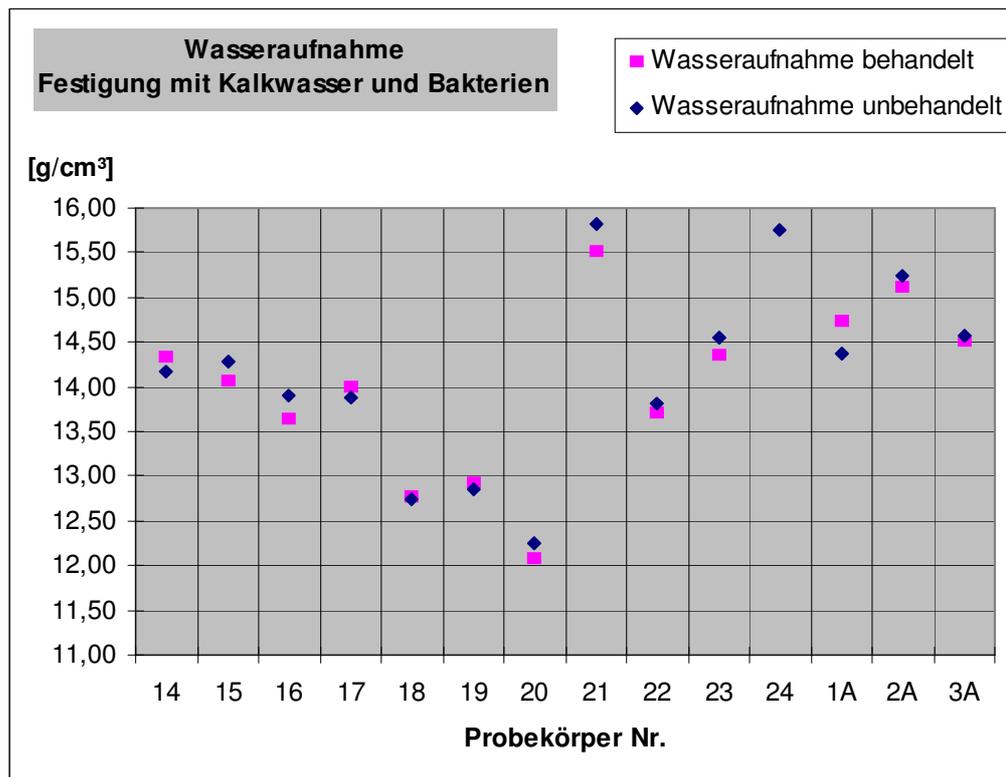


Diagramm 10: Vergleich der Wasseraufnahme der Probekörper vor und nach der Festigung mit Kalkwasser und Bakterien

Auch hier weisen die Ergebnisse eine Verringerung der Wasseraufnahme der mit Kalkwasser und Bakterien behandelten Proben nach der Festigung auf. Dabei nahm die Wasseraufnahme der Prismen von im Durchschnitt 13,82 Massen-% auf 13,64 Massen-%, also um 1,34% ab. Die Wasseraufnahme der Zylinder nahm von 14,75 Massen-% auf 14,78 Massen-% also um 0,22% zu.

#### 4.4 Wasseraufnahmeverhalten

In den folgenden Diagrammen zeigen sich praktisch keine Veränderungen im Wasseraufnahmeverhalten der Probekörper vor und nach der jeweiligen Behandlung. Als Anschauungsbeispiel wurden für jedes Applikationsmedium drei Diagramme, jeweils zweier Prismen und eines Zylinders, in dem das Wasseraufnahmeverhalten vor und nach der Festigung dargestellt ist, abgebildet. Die Auflistung der Werte, sowie die Diagramme der restlichen Prüfkörper wurden im Anhang angeführt.

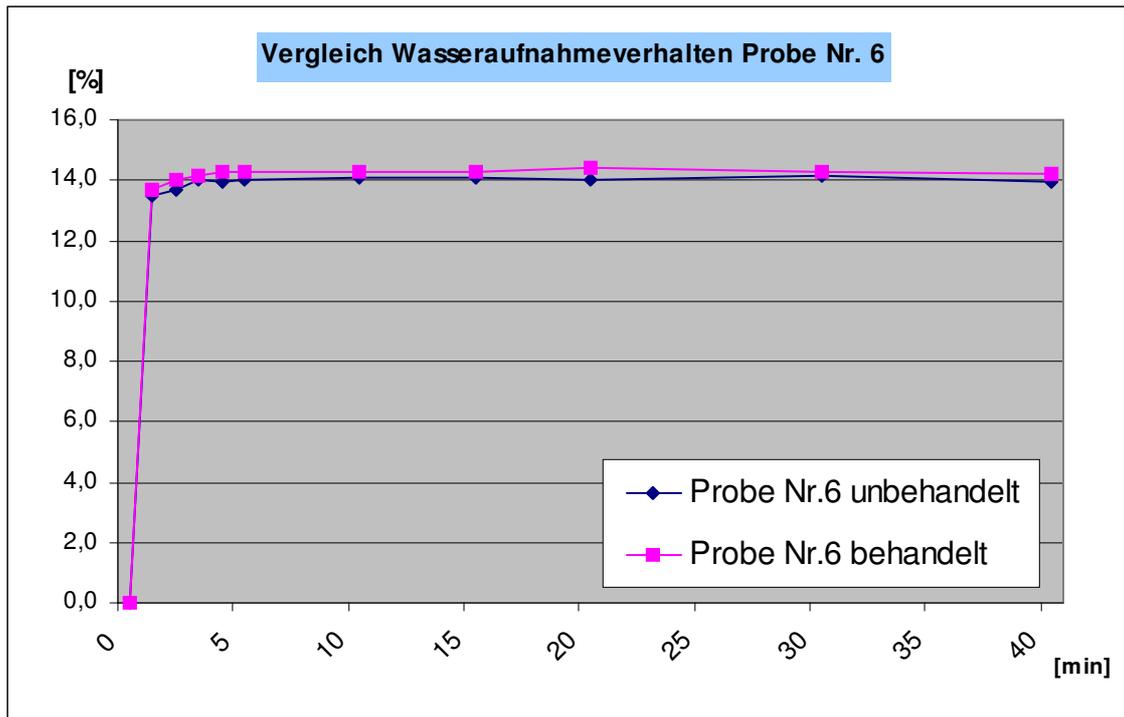


Diagramm 11: Vergleich des Wasseraufnahmeverhaltens vor und nach der Behandlung mit Bakterien und Wasser am Beispiel der Probe Nr. 6

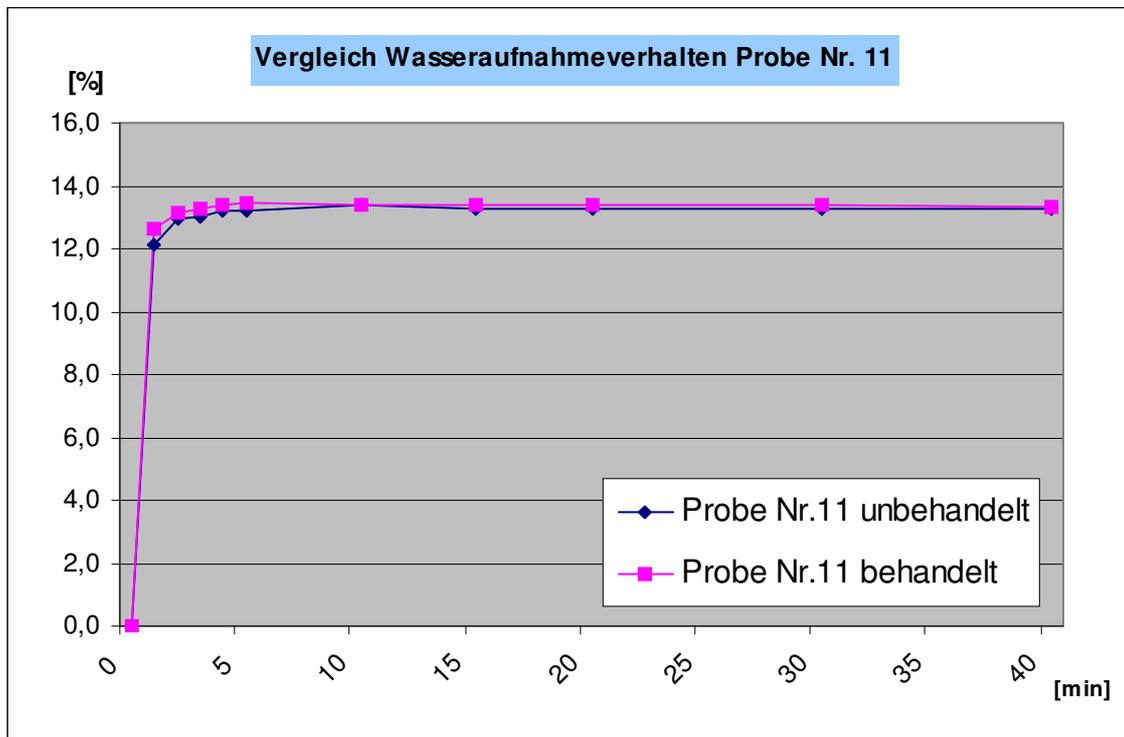


Diagramm 12: Vergleich des Wasseraufnahmeverhaltens vor und nach der Behandlung mit Bakterien und Wasser am Beispiel der Probe Nr. 11

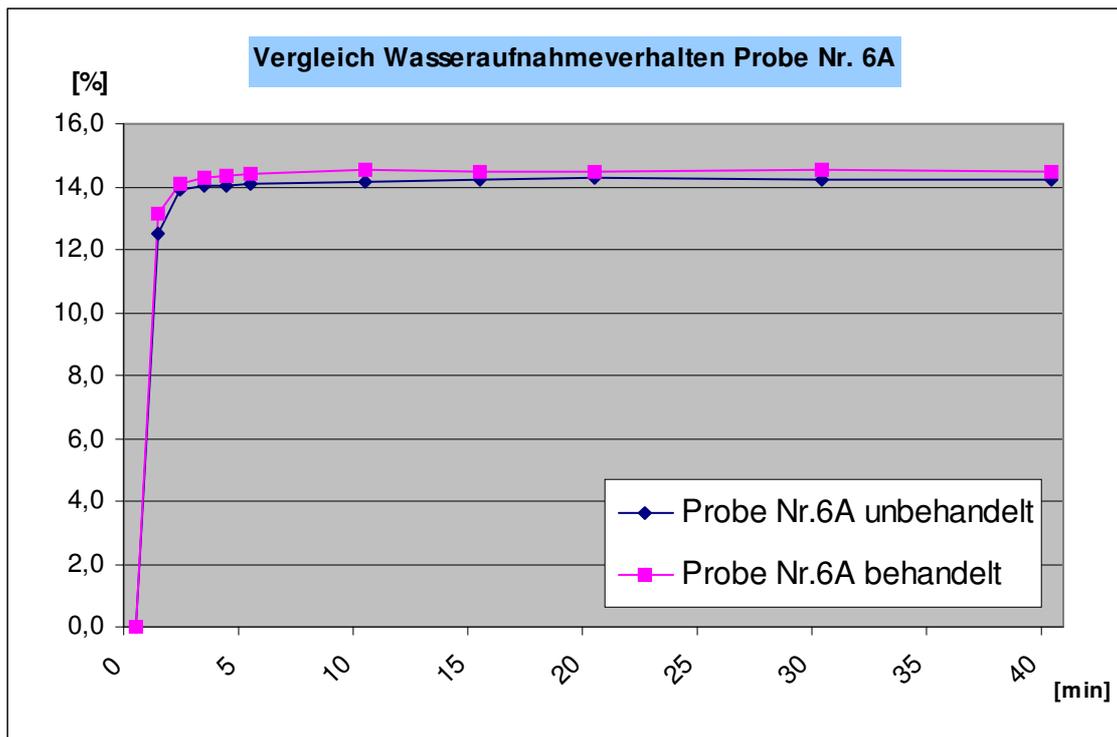


Diagramm 13: Vergleich des Wasseraufnahmeverhaltens vor und nach der Behandlung mit Bakterien und Wasser am Beispiel der Probe Nr. 6A

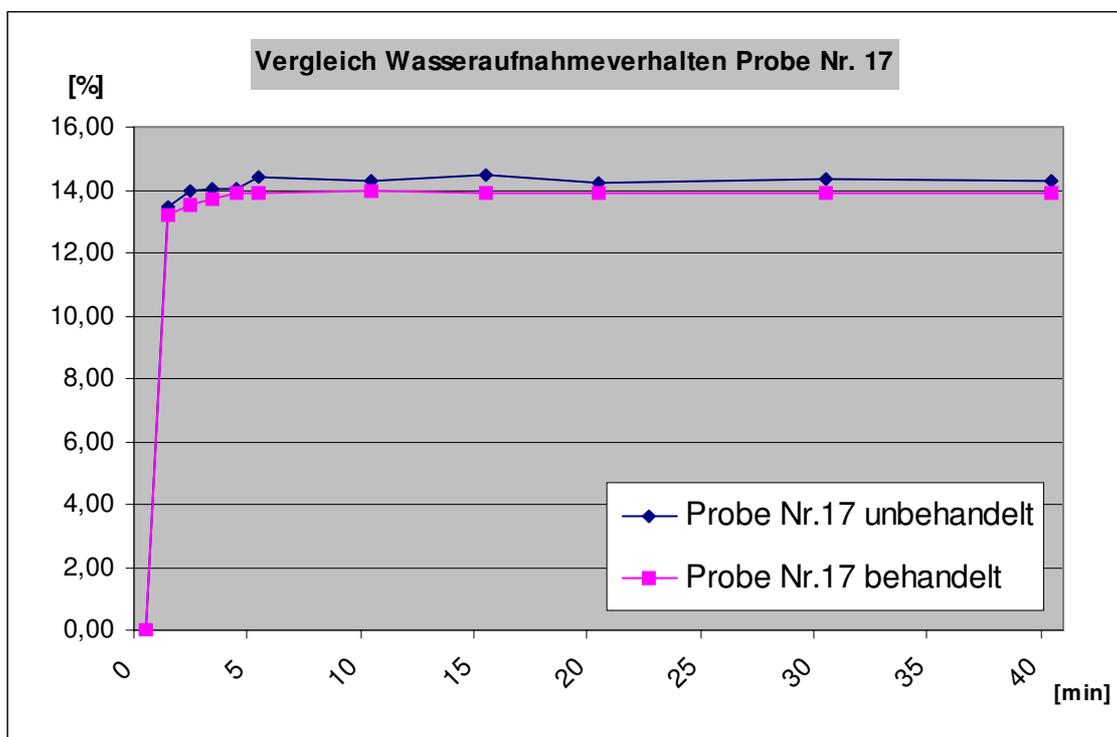


Diagramm 14: Vergleich des Wasseraufnahmeverhaltens vor und nach der Behandlung mit Bakterien und Kalkwasser am Beispiel der Probe Nr. 17

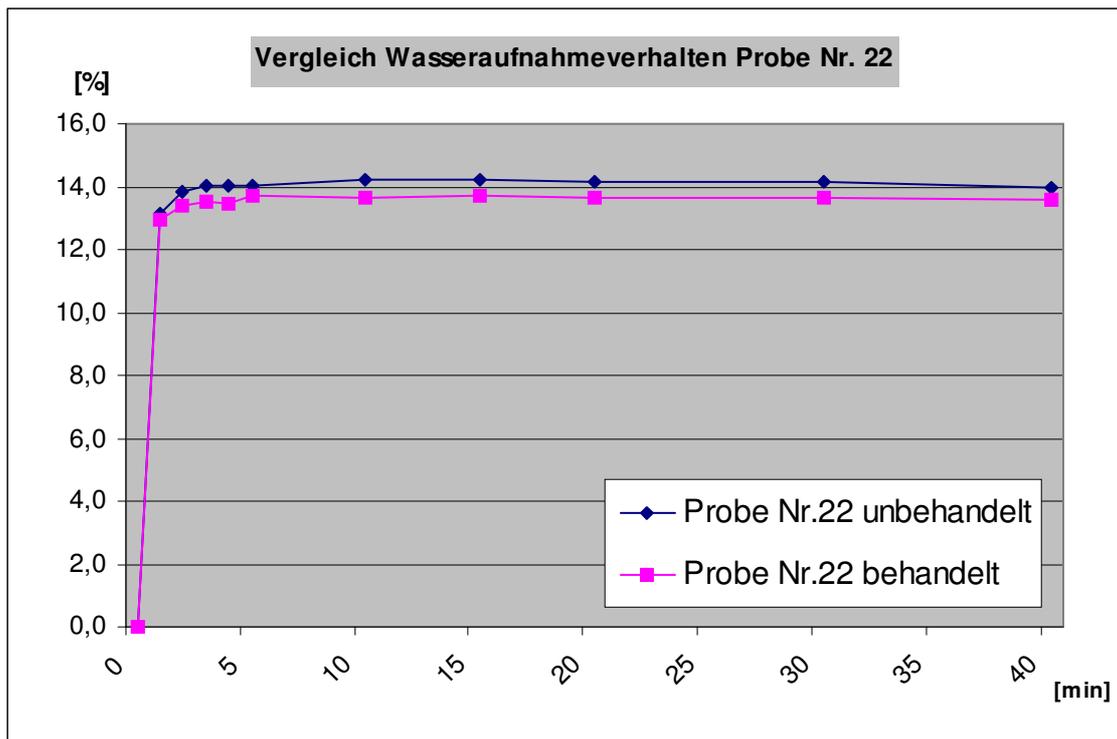


Diagramm 15: Vergleich des Wasseraufnahmeverhaltens vor und nach der Behandlung mit Bakterien und Kalkwasser am Beispiel der Probe Nr. 22

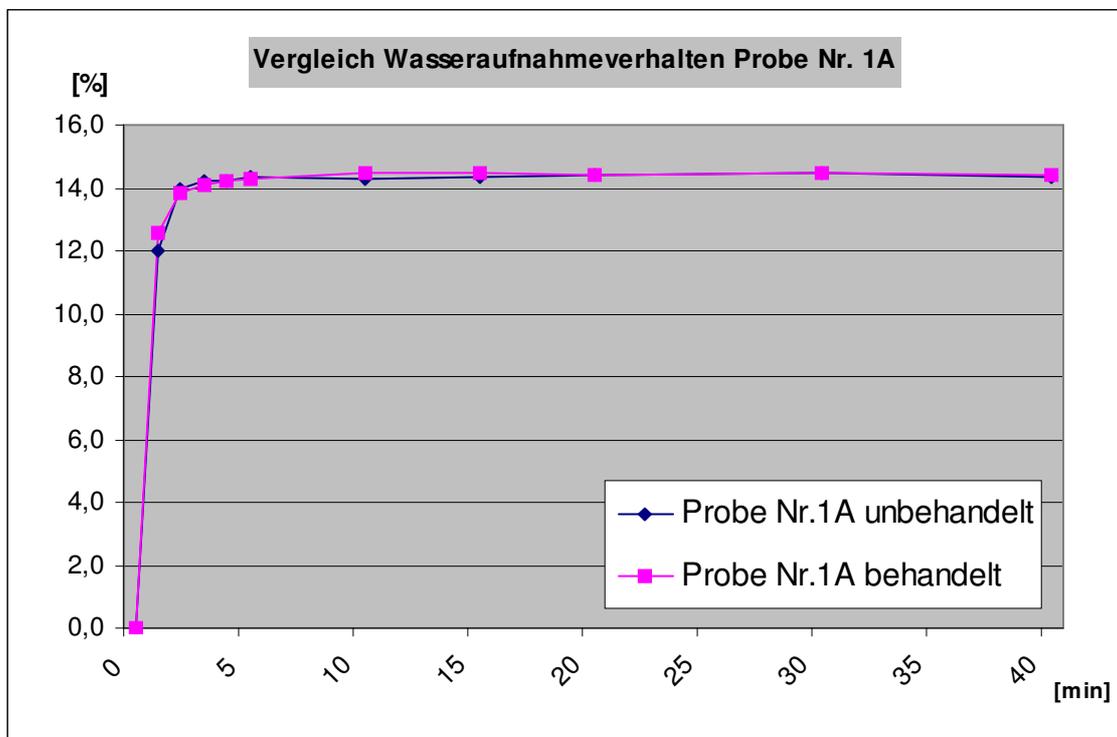


Diagramm 16: Vergleich des Wasseraufnahmeverhaltens vor und nach der Behandlung mit Bakterien und Kalkwasser am Beispiel der Probe Nr. 1A

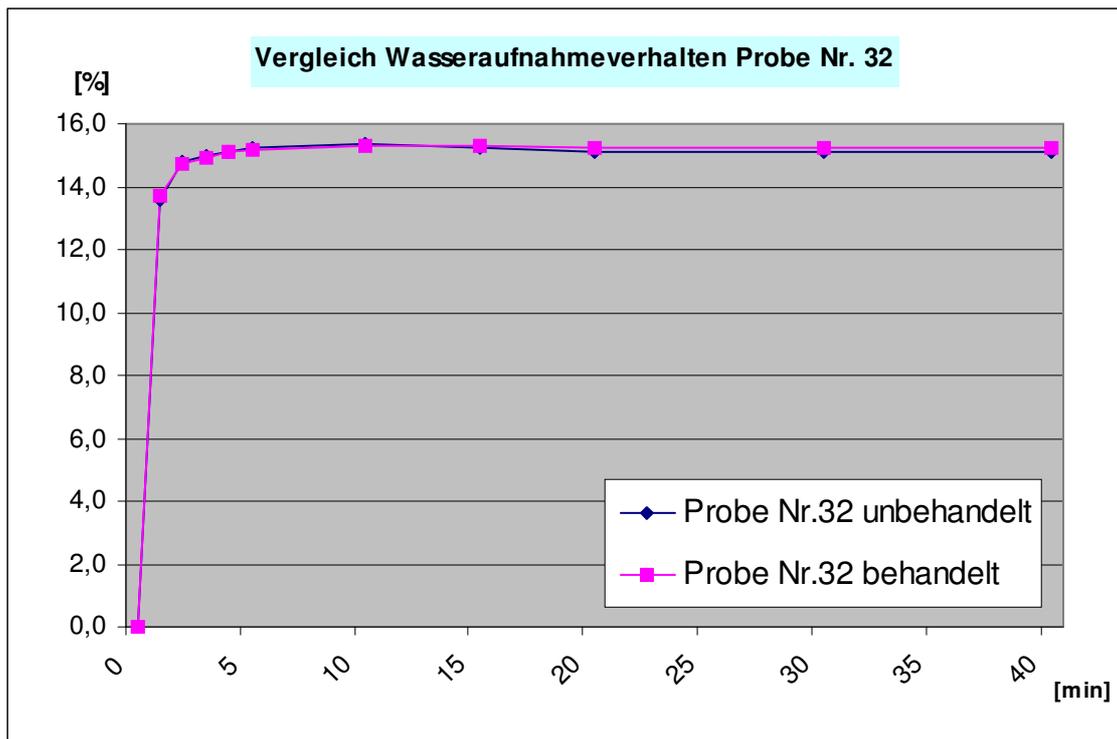


Diagramm 17: Vergleich des Wasseraufnahmeverhaltens vor und nach der Behandlung mit Kalkwasser am Beispiel der Probe Nr. 32

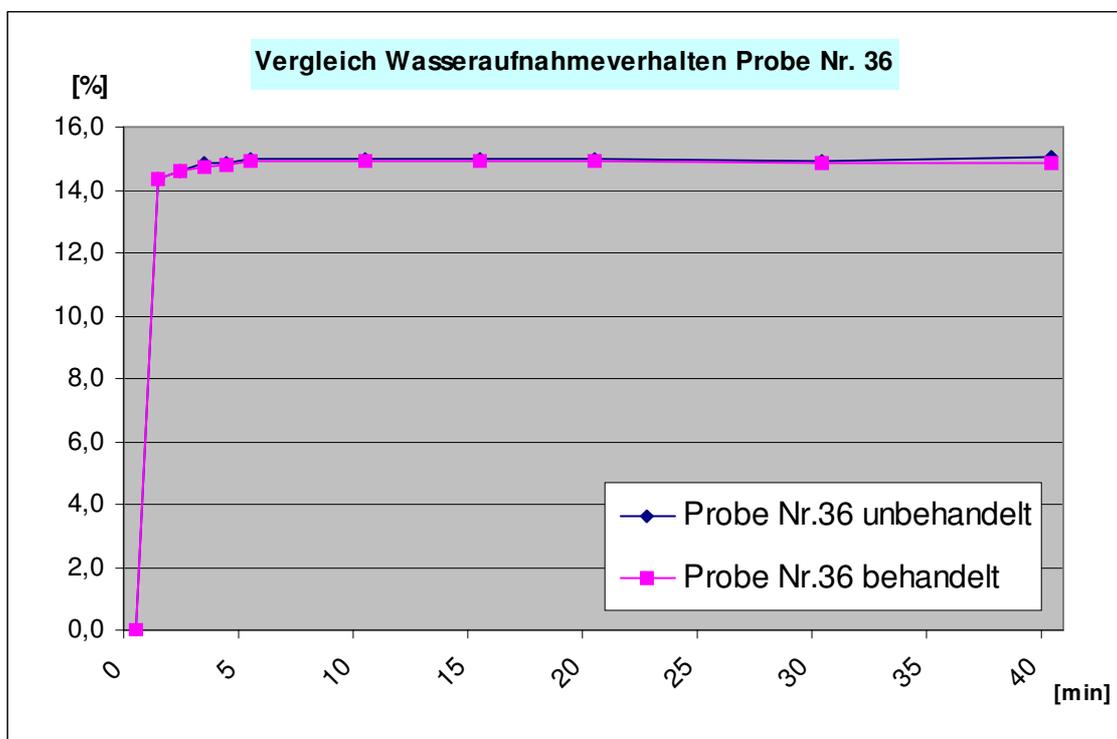


Diagramm 18: Vergleich des Wasseraufnahmeverhaltens vor und nach der Behandlung mit Kalkwasser am Beispiel der Probe Nr. 36

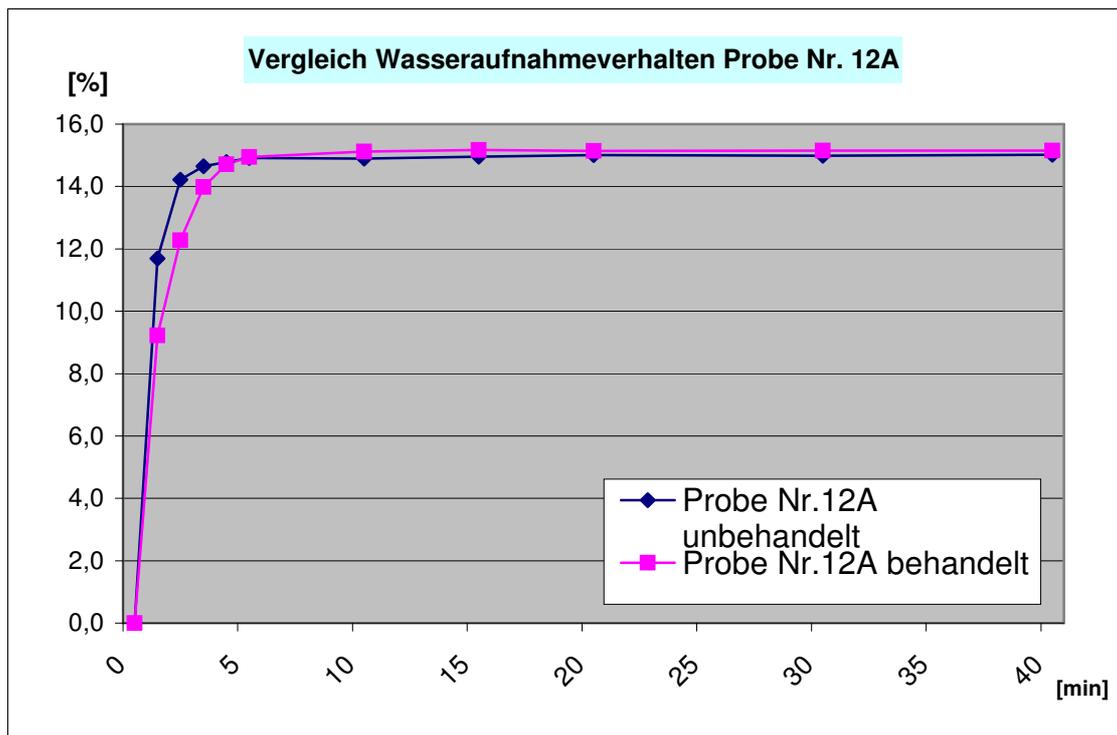


Diagramm 19: Vergleich des Wasseraufnahmeverhaltens vor und nach der Behandlung mit Kalkwasser am Beispiel der Probe Nr. 12A

## 4.5 Wasserabgabeverhalten

Die folgenden Diagramme zur Veränderungen des Wasserabgabeverhaltens vor und nach der Behandlung zeigen eine leichte Tendenz zur Verzögerung der Wasserabgabe. Bei einigen Probekörpern (Siehe Diagramm 21 und Diagramm 23) zeigt sich nahezu keine Veränderung, bei allen anderen hingegen eine leichte Verzögerung.

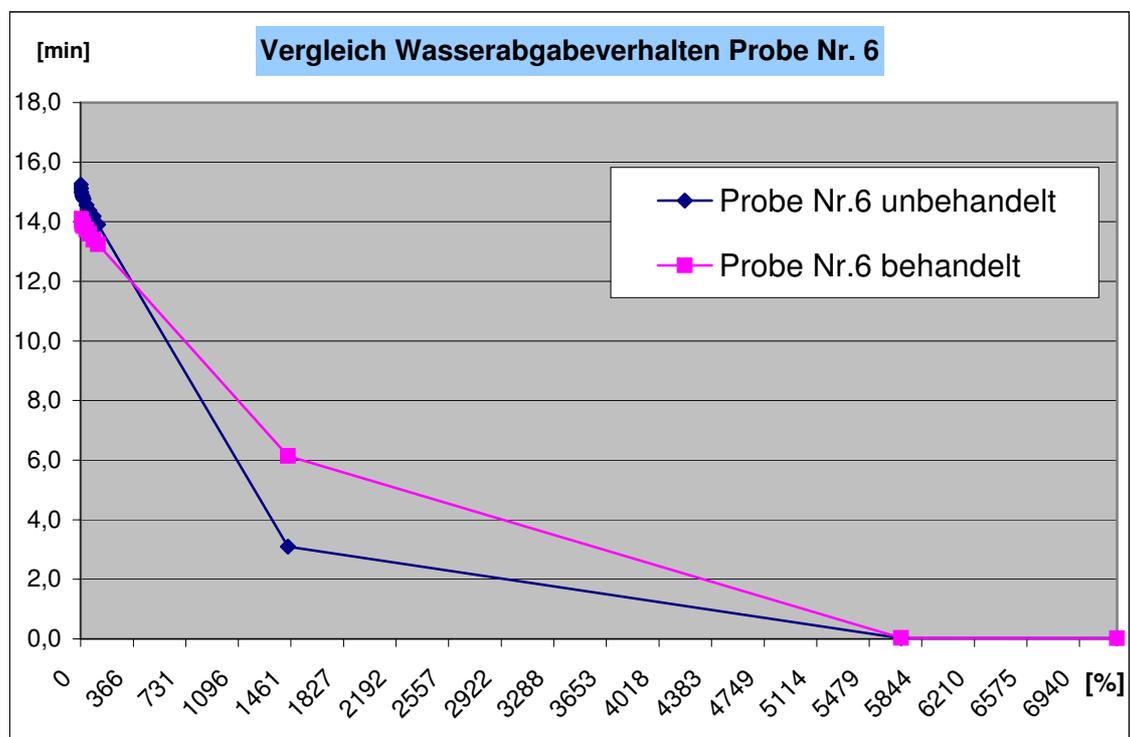


Diagramm 20: Vergleich des Wasserabgabeverhaltens vor und nach der Behandlung mit Bakterien und Wasser am Beispiel der Probe Nr. 6

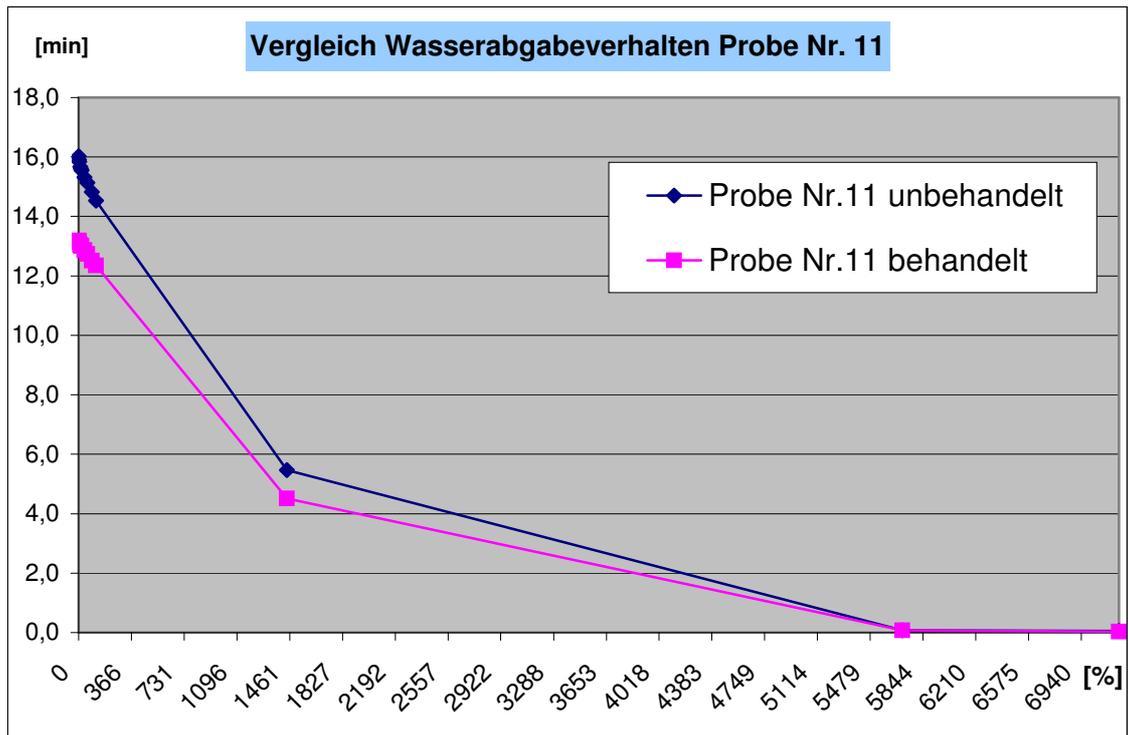


Diagramm 21: Vergleich des Wasserabgabeverhaltens vor und nach der Behandlung mit Bakterien und Wasser am Beispiel der Probe Nr. 11

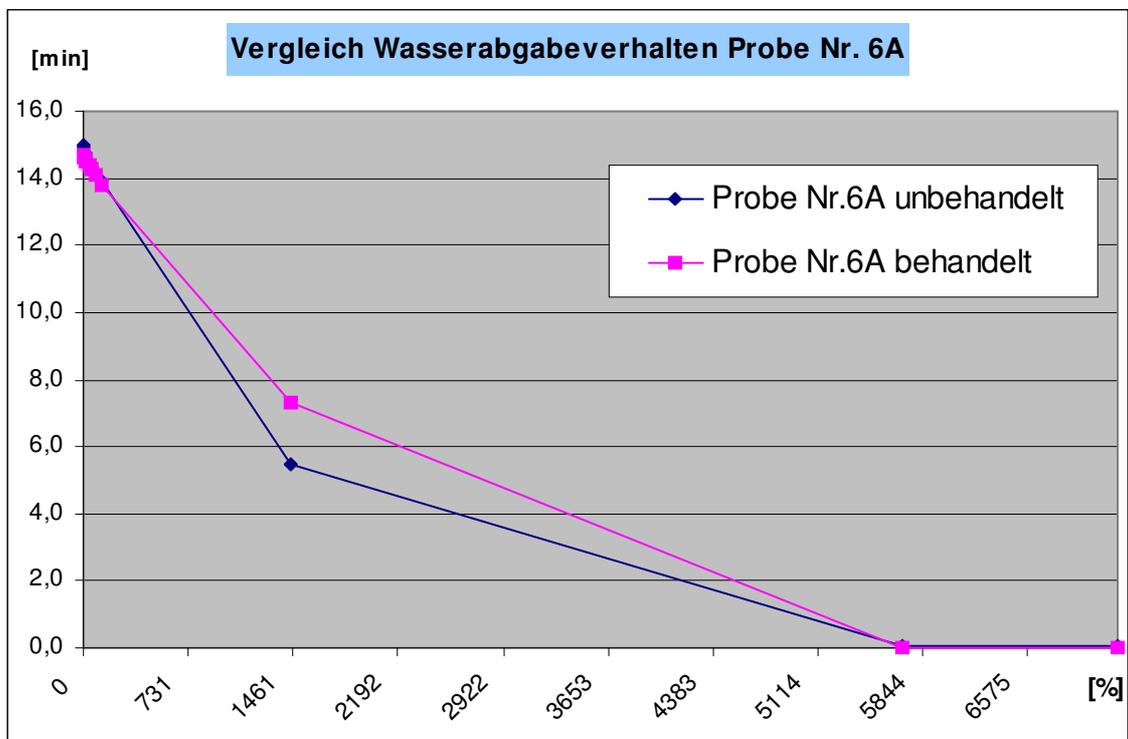


Diagramm 22: Vergleich des Wasserabgabeverhaltens vor und nach der Behandlung mit Bakterien und Wasser am Beispiel der Probe Nr. 6A

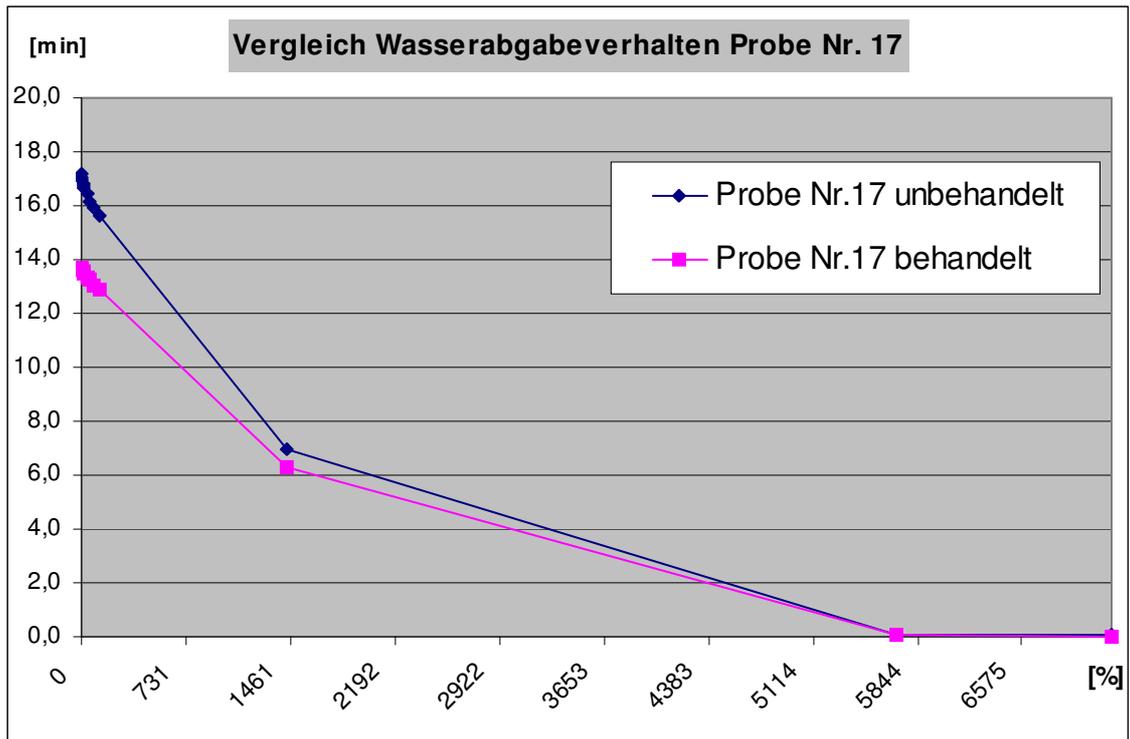


Diagramm 23: Vergleich des Wasserabgabeverhaltens vor und nach der Behandlung mit Bakterien und Kalkwasser am Beispiel der Probe Nr. 17

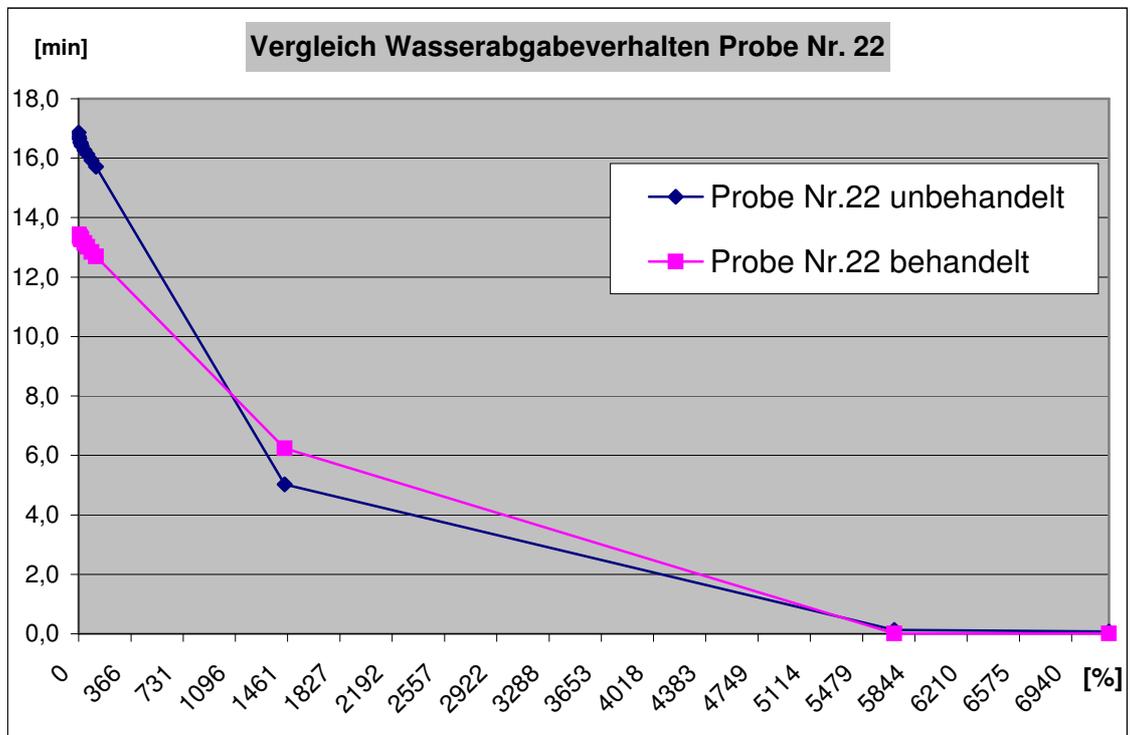


Diagramm 24: Vergleich des Wasserabgabeverhaltens vor und nach der Behandlung mit Bakterien und Kalkwasser am Beispiel der Probe Nr. 22

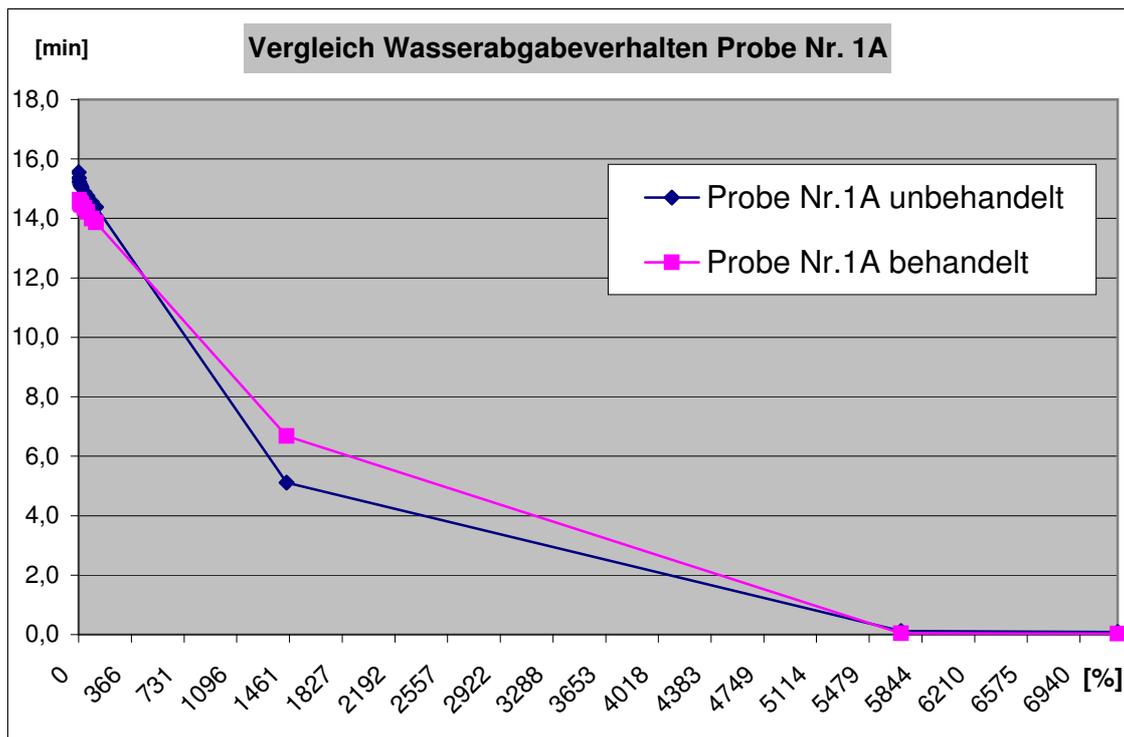


Diagramm 25: Vergleich des Wasserabgabeverhaltens vor und nach der Behandlung mit Bakterien und Kalkwasser am Beispiel der Probe Nr. 1A

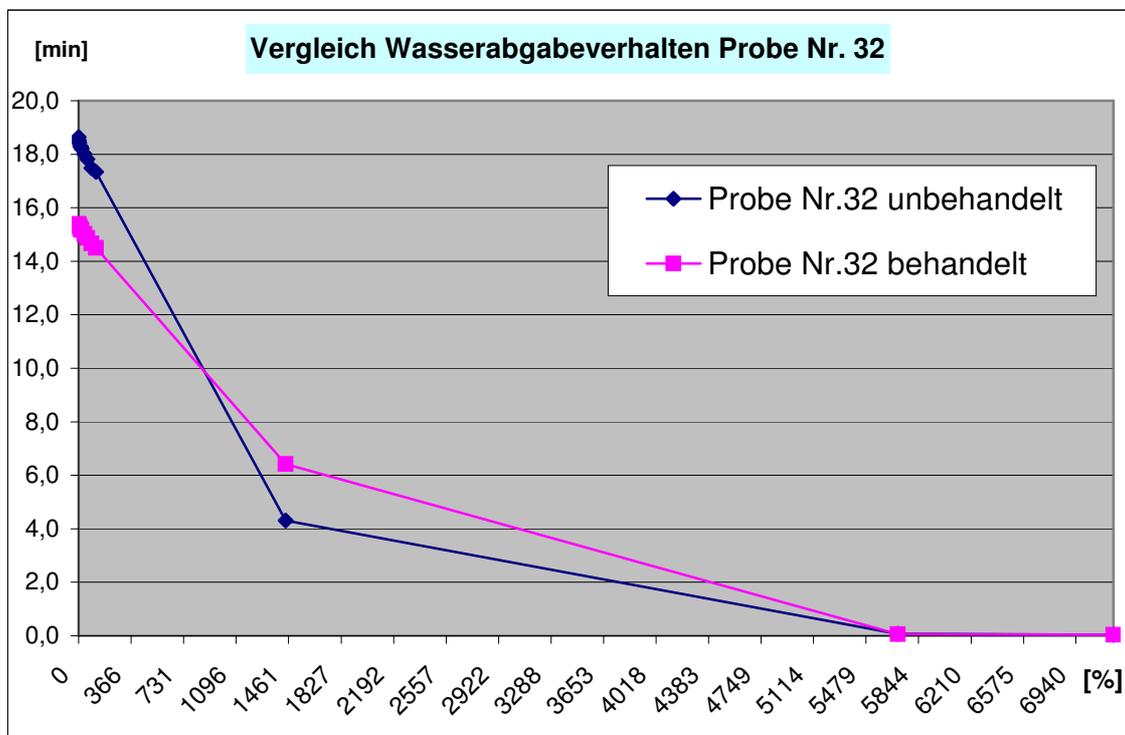


Diagramm 26: Vergleich des Wasserabgabeverhaltens vor und nach der Behandlung mit Kalkwasser am Beispiel der Probe Nr. 32

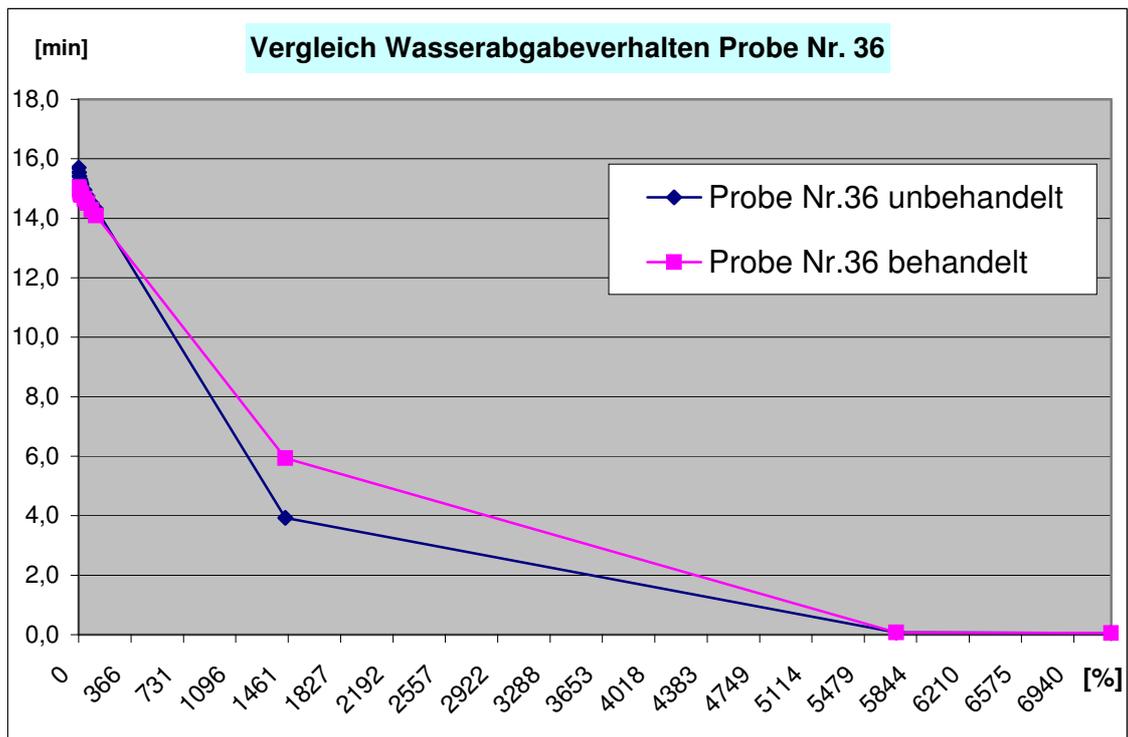


Diagramm 27: Vergleich des Wasserabgabeverhaltens vor und nach der Behandlung mit Bakterien und Kalkwasser am Beispiel der Probe Nr. 36

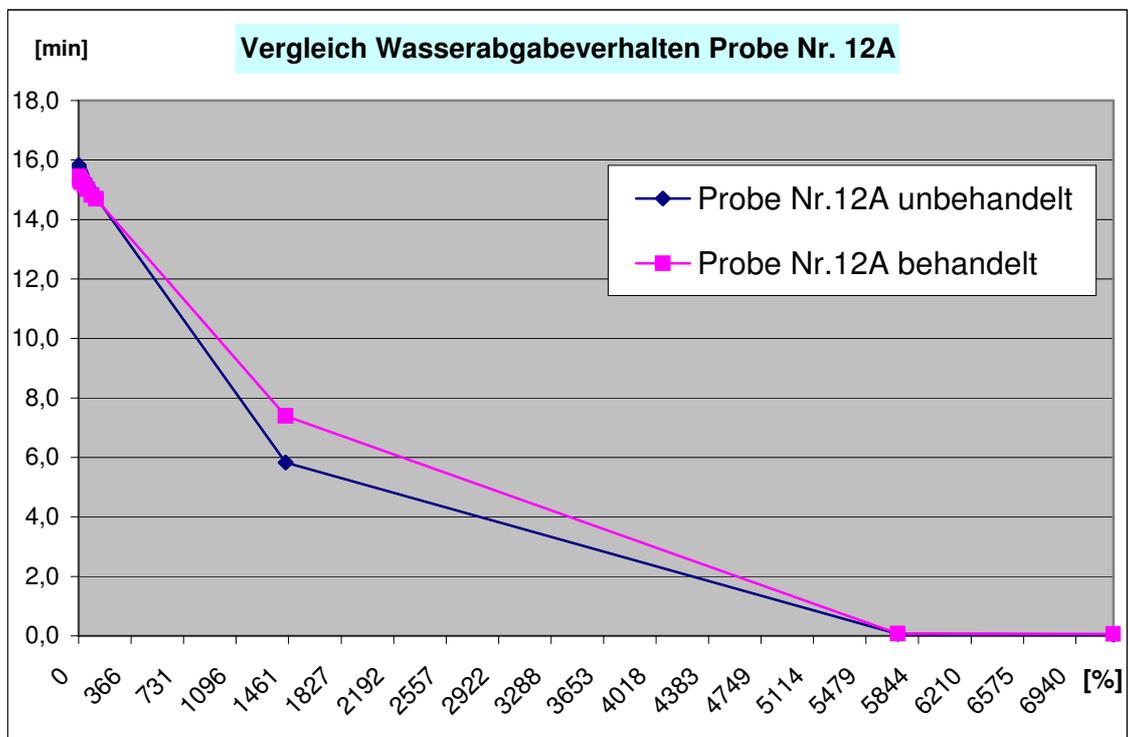


Diagramm 28: Vergleich des Wasserabgabeverhaltens vor und nach der Behandlung mit Bakterien und Kalkwasser am Beispiel der Probe Nr. 12A

## 4.6 Ultraschallmessungen

Die Ergebnisse der Ultraschallmessungen wurden in Durchgangsgeschwindigkeiten angegeben und graphisch dargestellt.

Bakterien und Wasser			Bakterien und Kalkwasser			Kalkwasser		
Probe Nr.	v [km/s]		Probe Nr.	v [km/s]		Probe Nr.	v [km/s]	
	unbehandelt	behandelt		unbehandelt	behandelt		unbehandelt	behandelt
1	2,84	2,84	14	2,58	2,58	27	2,56	2,62
3	2,57	2,52	15	2,61	2,64	28	2,63	2,68
5	2,62	2,60	16	2,58	2,64	32	2,43	2,51
6	2,53	2,53	17	2,70	2,69	33	2,63	2,70
7	2,71	2,70	18	2,79	2,80	34	2,65	2,71
8	2,51	2,52	19	2,74	2,78	35	2,67	2,77
10	2,81	2,82	20	2,84	2,86	36	2,45	2,52
11	2,75	2,75	21	2,41	2,44	37	2,73	2,82
13	2,50	2,53	22	2,61	2,63	38	2,77	2,90
			23	2,51	2,50	39	2,49	2,57
						40	2,57	2,67
5A	2,22	2,22	1A	2,16	2,09	10A	2,18	2,23
6A	2,22	2,22	2A	2,23	2,25	11A	2,28	2,32
7A	2,18	2,18	3A	2,26	2,21	12A	2,27	2,25

Tabelle 13: Vergleich der Ultraschallgeschwindigkeiten vor und nach der jeweiligen Behandlung

Die Ergebnisse dieser Tabelle sind mit Ausnahme der mit Kalkwasser behandelten Proben nicht signifikant. Hierzu sollte angemerkt werden, dass die Messwerte bei der Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit sehr stark streuen. So kann die Laufzeit einer Ultraschallwelle durch denselben Stein nach erneutem Einspannen an derselben Messstelle um bis zu  $3,14\mu\text{s}$  abweichen, was zu einer Veränderung der Ultraschallgeschwindigkeit um etwa  $0,08\text{km/s}$  führt. Für die folgende Tabelle 14 wurden die jeweiligen Probekörper in die Presse eingespannt und der Messwert abgelesen. Dieser Vorgang des Einspannens und Ablesens wurde für jeden Probekörper an derselben Messstelle 5 mal wiederholt.

Probe Nr.	2A	3A	5A	7A	11A	12A
h [mm]	200	198	199	200	200	198
Messwerte für R1 [ $\mu\text{m}$ ]	89,6	87,8	90,2	91,7	86,0	86,2
	88,9	89,7	89,5	91,8	86,2	89,8
	88,2	90,1	89,8	91,7	89,5	85,3
	88,5	90,2	89,0	91,9	85,0	89,2
	88,5	90,0	89,4	92,0	85,1	89,0
Mittelwert [ $\mu\text{m}$ ]	88,74	89,56	89,58	91,82	86,36	87,9
v [km/S] für Richtung R1	2,23	2,26	2,21	2,18	2,33	2,30
	2,25	2,21	2,22	2,18	2,32	2,20
	2,27	2,20	2,22	2,18	2,23	2,32
	2,26	2,20	2,24	2,18	2,35	2,22
	2,26	2,20	2,23	2,17	2,35	2,22
Mittelwert [ $\mu\text{m}$ ]	2,25	2,21	2,22	2,18	2,32	2,25
jeweilige Abweichung vom Mittelwert [km/s]	0,022	0,044	0,015	0,003	0,009	0,043
	0,004	0,004	0,002	0,000	0,003	0,049
	0,014	0,013	0,005	0,003	<b>0,082</b>	0,068
	0,006	0,016	0,014	0,002	0,036	0,034
	0,006	0,011	0,004	0,004	0,033	0,029

*Tabelle 14: Ultraschallmessergebnisse für die Probekörper 2A, 3A, 5A, 11A, 12A an jeweils demselben Messpunkt*

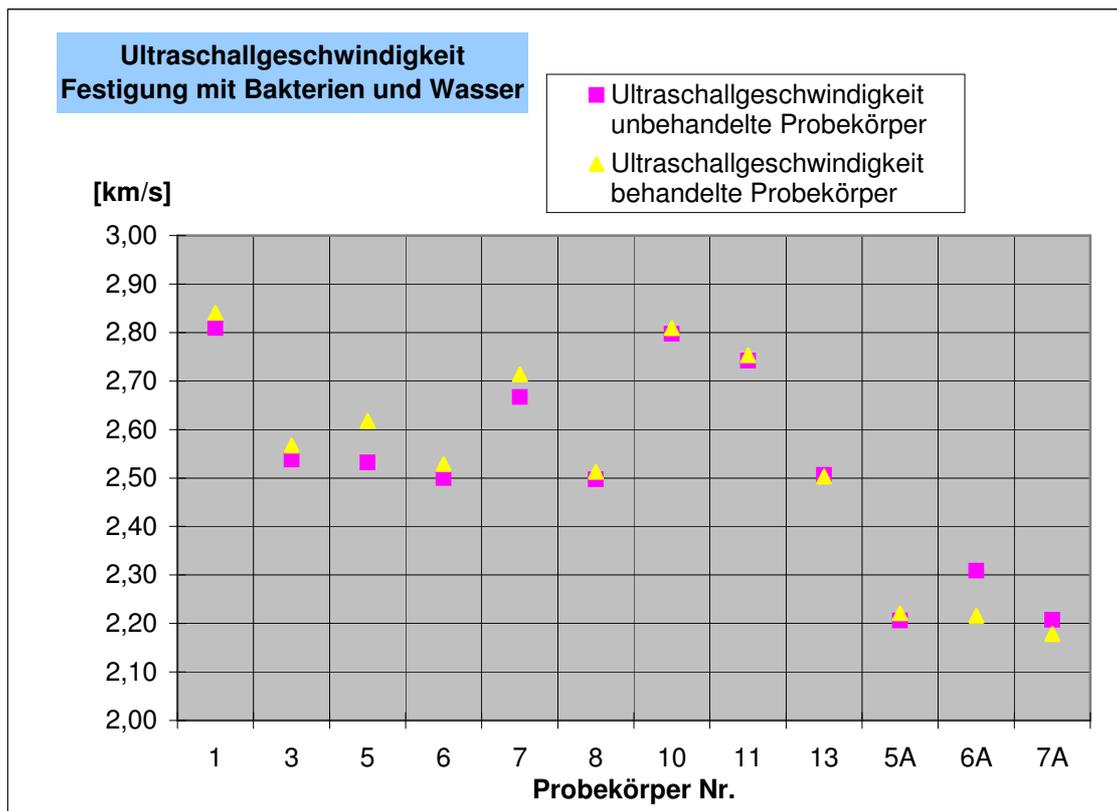


Diagramm 29: Ultraschallgeschwindigkeit der Probekörper gemessen an der längsten Distanz vor und nach der Festigung mit Bakterien und Wasser

Die Untersuchung der Ultraschallgeschwindigkeit an den mit Wasser und Bakterien behandelten Proben zeigt bei den Prismen eher die Tendenz einer leichten Zunahme der Geschwindigkeit von im Durchschnitt 2,62km/s auf 2,64km/s, also um 0,02km/s. Das sind 0,91%. Bei den zylindrischen Probekörpern zeigt sich jedoch eher das Gegenteil: die Abnahme der Ultraschallgeschwindigkeit von im Durchschnitt 2,24km/s auf 2,20km/s, also um durchschnittlich 0,04km/s weniger. Dies bedeutet eine Abnahme der Geschwindigkeit um etwa 1,59%.

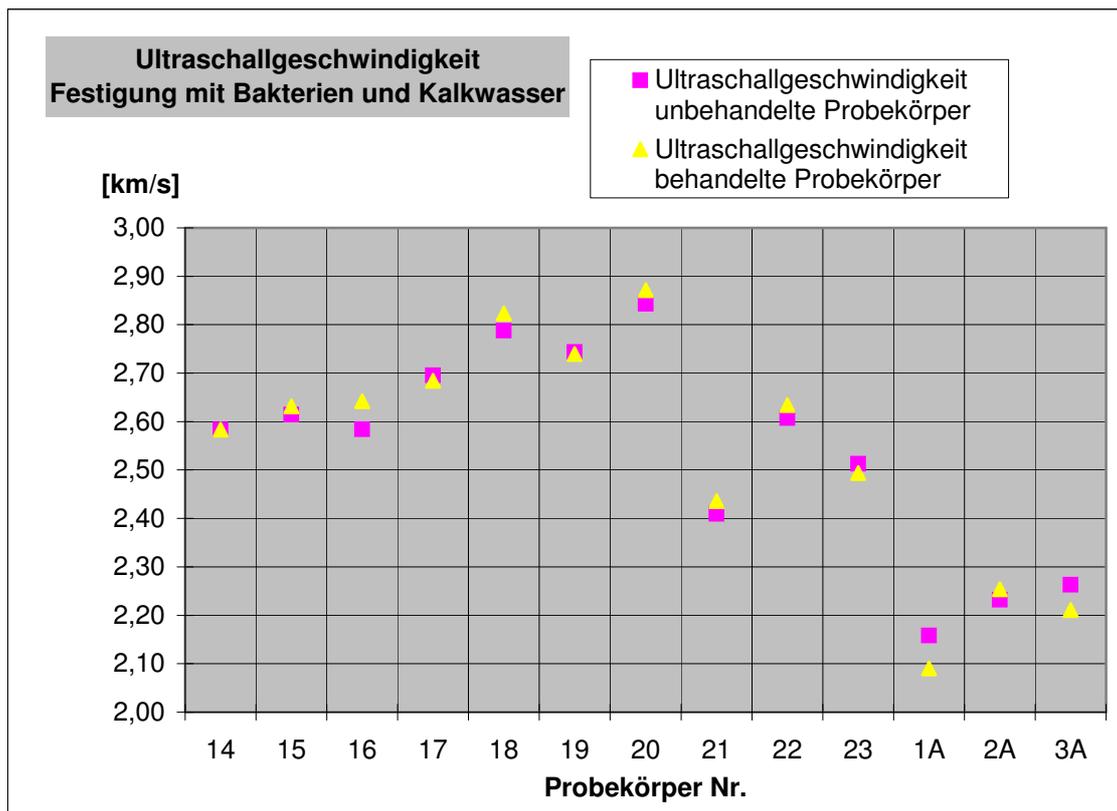


Diagramm 30: Ultraschallgeschwindigkeit der Probekörper gemessen an der längsten Distanz vor und nach der Festigung mit Bakterien und Kalkwasser

Die Untersuchung der Ultraschallgeschwindigkeit an den mit Kalkwasser und Bakterien behandelten Proben zeigt bei den Prismen eher die Tendenz einer leichten Zunahme der Geschwindigkeit von im Durchschnitt 2,64km/s auf 2,66km/s, also um 0,02km/s. Das sind 0,70%. Bei den zylindrischen Probekörpern zeigt sich eher das Gegenteil: die Abnahme der Ultraschallgeschwindigkeit von im Durchschnitt 2,22km/s auf 2,19km/s, also um durchschnittlich 0,03km/s weniger. Dies bedeutet eine Abnahme der Geschwindigkeit um etwa 1,48%.

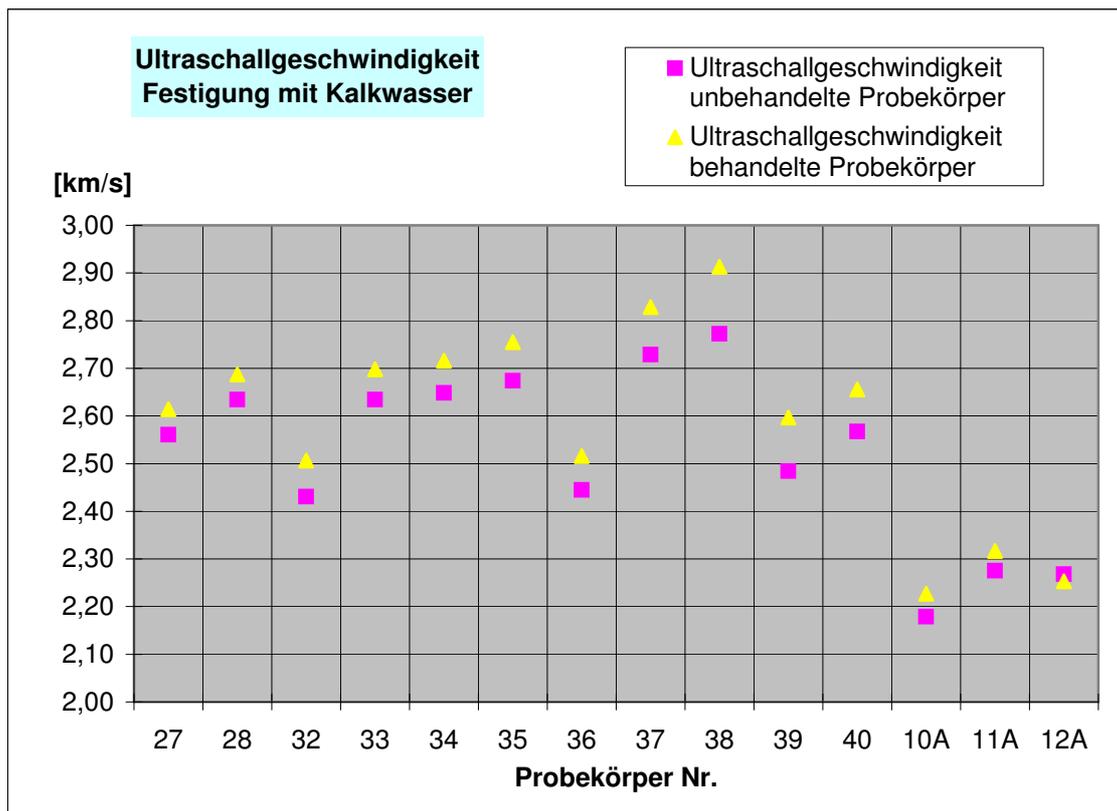


Diagramm 31: Ultraschallgeschwindigkeit der Probekörper gemessen an der längsten Distanz vor und nach der Festigung mit Kalkwasser

Die Untersuchung der Ultraschallgeschwindigkeit an den mit Kalkwasser behandelten Proben zeigt bei den Prismen eine leichte Zunahme der Geschwindigkeit von im Durchschnitt 2,60km/s auf 2,68km/s, also um 0,08km/s. Das sind 3,07%. Im Unterschied zu den vorherigen Untersuchungsergebnissen, zeigt sich hier eine eindeutige, wenn auch geringe Tendenz. Bei den zylindrischen Probekörpern zeigt sich wiederum eine rein rechnerische Zunahme der Ultraschallgeschwindigkeit von im Durchschnitt 2,24km/s auf 2,27km/s, also um durchschnittlich 0,03km/s weniger. Dies bedeutet eine Zunahme der Geschwindigkeit um etwa 1,12%.

## 4.7 Biegezugfestigkeit an Prismen

Bei den Versuchen zur Biegezugfestigkeit konnten folgende Ergebnisse festgehalten werden:

PRISMEN					
Probe Nr.	$\sigma_{BZ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Probe Nr.	$\sigma_{BZ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Probe Nr.	$\sigma_{BZ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	2,82	14	1,68	27	2,88
3	1,94	15	2,73	28	1,79
5	k.E.	16	3,07	32	2,32
6	2,18	17	2,68	33	k.E.
7	2,53	18	2,24	34	3,60
8	2,74	19	3,27	35	3,19
10	3,25	20	1,78	36	2,31
11	2,23	21	1,56	37	3,00
13	2,02	22	1,99	38	1,59
		23	2,29	39	2,25
				40	2,45
				25	k.E.
				26	k.E.
				41	0,42
				43	2,36
				46	1,94
				48	2,37
				49	2,51
				50	2,24
				51	4,19
				52	2,82
				54	1,79

Tabelle 15: Biegezugfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>] an Prismen

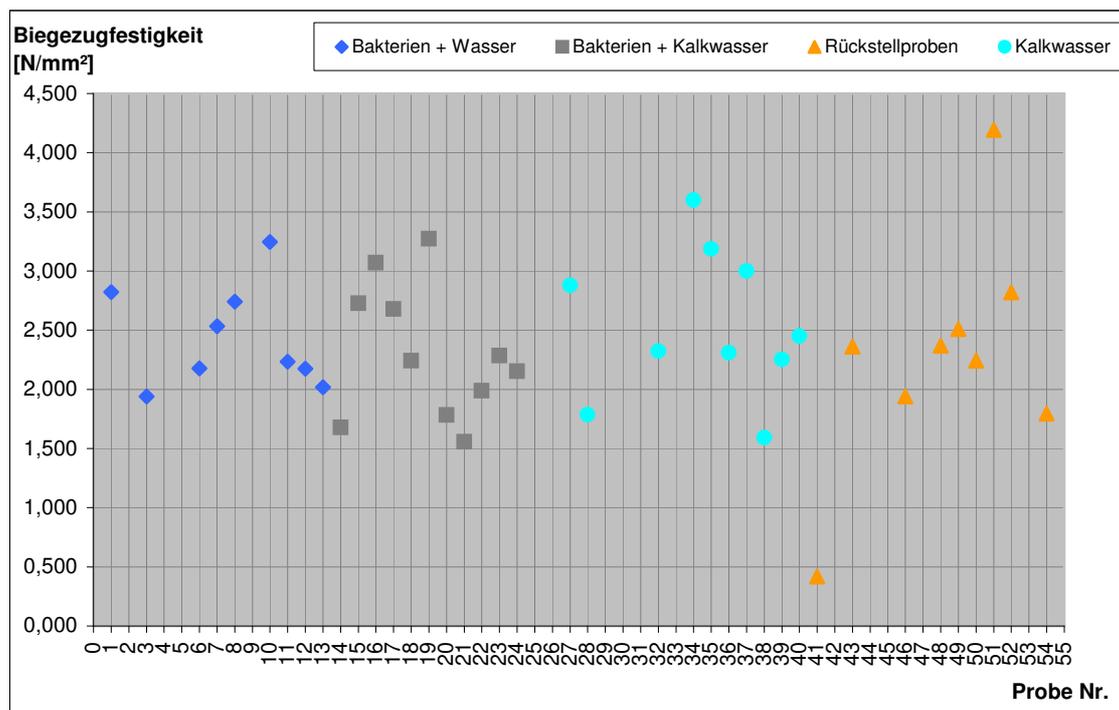


Diagramm 32: Biegezugfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>] an Prismen

Die Versuche zur Biegezugfestigkeit an den Prismen ergaben bei den mit Kalkwasser behandelten Proben einen durchschnittlichen Wert der Biegezugfestigkeit von 2,538 N/mm<sup>2</sup>, wobei die Standardabweichung bei 0,594 N/mm<sup>2</sup> lag.

Für die mit Bakterien und Wasser behandelten Proben lag die Biegezugfestigkeit bei im Mittel 2,432 N/mm<sup>2</sup> mit einer Standardabweichung von 0,409 N/mm<sup>2</sup>.

Die Biegezugfestigkeit der mit Bakterien und Kalkwasser behandelten Prismen lag bei durchschnittlich 2,312 N/mm<sup>2</sup>, die Standardabweichung bei 0,539 N/mm<sup>2</sup>.

Die im Durchschnitt kleinsten Werte erreichten die unbehandelten Probekörper, deren mittlere Biegezugfestigkeit bei 2,294 N/mm<sup>2</sup> lag. Die Standardabweichung liegt hier wegen zweier großer Ausreißer bei 0,933 N/mm<sup>2</sup>.

Es liegen also keine signifikanten Unterschiede vor. Es ist dabei zu beachten, dass wie in Diagramm 32 ersichtlich, die Ergebnisse sehr stark streuen. Die Biegezugfestigkeit bei Naturwerkstoffen ist allerdings von vorne herein einer großen Streuung unterworfen.

### 5.1 Prismen

#### Rohdichte:

Betrachten wir zunächst die Ergebnisse der Rohdichteuntersuchungen. Die Werte der Probekörper vor und nach der Behandlung mit Bakterien und Wasser, Bakterien und Kalkwasser sowie Kalkwasser alleine, weisen nur geringe bis kaum messbare Veränderungen auf. Durch den Vergleich der Rohdichte lassen sich in diesem Fall also keine Rückschlüsse auf die Veränderungen im Gefüge ziehen.

#### Wasseraufnahme:

Beziehen wir aber die Ergebnisse der Untersuchungen zur Wasseraufnahme mit ein, so zeigt sich ein etwas anderes Bild. Hierbei zeigt sich bei den meisten Probekörpern sehr wohl eine verringerte Wasseraufnahme nach der jeweiligen Behandlung. Im Detail ergibt sich bei der Behandlung mit Bakterien und Kalkwasser eine prozentuelle Abnahme von im Mittel 1,34 %, die mit Bakterien und Wasser behandelten Probekörper zeigen eine prozentuelle Abnahme von 1,47% und bei der dritten Methode mit Kalkwasser alleine sogar eine prozentuelle Abnahme der Wasseraufnahme von 2,04%. Diese Ergebnisse im Zusammenhang mit der geringfügig veränderten Rohdichte, könnten auf eine Veränderung der Porenstruktur der Probekörper schließen lassen.

#### Ultraschallmessungen:

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Ultraschallgeschwindigkeit. Die mit 1,98% stärkste prozentuelle Erhöhung ergibt sich auch hier bei den mit Kalkwasser behandelten Proben. Während bei den mit Wasser und Bakterien behandelten Probekörpern noch ein prozentueller Anstieg von 0,91% festzustellen ist, beträgt die Zunahme der Ultraschallgeschwindigkeit bei den mit Kalkwasser und Bakterien behandelten nur 0,70%. Diese, wenn auch geringe, Zunahme der Geschwindigkeit würde ebenfalls die zuvor getroffene Aussage unterstützen.

### Biegezugfestigkeit:

Letztendlich zeigt sich auch beim Vergleich der Biegezugfestigkeit ein ähnliches Bild. Die mittlere Biegezugfestigkeit der mit Kalkwasser behandelten Proben liegt bei  $2,54 \text{ N/mm}^2$ . Bei den mit Bakterien und Wasser behandelten Prismen beträgt sie  $2,43 \text{ N/mm}^2$  und bei denen mit Bakterien und Kalkwasser  $2,31 \text{ N/mm}^2$ . Den geringsten Wert weisen die unbehandelten Referenzproben mit  $2,29 \text{ N/mm}^2$  auf.

Zusammenfassend gesagt, zeigen sich die deutlichsten Tendenzen bei den mit Kalkwasser behandelten Probekörpern, wenn auch die Veränderungen an sich nicht sehr groß erscheinen. Die Ergebnisse zur Festigung mit Bakterien und Wasser, sowie mit Bakterien und Kalkwasser fallen nicht so deutlich aus. Hier sind zwar ebenso Tendenzen einer Konsolidierung feststellbar, doch liegen die Messwerte von vor und nach der jeweiligen Behandlung wesentlich näher beisammen.

## **5.2 Zylinder**

Ein tendenziell ähnliches Ergebnis liefern auch die zylindrischen Proben. Die Schwierigkeit bei der genauen Auswertung liegt hier allerdings in der geringen Anzahl der Probekörper, die zur Verfügung standen. Eine eindeutige Aussage lässt sich somit nicht wirklich festmachen, da sich mit jeweils 3 Proben, die zum Teil tendenziell auseinander liegen, keine statistisch haltbaren Angaben machen lassen.

## 6 DISKUSSION UND AUSBLICK

Insgesamt stellt sich aber die Frage, welche Schlüsse sich wirklich aus diesen Ergebnissen ziehen lassen. Die Veränderungen an den Probekörpern liegen durchaus in einem messbaren Bereich. Inwieweit sind diese jedoch aussagekräftig? Ist es mit diesen Methoden überhaupt möglich den Nachweis einer gelungenen Festigung zu erbringen?

Betrachten wir im speziellen die Ergebnisse der Ultraschallmessungen. Hier waren die Differenzen der Messergebnisse vor und nach der Behandlung mit den jeweiligen Applikationsflüssigkeiten geringer als die in Tabelle 14 dargestellte Variation der Messergebnisse an ein und derselben Messstelle an einem Probekörper. Allerdings zeigen die Ergebnisse bei der Festigung mit Kalkwasser eine eindeutige, wenn auch geringe Tendenz zur Festigung des Gefüges.

Da auch bei KERNER (2005) starke Schwankungen der Messwerte- und ZEUGSWETTER (2008) -Schwankungen durch Fehlstellen im Probekörper-Probleme bei der Ultraschallmessung beschrieben werden, sollte die Verlässlichkeit dieser Methode bei inhomogenen Materialien wie Kalksandstein oder Kalkputzen in Frage gestellt werden. Allerdings bleibt der Diskussionspunkt offen, wie sich der durch die Bakterien gebildete Biofilm aus Zucker und Proteinen auf die Messergebnisse bei der Bestimmung der Ultraschallbestimmung auswirkt. In diesem Zusammenhang wären weiterführende Untersuchungen, die den Einfluss dieser durch die Bakterien gebildeten, extrazellulären polymeren Substanzen einbeziehen, sinnvoll.

Auch bei der PAS Färbung machen sich diese Inhomogenitäten im Gefüge bemerkbar. Betrachten wir z.B. Abbildung 8 oder Abbildung 31 ,so ist deutlich eine extreme Färbung ,und damit verbunden eine stärkere Besiedelung mit Bakterien, der poröseren Bereiche erkennbar. Ob diese Färbung auf die bakterielle Tätigkeit des *Bacillus cereus* zurückzuführen ist, oder durch die Stoffwechsellätigkeit anderer im Gestein vorhandener Bakterien verursacht wird, kann jedoch mit dieser Methode nicht geklärt werden. Allerdings war die Eindringtiefe bei der PAS Färbung mit ca. 5mm ein zufriedenstellendes Ergebnis.

Ähnliche Erfolge lagen auch bei KERNER (2005) vor. Bei späteren Arbeiten sollte auf die genaue Bestimmung der im Gestein befindlichen Bakterien vor und nach den Behandlungen näher eingegangen werden. Nur so ließe sich feststellen, welche Bakterien nun wirklich für die Reaktion bei der PAS Färbung verantwortlich sind.

Die Bestimmung der Rohdichte hingegen ist eine viel zu grobe Methode, um Veränderungen an den Prüfkörpern feststellen zu können. Man muss beachten, dass hier das Gewicht auf 1/10 g genau bestimmt wird, durch die Neubildung von Kalziumkarbonat in den Porenräumen aber keine Veränderungen in dieser Größenordnung zu erwarten sind.

Absolut unzureichende Ergebnisse liefert in dieser Arbeit die Bestimmung der Biegezugfestigkeit. In Diagramm 32 ist deutlich erkennbar, dass die Streuung der Ergebnisse viel zu groß ist, um eine Aussage treffen zu können. Es sollte jedoch angemerkt sein, dass die Methode an sich nicht ungenau ist, sondern die Einflüsse der Inhomogenität natürlicher Werkstoffe zu groß sind. Allerdings wird bereits bei JATZKO (2004) hinterfragt, ob es wirklich sinnvoll wäre, die Festigkeit soweit zu steigern, dass ein messbares Ergebnis erzielt werden würde. Das Ziel der Festigung mit den hier gewählten Methoden ist ja die Rückführung der Eigenschaften aus dem verwitterten in den ursprünglichen Zustand.

Ein Problem, das sich in früheren Arbeiten (ZEUGSWETTER, 2008) gezeigt hat ist die Hydrophobierung der Oberfläche infolge des durch die Bakterien erzeugten Biofilms. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Wasseraufnahmeverhaltensuntersuchungen haben diesen Effekt bei Aflenzer Kalksandstein nicht gezeigt. In den Diagramm 11 bis Diagramm 18 ist deutlich zu sehen, dass sich die Art und Weise, in der die Probekörper Wasser aufnehmen, nicht verändert hat. Lediglich in Diagramm 19 ist eine leichte Verzögerung der Wasseraufnahme der Probe 12A erkennbar. Diese wurde jedoch nur mit Kalkwasser behandelt. Eine hydrophobierende Wirkung der Festigung mit Kalkwasser wurde jedoch bei ZEUGSWETTER (2008) nicht festgestellt.

In diesem Zusammenhang sollen auch die Ergebnisse der Untersuchungen zum Wasserabgabeverhalten erwähnt sein. Hier zeigt sich eine leicht verzögerte Austrocknung an fast allen untersuchten Probekörpern. Eine Ausnahme bilden hier die Proben 11 (Diagramm 21- mit Bakterien und Wasser behandelt) und 17 (Diagramm 23- mit Kalkwasser behandelt). Hier zeigt sich keine wesentliche Veränderung des Wasserabgabeverhaltens.

Erneut stellt sich die Frage, welchen Einfluss der Biofilm auf das Wasseraufnahme- bzw. Wasserabgabeverhalten hat. Kann der Biofilm als Diffusionsbarriere wirken? Hierzu wäre in Zukunft die Durchführung von Wasserdampfdiffusionsabgabeversuchen anzuregen, um Veränderungen derselben durch den Biofilm festzustellen.

Schließlich wären in weiteren Untersuchungen auch noch Rasterelektronenmikroskopuntersuchungen (REM) wünschenswert, da sich so möglicherweise die neu gebildeten Kalziumkarbonate erkennen lassen.

Auch wenn die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen mit REM an Kalkputzen von KERNER (2005) und ZEUGSWETTER (2008) dort als schwer interpretierbar beschrieben werden, da es schwierig ist, festzustellen, welche Kristalle nun wirklich durch die Behandlung neu gebildet wurden, sind neue Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen am Aflenzer Kalksandstein nicht auszuschließen.

Im Zuge dieser Arbeit haben sich, wie bereits angemerkt, einige Untersuchungsmethoden als nicht zielführend dargestellt. Es bleiben einfach viele Fragen unbeantwortet, da sie mit den durchgeführten Analysen nicht hinreichend beantwortet werden konnten. Es ist nicht auszuschließen, dass die gemessenen Veränderungen durchaus Verbesserungen der Gefügeeigenschaften bedeuten. Das Problem lag nur darin, dass es mit den angewandten Prüfmethoden eben nicht eindeutig nachzuweisen war.

Für weitere Untersuchungen sollte der Schwerpunkt daher auf den zuvor angeregten und weiteren, für die jeweilige Fragestellung zielführendere, Betrachtungen liegen, da so einige bislang die Ergebnisse möglicherweise verfälschende Faktoren, wie zum Beispiel der Einfluss des Biofilms, ins rechte Licht gerückt werden könnten.

Abschließend muss festgehalten werden, dass Stein und speziell Sandstein als Baustoff unterschiedlichste Eigenschaften aufweisen kann. Für nahezu jeden Stein, also auch für jedes Bauwerk, müssten eigene Untersuchungen angestellt werden, um auf die speziellen Bedürfnisse genau dieses Baustoffes eingehen zu können. Die Möglichkeit einer schonenden Konservierung auf Dauer sollten diese Untersuchungen aber rechtfertigen.

## LITERATURVERZEICHNIS

BECKER, B. (2005)

Bacillus cereus, pathogene Mikroorganismen  
Behr, Hamburg

BIELEFELD, T. (2001)

Der Einfluss ausgewählter Reinigungsmaterialien auf den mikrobiellen Befall  
und die physikalischen Eigenschaften des mineralischen Untergrundes  
Diplomarbeit, FH – Hildesheim

BRILL H. (1995)

Mikrobielle Materialzerstörung und Materialschutz, Schädigungsmechanismen  
und Schutzmaßnahmen  
Fischer, Jena

BROCK T.D., MADIGAN M.T. (1995)

Biology of Microorganisms  
Prentice-Hall Internat., London

CALCITE 2000 (1999)

Product Description of a patented biomineralisationprocess  
CAÑAVÉRAS J.C., HOYOS, M., SANCHEZ-MORAL, S., SANZ-RUBIO, E., BEDOYA,  
J., SOLER, V., GROTH, I., SCHUHMANN, P., LAIZ, L., GONZALEZ, I., & SAIZ-  
JIMENEZ, C.

CASTANIER, S. (1987)

Microbiogéologie: Processus et Modalités de la Carbonatogenèse Bactérienne.  
Doktorarbeit, Universität von Nantes. (aus H.v.Knorre & W.E.Krumbein, 2000)

CASTANIER S., G. LE MÉTAYER-LEVREL, G. ORIAL, J.F. LOUBIÈRE & J.P. PERTHUISOT. (2000)

Bacterial carbonatogenesis and applications to preservation and restoration of historic property. In O. Ciferri, P. Tiano und G. Mastromei: Of Microbes and Art: The Role of Microbial communities in the Degradation and Protection of Cultural Heritage.

Plenum, p. 201-216, New York.

CASTANIER S., G. LE MÉTAYER-LEVREL, J.F. LOUBIÈRE & J.P. PERTHUISOT. (1999)

Ca-carbonates and limestone genesis – the microbiologist point of view. Sediment Geol.126: 9-23.

CHARTA VON VENEDIG (1964/1989)

Internationale Charta über die Konservierung und Restaurierung von Denkmälern und Ensembles (Denkmalbereiche), Charta von Venedig, deutsche Übersetzung auf Grundlage des französischen und englischen Originaltextes, Aufgestellt 1964, deutsche Übersetzung 1989

Ins Deutsche übersetzt durch Bacher E., Deiters L., Petzet M., Wyss A. (1989)

ETTL H., WENDLER E. (2005)

Strukturelle Putzfestigung mit Kalkwasser? – Grenzen und Alternativen

Erschienen in: Beiträge zur Erhaltung von Kunst- und Kulturgut, Nr. 1, 2005, S.129-133

FLEISCHER G. (2001)

Strukturelle Festigung von St. Margarethener Kalksandstein (Burgenland) und deren Auswirkung auf die gesteinsphysikalischen Eigenschaften

Diplomarbeit, TU - Wien

FLEISCHER G. (2002)

Beurteilung von Ultraschalluntersuchungen an Natursteinobjekten in der  
Denkmalpflege

Dissertation, TU - Wien

FLEISCHER G., NIMMRICHTER J., ROHATSCH A. (2006)

Konservierung von Natursteinobjekten in der Denkmalpflege mit begleitenden  
Untersuchungen anhand von Fallbeispielen

Europäischer Sanierungskalender 2006 für Holz- und Bautenschutz in  
Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege

Hrsg. Helmuth Venzmer

GROBE J., BOOS M., WOLKE A., ZEINE CH. (2001)

Schutz von Steinoberflächen durch Applikation elastischer Kieselsäure-Ester –  
Bilanz eines DBU-Projektes

In Natursteinkonservierung – Grundlagen, Entwicklungen und Anwendungen  
Aedificatio Verlag, Freiburg

GSCHEIDER F. (2002)

Laboruntersuchungen zur Salzkristallisation an Festgestein

Diplomarbeit, TU - Wien

JATZKO M. (2004)

Strukturelle Festigung von St. Margarethner Kalksandstein, Aflenzer  
Kalksandstein sowie Flyschsandstein und deren Auswirkung auf die  
gesteinsphysikalischen Eigenschaften

Diplomarbeit, TU - Wien

KALK KONTOR

[http://www.kalk-kontor.de/media/ti\\_kalkschlaemme.pdf](http://www.kalk-kontor.de/media/ti_kalkschlaemme.pdf)

KERNER C. (2005)

Konsolidierung von historischen Kalkputzen mit Kalkwasser und Bakterien  
Diplomarbeit, TU – Wien

KIESLINGER A. (1932)

Zerstörung an Steinbauten, ihre Ursachen und ihre Abwehr. -  
Leipzig und Wien (Franz Deuticke)

KIESLINGER A. (1951)

Gesteinskunde für Hochbau und Plastik  
(Gewerbeverlag) Wien

KIESLINGER A. (1979)

Steinkonservierung und Steinrestaurierung  
Erschienen in: Restauratorenblätter Band 3  
Hrsg. Österreichische Sektion des IIC (International Institute for Conservation)

KUNSTLEXIKON (1996)

Hrsg. Hartman P.W.,  
Wien

LE MÉTAYER-LEVREL G., S. CASTANIER, G. ORIAL, J.F. LOUBIÈRE UND  
J.P.PERTHUISOT. (1999)

Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of  
limestones in buildings and historic patrimony.  
Sedimentary Geology 126:25-34.

MAY E. (2004)

BIOremediation for building Restoration of the Urban Stone Heritage  
(BioBRUSH)  
EC-Clustering Workshop 22-23 April 2004

ORIAL G., S. CASTANIER G., LE MÉTAYER-LEVREL & J.F. LOUBIÈRE. (1993)

The biomineralization: a new process to protect calcareous stone applied to historic monuments. p. 98-116. In H. Ktoishi, T. Arai, and K. Yamano, Proceedings of the 2nd International Conference on Biodeterioration of Cultural Property.

International Communications Specialists, Tokyo, Japan.

PLASS N. (1988)

Bericht 1988 über geologische Aufnahmen im Tertiär auf Blatt 207 Arnfels

Erschienen in: Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, 132/3, Wien. S. 623-624, 1989.-

RODRIGUEZ-NAVARRO C., RODRIGUEZ-GALLEGO M., CHEKROUN K.B., GONZALES-MUÑOZ M. T.(2002)

Conservation of Ornamental Stone by *Myxococcus xanthus*- Induced Carbonate Biomineralization

Applied and Environmental Microbiology, p. 2182-2193

ROHATSCH, A. (2005)

Neogene Bau- und Dekorgesteine - charakteristische Schadensbilder und Schadensursachen. - [in:]: SCHWAIGHOFER, B. & EPPENSTEINER, W. (Hrsg.): Reihe: Nutzbare Gesteine von Niederösterreich und Burgenland, Band: „Junge“ Kalke, Sandsteine und Konglomerate - Neogen. - Mitteilungen IAG BOKU, Wien.

SAUDER M., SCHLOENBACH R. (1995)

Schäden an Außenmauerwerk aus Naturstein

IRB Verlag, Stuttgart

SNETHLAGER. (2005)

Leitfaden Steinkonservierung

IRB Verlag, Stuttgart

STERFLINGER K. (2005)

Allgemeine Mykologie, Übungen SS2005

Vorlesungsunterlagen, BOKU, ACBR

STERFLINGER K., SERT H. (2006)

Biodeterioration and practice of restauration

In The Materials of Cultural Heritage in their Environment Edipuglia, Bari 2006

STUMM W., MORGAN J.J. (1996)

Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria And Rates In Natural Waters

John Wiley & Son, Inc. New York

WEINER S., DOVE P. M. (2003)

An Overview of Biomineralization Processes and the Problem of the Vital Effect

Department of Structural Biology Weizmann Institute of Science &

Department of GeoSciences Virginia Tech

WOLF D. (1988)

Bericht über geologische Aufnahmen im kristallinen Grundgebirge auf Blatt 207

Arnfels, Geologische Bundesanstalt

ZEUGSWETTER E. (2008)

Strukturelle Festigung von historischen Putzen

Diplomarbeit, TU - Wien

## VERWENDETE NORMEN

ÖNORM EN 1936 – Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität, 01.02.2007

ÖNORM EN 13755 – Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck, 01.07.2008

ÖNORM EN 12372 – Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Biegezugfestigkeit unter Mittellinienlast, 01.02.2007.

ÖNORM EN 14579 – Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Geschwindigkeit der Schallausbreitung, 01.01.2005.

## ANHANG

Bestimmung der Wasseraufnahme für die Probenauswahl der prismatischen Probekörper Vgl. Tabelle 2				
Probe Nr	$m_i$ [g]	$m_f$ [g]	$w$ [%]	
1	552,3	615,1	11,37	
2	558,4	637,1	14,09	
3	555,7	632,7	13,86	
4	603,8	655,9	8,63	
5	560,9	632,6	12,78	
6	555,8	627,8	12,95	
7	548,9	617,7	12,53	
8	544,2	618	13,56	
9	699,8	728	4,03	
10	548,6	614,1	11,94	
11	551,7	618,2	12,05	
12	539,9	613,5	13,63	
13	551	625,8	13,58	
14	534,6	603	12,79	
15	569,2	644,3	13,19	
16	575,9	649,2	12,73	
17	568,1	642,7	13,13	
18	551,9	617,3	11,85	
19	548,7	615,6	12,19	
20	571,1	637,8	11,68	
21	544,7	622,9	14,36	
22	630,6	710,6	12,69	
23	547,1	622	13,69	
24	526,5	598,6	13,69	
25	570	646,6	13,44	
26	559,9	626,9	11,97	
27	549,2	618	12,53	
28	542,6	610,3	12,48	
29	604,7	655,2	8,35	
30	590,2	640,2	8,47	
31	616,1	652,2	5,86	
32	537,2	613	14,11	
33	524,9	585,2	11,49	

34	612,1	686	12,07
35	552,3	616,6	11,64
36	556	633,9	14,01
37	559,1	631,1	12,88
38	554,2	615,1	10,99
39	539,2	609,3	13
40	621,3	700,7	12,78
41	543,9	619,3	13,86
42	588,8	647,3	9,94
43	559,2	631,7	12,96
44	603,5	645,8	7,01
45	573,9	628,7	9,55
46	541,5	618,6	14,24
47	621,5	659,1	6,05
48	565,8	642,6	13,57
49	551,5	622,5	12,87
50	549,4	628,7	14,43
51	549,3	613,7	11,72
52	542,2	624,1	15,11
53	685,2	723	5,52
54	555,3	628,6	13,2

Bestimmung Ultraschallgeschwindigkeit für die Probenauswahl														
Vgl. Tabelle 2														
An den prismatischen Probekörpern														
Probe Nr.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Abmessungen [mm]	h	200,0	201,0	201,0	200	200,0	200,0	200,0	200,0	200	200,0	201,0	201,0	200,0
	b R2,1	40,7	40,3	39,8	40,2	39,9	40,1	40,4	40,0	40,4	40,3	40,4	40,5	40,4
	b R2,2	40,7	40,3	40,1	40,2	39,8	40,1	40,4	40,1	40,3	40,4	40,5	40,5	40,4
	b R2,3	40,8	40,3	40,1	40,2	39,5	40,1	40,4	40,1	40,1	40,4	40,4	40,4	40,4
	b R3,1	40,3	40,4	40,6	40,8	40,6	40,4	41,1	40,5	40,3	40,0	40,2	40,0	40,2
	b R3,2	40,4	40,4	40,6	40,9	40,6	40,3	40,9	40,5	40,4	40,1	40,2	39,9	40,2
	b R3,3	40,3	40,4	40,6	40,9	40,7	40,4	40,2	40,5	40,4	40,2	40,2	40,0	40,1
Laufzeit [µs] 1. Mesung	R1	67,4	84,1	74,3	60,5	73,6	76,6	72	74,3	49,1	69,3	69	74	75,6
	R2,1	13,9	15,4	16,2	13,3	14,6	14,4	13,6	13,6	9,2	13,2	13,8	14,1	13,5
	R2,2	13,6	15,6	13,2	11,9	14,2	13,8	13,3	14,8	9,1	13,6	14,3	14,4	13,8
	R2,3	13,5	16,1	13,7	10,9	13,3	14,6	13,8	13,9	9,4	12,9	12,4	14	13,4
	R3,1	13,6	12,6	14	13,2	12,1	13,3	12,8	14,2	9,4	13,4	14,6	14,8	15,7

	R3,2	13,9	13,2	13	10,4	12,9	12,8	13,3	15,1	9,6	13,3	14,3	14,9	14,4
	R3,3	13,5	14,5	13,2	9,6	11,8	12,8	13,3	14,5	10,2	13,6	12,4	14,9	14,5
Geschwindigkeit [km/s] 1. Messung	vh	2,97	2,39	2,71	3,31	2,72	2,61	2,78	2,69	4,07	2,89	2,91	2,72	2,65
	v R2,1	2,93	2,62	2,46	3,02	2,73	2,78	2,97	2,94	4,39	3,05	2,93	2,87	2,99
	v R2,2	2,99	2,58	3,04	3,38	2,80	2,91	3,04	2,71	4,43	2,97	2,83	2,81	2,93
	v R2,3	3,02	2,50	2,93	3,69	2,97	2,75	2,93	2,88	4,27	3,13	3,26	2,89	3,01
	v R3,1	2,96	3,21	2,90	3,09	3,36	3,04	3,21	2,85	4,29	2,99	2,75	2,70	2,56
	v R3,2	2,91	3,06	3,12	3,93	3,15	3,15	3,08	2,68	4,21	3,02	2,81	2,68	2,79
	v R3,3	2,99	2,79	3,08	4,26	3,45	3,16	3,02	2,79	3,96	2,96	3,24	2,68	2,77
	Mittelwert	2,97	2,74	2,89	3,53	3,02	2,91	3,00	2,79	4,23	3,00	2,96	2,76	2,81

<b>Bestimmung Ultraschallgeschwindigkeit für die Probenauswahl</b>														
<b>Vgl. Tabelle 2</b>														
<b>An den prismatischen Probekörpern</b>														
<b>Probe Nr.</b>		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Abmessungen [mm]	h	201,0	200,0	200,0	200,0	201,0	200,0	201,0	200,0	201,0	200,0	200,0	201,0	200,0
	b R2,1	40,1	40,6	40,5	40,6	40,2	40,6	40,3	41,1	45,5	40,4	40,4	41,0	40,0
	b R2,2	40,1	40,6	40,5	40,6	40,2	40,6	40,4	41,3	45,8	40,4	40,4	41,2	40,0
	b R2,3	40,1	40,6	40,5	40,6	40,3	40,6	40,4	41,4	45,6	40,4	40,4	41,0	40,0
	b R3,1	40,4	40,7	41,8	41,6	40,4	40,7	41,2	40,7	40,2	40,2	39,9	40,5	40,3
	b R3,2	40,4	41,1	41,6	41,7	40,5	40,5	41,5	40,7	40,2	40,3	39,9	40,5	40,3
	b R3,3	40,4	41,5	41,5	41,7	40,4	40,0	41,5	40,7	40,1	40,3	39,8	40,5	40,3
Laufzeit [ $\mu$ s] 1. Messung	R1	73,4	71,8	72,3	70,7	68,4	69	66,6	79,3	70	75,2	76,6	72,3	68,8
	R2,1	15,1	15,8	13	15,3	13,2	13,5	13	15,5	15,3	13,7	14,1	14,5	14
	R2,2	13,9	15,4	13,4	13,8	13,4	13,1	13	16,5	17	13,6	12,4	14,4	12,6
	R2,3	12,9	15,1	13,4	13	13	14,4	13,4	15,8	15,5	13,9	13,6	14	13,7
	R3,1	13,8	15,2	14,1	14,3	12,5	13,6	12,6	15,8	13,5	14,4	14,3	13	13,7
	R3,2	13,8	15,3	14	14	13,3	13,3	12,9	17,7	13,4	15,2	14,2	13,9	13,1
	R3,3	15,5	14,8	14,2	13,6	12,5	13,7	14,3	16,1	13,5	14,8	15	13,4	13,9
Geschwindigkeit [km/s] 1. Messung	vh	2,74	2,79	2,77	2,83	2,94	2,90	3,02	2,52	2,87	2,66	2,61	2,78	2,91
	v R2,1	2,66	2,57	3,12	2,65	3,05	3,01	3,10	2,65	2,97	2,95	2,87	2,83	2,86
	v R2,2	2,88	2,64	3,02	2,94	3,00	3,10	3,11	2,50	2,69	2,97	3,26	2,86	3,17
	v R2,3	3,11	2,69	3,02	3,12	3,10	2,82	3,01	2,62	2,94	2,91	2,97	2,93	2,92
	v R3,1	2,93	2,68	2,96	2,91	3,23	2,99	3,27	2,58	2,98	2,79	2,79	3,12	2,94
	v R3,2	2,93	2,69	2,97	2,98	3,05	3,05	3,22	2,30	3,00	2,65	2,81	2,91	3,08
	v R3,3	2,61	2,80	2,92	3,07	3,23	2,92	2,90	2,53	2,97	2,72	2,65	3,02	2,90
	Mittelwert	2,84	2,69	2,97	2,93	3,08	2,97	3,09	2,53	2,92	2,81	2,85	2,92	2,97

<b>Bestimmung Ultraschallgeschwindigkeit für die Probenauswahl</b>															
<b>Vgl. Tabelle 2</b>															
<b>An den prismatischen Probekörpern</b>															
<b>Probe</b>															
<b>Nr.</b>		27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Abmessungen [mm]	h	200,0	201,0	201	201	201	201,0	201,0	201,0	200,0	200,0	200,0	201,0	201,0	200,0
	b R2,1	40,1	40,4	40,3	40,8	40,5	40,2	40,2	40,6	41,1	40,2	40,0	40,4	40,2	45,2
	b R2,2	40,2	40,4	40,2	40,8	40,4	40,3	40,1	40,6	41,1	40,2	40,0	40,4	40,2	45,6
	b R2,3	40,1	40,4	40,2	40,8	40,5	40,3	40,2	40,6	41,2	40,2	40,0	40,4	40,2	45,7
	b R3,1	40,7	40,5	40,2	40,1	39,9	40,6	40,2	45,0	40,7	40,4	40,3	40,5	40,2	40,5
	b R3,2	40,5	40,5	40,1	40,1	39,9	40,6	40,1	45,2	40,7	40,5	40,3	40,5	40,2	40,5
	b R3,3	40,5	40,5	40,1	40,2	40,1	40,6	40,0	45,2	40,6	40,5	40,3	40,5	40,2	40,5
Laufzeit [μs] 1. Messung	R1	73,6	71,5	58,6	60,7	54,8	78,8	72,2	72,6	70	76,8	68,9	66,8	73,5	71,2
	R2,1	13,8	14	9,2	13,6	10,3	15,6	15,4	14,1	13,2	14,8	13,8	13,7	13,2	15,4
	R2,2	13,3	13,9	10,7	12,3	11,5	15,3	13,9	13,4	13,5	15,6	14,4	14,3	13,8	16,7
	R2,3	13,7	13,7	13,8	11,4	11,5	15,3	14,2	13,4	13	15,9	13,8	12,7	13,8	15,4
	R3,1	14,6	14,8	10,1	13,7	10,1	14,8	16,5	14,3	13,1	13,8	14	12,6	14,1	13,9
	R3,2	13,5	15,4	10,8	12,9	10,9	14,4	13,8	15,1	12,6	14,7	14,5	13,6	13,6	13,7
	R3,3	13,8	14,3	13,9	12,6	12,3	15	13,7	15,6	14,8	14,1	13,7	13	14,4	12,9
Geschwindigkeit [km/s] 1. Messung	vh	2,72	2,81	3,43	3,31	3,67	2,55	2,78	2,77	2,86	2,60	2,90	3,01	2,73	2,81
	v R2,1	2,91	2,89	4,38	3,00	3,93	2,58	2,61	2,88	3,11	2,72	2,90	2,95	3,05	2,94
	v R2,2	3,02	2,91	3,76	3,32	3,51	2,63	2,88	3,03	3,04	2,58	2,78	2,83	2,91	2,73
	v R2,3	2,93	2,95	2,91	3,58	3,52	2,63	2,83	3,03	3,17	2,53	2,90	3,18	2,91	2,97
	v R3,1	2,79	2,74	3,98	2,93	3,95	2,74	2,44	3,15	3,11	2,93	2,88	3,21	2,85	2,91
	v R3,2	3,00	2,63	3,71	3,11	3,66	2,82	2,91	2,99	3,23	2,76	2,78	2,98	2,96	2,96
	v R3,3	2,93	2,83	2,88	3,19	3,26	2,71	2,92	2,90	2,74	2,87	2,94	3,12	2,79	3,14
	Mittelwert	2,90	2,82	3,58	3,20	3,64	2,67	2,77	2,96	3,04	2,71	2,87	3,04	2,89	2,92

<b>Bestimmung Ultraschallgeschwindigkeit für die Probenauswahl</b>															
<b>Vgl. Tabelle 2</b>															
<b>An den prismatischen Probekörpern</b>															
<b>Probe</b>															
<b>Nr.</b>		41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Abmessungen [mm]	h	200,0	201	200,0	200	200	201,0	200	200,0	200,0	200,0	201,0	200,0	201	201,0
	b R2,1	40,6	40,12	40,6	40,1	40,7	40,0	40,1	41,3	40,6	40,3	40,3	40,6	40,9	40,5
	b R2,2	40,6	40,2	40,6	40,1	40,6	40,0	40,1	41,3	40,6	40,4	40,4	40,5	40,9	40,4
	b R2,3	40,6	40,2	40,6	40,1	40,6	40,0	40,1	41,4	40,6	40,2	40,4	40,6	40,8	40,4
	b R3,1	40,2	41	40,4	40,8	39,8	39,9	40,7	40,4	40,6	40,2	40,4	40,3	40,3	40,1

	b R3,2	40,3	40,8	40,4	40,9	39,9	40,2	40,6	40,5	40,6	40,3	40,5	40,3	40,4	40,1
	b R3,3	40,4	40,6	40,4	41	40	40,2	40,4	40,5	40,6	40,2	40,5	40,2	40,4	40,1
Laufzeit [ $\mu$ s]	1. Messung														
	R1	77	58,2	71,9	57,9	62,8	77,6	54,8	71,8	72,1	74	66,2	75,3	51,5	70,7
	R2,1	14,7	11,4	15,2	12,0	11,7	14,2	11,9	14,8	14	14,9	13,8	16,2	9,0	11,3
	R2,2	14,8	12,9	15,3	11,6	12,5	13,8	10,4	15,3	14,1	15,5	13,8	17,1	8,7	15,3
	R2,3	15,6	13,9	14,4	11,8	13,3	14,3	11,6	15,9	14,1	14,2	13,7	15,6	10,4	15,8
	R3,1	13,7	12	14,4	11,8	10,6	17,3	11,6	13,6	14,5	13,7	13,2	15,2	9,4	13,1
	R3,2	13,7	13,7	14,1	11,3	12,3	14,7	10,6	14,5	13,8	14,6	13,6	14,9	9,5	15,9
R3,3	13,9	13,9	13,8	11,9	12,6	14,6	10,9	14	14,2	14,4	13,7	15,3	11,6	14,4	
Geschwindigkeit [km/s]	1. Messung														
	vh	2,60	0,29	2,78	3,45	3,18	2,59	3,65	2,79	2,77	2,70	3,04	2,66	3,90	2,84
	v R2,1	2,76	0,28	2,67	3,34	3,48	2,82	3,37	2,79	2,90	2,70	2,92	2,51	4,54	3,58
	v R2,2	2,74	0,32	2,65	3,46	3,25	2,90	3,86	2,70	2,88	2,61	2,93	2,37	4,70	2,64
	v R2,3	2,60	0,35	2,82	3,40	3,05	2,80	3,46	2,60	2,88	2,83	2,95	2,60	3,92	2,56
	v R3,1	2,93	0,29	2,81	3,46	3,75	2,31	3,51	2,97	2,80	2,93	3,06	2,65	4,29	3,06
	v R3,2	2,94	0,34	2,87	3,62	3,24	2,73	3,83	2,79	2,94	2,76	2,98	2,70	4,25	2,52
	v R3,3	2,91	0,34	2,93	3,45	3,17	2,75	3,71	2,89	2,86	2,79	2,96	2,63	3,48	2,78
	Mittelwert	2,78	0,32	2,79	3,45	3,31	2,70	3,63	2,79	2,86	2,76	2,98	2,59	4,16	2,86

Bestimmung Wasseraufnahme			
Vgl. Tabelle 5			
An den zylindrischen Probekörpern			
Probe Nr	$m_t$ [g]	$m_f$ [g]	w [%]
1A		692	791,5
2A		666,3	767,9
3A		689,8	790,3
4A		705,2	803,7
5A		682,9	788,1
6A		699,7	800
7A		687,7	787,2
8A		699,1	801
9A		696,4	798,1
10A		693,5	796,2
11A		688,2	789,9
12A		675,9	777,7

Bestimmung Ultraschallgeschwindigkeit													
Vgl. Tabelle 3													
An den prismatischen Probekörpern													
Probe Nr.		1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	9A	10A	11A	12A
Abmessungen	h	199,0	200,0	198,0	200,0	199,0	199,0	200,0	198,0	199,0	200,0	200,0	198,0
	b R2,1	49,6	50,4	50,5	50,7	50,6	50,3	50,8	50,8	50,7	50,8	50,8	49,5
	b R2,2	50,7	50,8	50,7	50,8	50,3	50,8	50,6	50,8	50,7	50,6	50,8	50,6
	b R2,3	50,6	50,7	50,7	50,8	50,8	50,6	50,5	50,7	50,6	50,0	50,8	50,6
	b R3,1	50,1	50,5	50,8	50,8	50,5	50,4	50,4	50,7	50,3	50,8	50,0	49,4
	b R3,2	50,8	50,8	50,6	50,8	50,5	50,6	50,7	50,7	50,3	50,9	50,3	50,6
	b R3,3	50,5	50,6	50,8	50,9	50,4	50,5	50,5	50,6	50,3	50,0	50,8	50,5
Laufzeit [ $\mu$ s]	1. Messung												
	R1	92,2	89,6	87,5	78,1	90,2	86,2	90,6	90,2	88,1	91,8	87,9	87,3
	R2,1	21,3	21,7	17,8	19	19,8	19,7	20,5	21	19,2	21,6	20,4	20
	R2,2	21	20,6	18,3	19,2	20,8	19,2	21	20,2	20	21,4	20,2	20,3
	R2,3	21	21,1	19	19,1	20,1	20,5	21,4	21,2	18,9	21,4	20,6	21
	R3,1	19,9	21,2	18,5	18,7	21,5	18,9	20	20,6	20	19,8	19,4	19,8
	R3,2	18,3	20,7	19,7	19	21,3	18,2	19,7	19,6	20	19,7	20,2	19,7
R3,3	19,3	20,3	19,3	18,5	21,1	20,1	20,6	20,1	20	20,3	19,8	20,4	
Geschwindigkeit [km/s]	1. Messung												
	vh	2,16	2,23	2,26	2,56	2,21	2,31	2,21	2,20	2,26	2,18	2,28	2,27
	v R2,1	2,33	2,32	2,84	2,67	2,56	2,55	2,48	2,42	2,64	2,35	2,49	2,48
	v R2,2	2,41	2,47	2,77	2,65	2,42	2,65	2,41	2,51	2,54	2,36	2,51	2,49
	v R2,3	2,41	2,40	2,67	2,66	2,53	2,47	2,36	2,39	2,68	2,34	2,47	2,41
	v R3,1	2,52	2,38	2,75	2,72	2,35	2,67	2,52	2,46	2,52	2,57	2,58	2,49
	v R3,2	2,78	2,45	2,57	2,67	2,37	2,78	2,57	2,59	2,52	2,58	2,49	2,57
	v R3,3	2,62	2,49	2,63	2,75	2,39	2,51	2,45	2,52	2,52	2,46	2,57	2,48
Mittelwert	2,51	2,42	2,70	2,69	2,43	2,60	2,47	2,48	2,57	2,44	2,52	2,49	

Bestimmung der Rohdichte an den prismatischen Probekörpern						
Vgl. Tabelle 4						
Probe Nr.	$m_t$ [g]	$m_w$ [g]	$m_a$ [g]	$V_R$ [cm <sup>3</sup> ]	$\rho_R$ [g/cm <sup>3</sup> ]	
1	551,20	618,70	294,10	324,60	1,70	
2	556,30	641,20	322,50	318,70	1,75	
3	554,80	636,80	316,40	320,40	1,73	
5	560,10	637,20	321,80	315,40	1,78	
6	554,90	632,60	315,80	316,80	1,75	
7	548,10	622,70	299,80	322,90	1,70	
8	543,10	624,30	304,10	320,20	1,70	

10	547,80	619,40	300,20	319,20	1,72
11	550,60	623,80	302,80	321,00	1,72
12	539,40	617,70	298,80	318,90	1,69
13	549,90	630,10	312,00	318,10	1,73
14	533,00	608,50	292,10	316,40	1,68
15	567,70	648,80	320,50	328,30	1,73
16	574,40	654,30	321,50	332,80	1,73
17	567,10	645,80	316,30	329,50	1,72
18	551,00	621,20	301,40	319,80	1,72
19	547,60	618,00	298,10	319,90	1,71
20	570,30	640,20	311,20	329,00	1,73
21	543,50	629,50	303,30	326,20	1,67
22	628,60	715,40	355,50	359,90	1,75
23	546,10	625,60	308,90	316,70	1,72
24	525,40	608,20	296,50	311,70	1,69
25	568,80	650,90	325,90	325,00	1,75
26	559,10	632,30	316,10	316,20	1,77
27	548,30	624,10	304,80	319,30	1,72
28	541,20	616,60	293,70	322,90	1,68
32	536,50	617,50	297,10	320,40	1,67
33	521,20	592,50	280,20	312,30	1,67
34	611,20	693,80	335,90	357,90	1,71
35	550,70	624,50	295,90	328,60	1,68
36	555,30	638,10	319,10	319,00	1,74
37	558,60	634,60	318,10	316,50	1,76
38	553,10	620,10	297,20	322,90	1,71
39	536,00	614,50	296,80	317,70	1,69
40	619,90	704,90	343,00	361,90	1,71
41	543,10	622,10	299,80	322,30	1,69
43	558,50	635,50	312,70	322,80	1,73
46	540,80	620,20	303,60	316,60	1,71
48	564,70	645,20	314,50	330,70	1,71
49	550,30	627,90	301,70	326,20	1,69
50	548,50	632,20	311,50	320,70	1,71
51	548,80	615,50	290,60	324,90	1,69
52	541,40	625,20	304,40	320,80	1,69
54	554,90	630,10	308,80	321,30	1,73

Bestimmung der Rohdichte an den zylindrischen Probekörpern					
Vgl. Tabelle 4					
Probe Nr.	$m_t$ [g]	$m_w$ [g]	$m_a$ [g]	$V_R$ [cm <sup>3</sup> ]	$\rho_R$ [g/cm <sup>3</sup> ]
1A	692,00	791,50	399,40	392,10	1,76
2A	666,30	767,90	375,80	392,10	1,70
3A	689,80	790,30	397,60	392,70	1,76
4A	705,20	803,70	406,70	397,00	1,78
5A	682,90	788,10	390,50	397,60	1,72
6A	699,70	800,00	400,40	399,60	1,75
7A	687,70	787,20	387,50	399,70	1,72
8A	699,10	801,00	401,30	399,70	1,75
9A	696,40	798,10	400,70	397,40	1,75
10A	693,50	796,20	398,10	398,10	1,74
11A	688,20	789,90	390,60	399,30	1,72
12A	675,90	777,70	385,70	392,00	1,72

Wasseraufnahme Prismen			
Vgl. Tabelle 5			
Probe Nr.	$m_t$ [g]	$m_w$ [g]	w [%]
1	551,20	618,70	12,25
2	556,30	641,20	15,26
3	554,80	636,80	14,78
5	560,10	637,20	13,77
6	554,90	632,60	14,00
7	548,10	622,70	13,61
8	543,10	624,30	14,95
10	547,80	619,40	13,07
11	550,60	623,80	13,29
12	539,40	617,70	14,52
13	549,90	630,10	14,58
14	533,00	608,50	14,17
15	567,70	648,80	14,29
16	574,40	654,30	13,91
17	567,10	645,80	13,88
18	551,00	621,20	12,74
19	547,60	618,00	12,86

20	570,30	640,20	12,26
21	543,50	629,50	15,82
22	628,60	715,40	13,81
23	546,10	625,60	14,56
24	525,40	608,20	15,76
25	568,80	650,90	14,43
26	559,10	632,30	13,09
27	548,30	624,10	13,82
28	541,20	616,60	13,93
32	536,50	617,50	15,10
33	521,20	592,50	13,68
34	611,20	693,80	13,51
35	550,70	624,50	13,40
36	555,30	638,10	14,91
37	558,60	634,60	13,61
38	553,10	620,10	12,11
39	536,00	614,50	14,65
40	619,90	704,90	13,71
41	543,10	622,10	14,55
43	558,50	635,50	13,79
46	540,80	620,20	14,68
48	564,70	645,20	14,26
49	550,30	627,90	14,10
50	548,50	632,20	15,26
51	548,80	615,50	12,15
52	541,40	625,20	15,48
54	554,90	630,10	13,55

Wasseraufnahme Zylinder			
Vgl. Tabelle 5			
Probe Nr.	$m_t$ [g]	$m_w$ [g]	w [%]
1A	692,00	791,90	14,44
2A	666,30	767,90	15,25
3A	689,80	790,30	14,57
4A	705,20	803,70	13,97
5A	682,90	790,00	15,68
6A	699,70	800,90	14,46

<b>7A</b>	687,70	788,10	14,60
<b>8A</b>	699,10	801,40	14,63
<b>9A</b>	696,40	798,00	14,59
<b>10A</b>	693,50	796,20	14,81
<b>11A</b>	688,20	790,00	14,79
<b>12A</b>	675,90	778,30	15,15

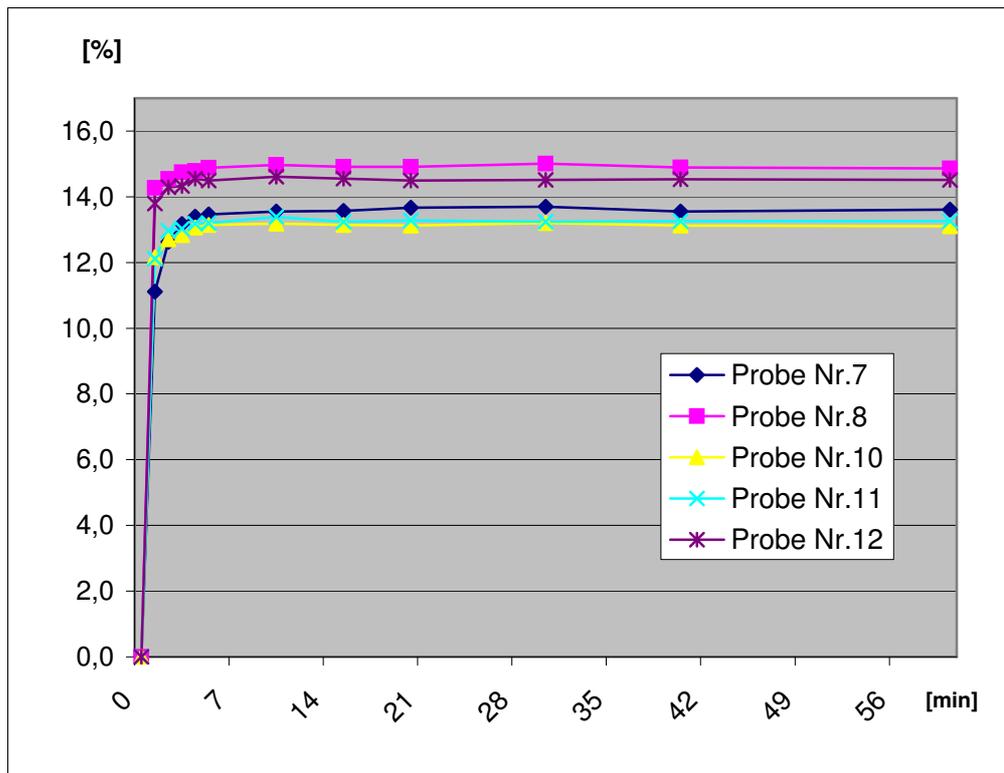


Diagramm 33: Wasseraufnahmeverhalten der Proben 7, 8, 10, 11 und 12

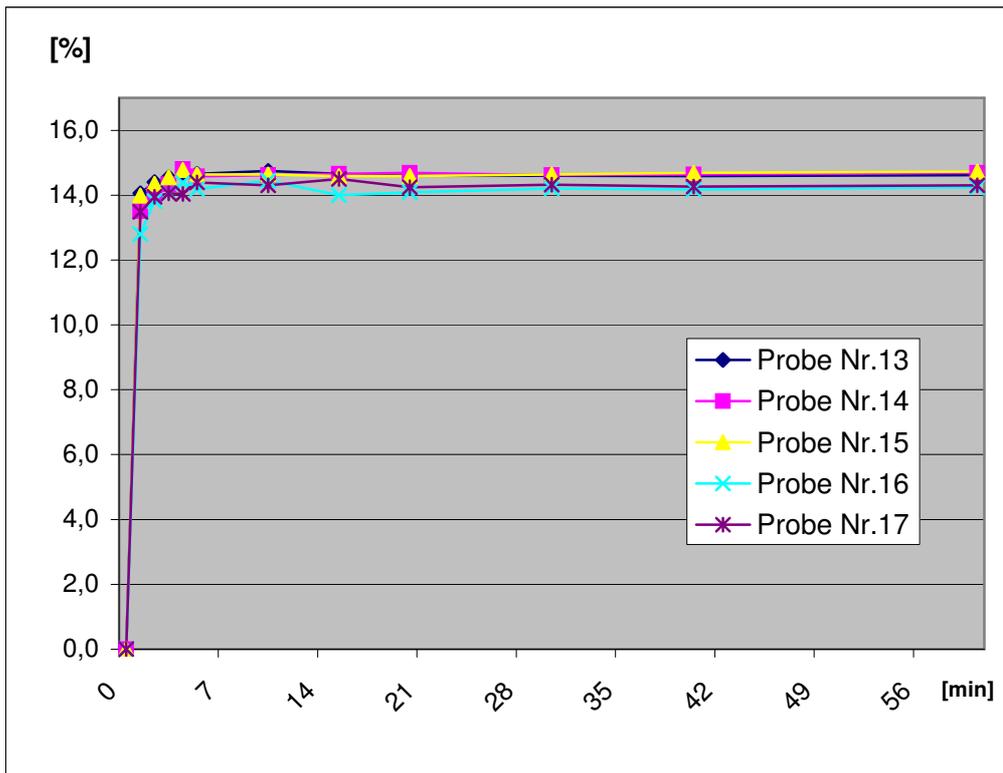


Diagramm 34: Wasseraufnahmeverhalten der Proben 13, 14, 15, 16 und 17

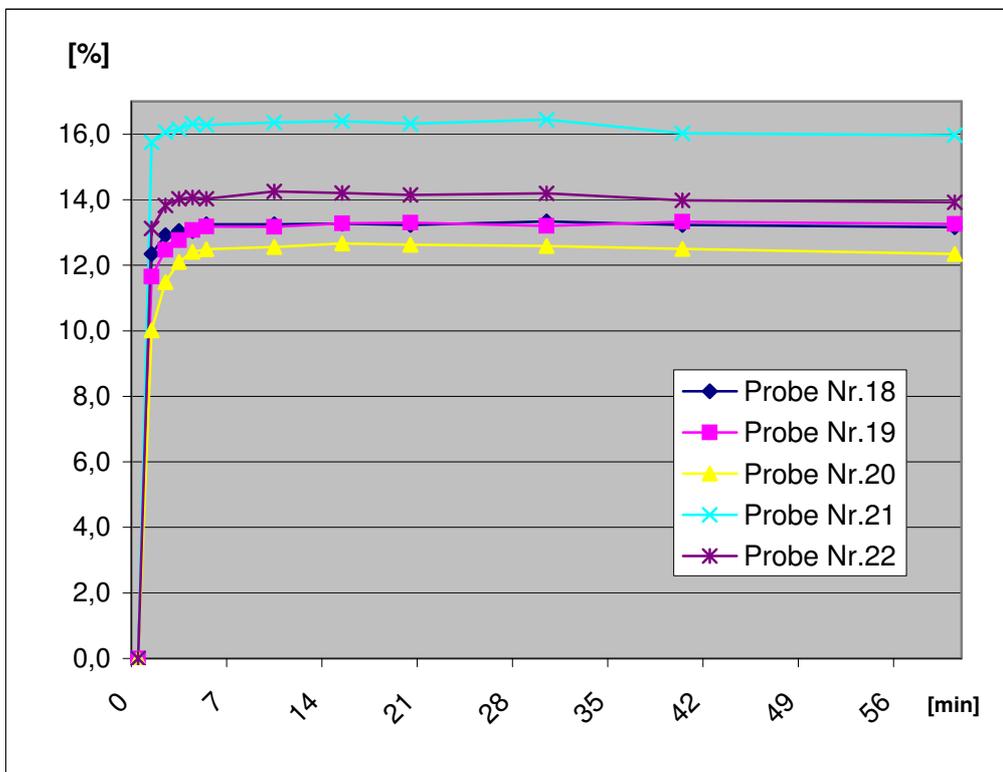


Diagramm 35: Wasseraufnahmeverhalten der Proben 18, 19, 20, 21 und 22

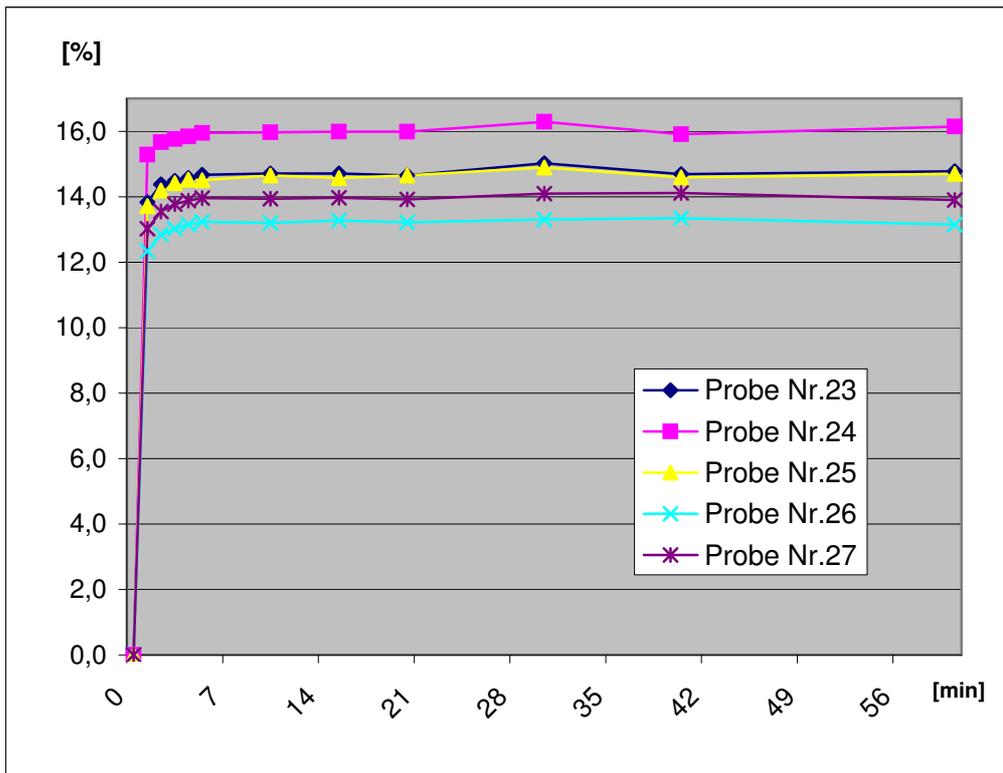


Diagramm 36: Wasseraufnahmeverhalten der Proben 23, 24, 25, 26 und 27

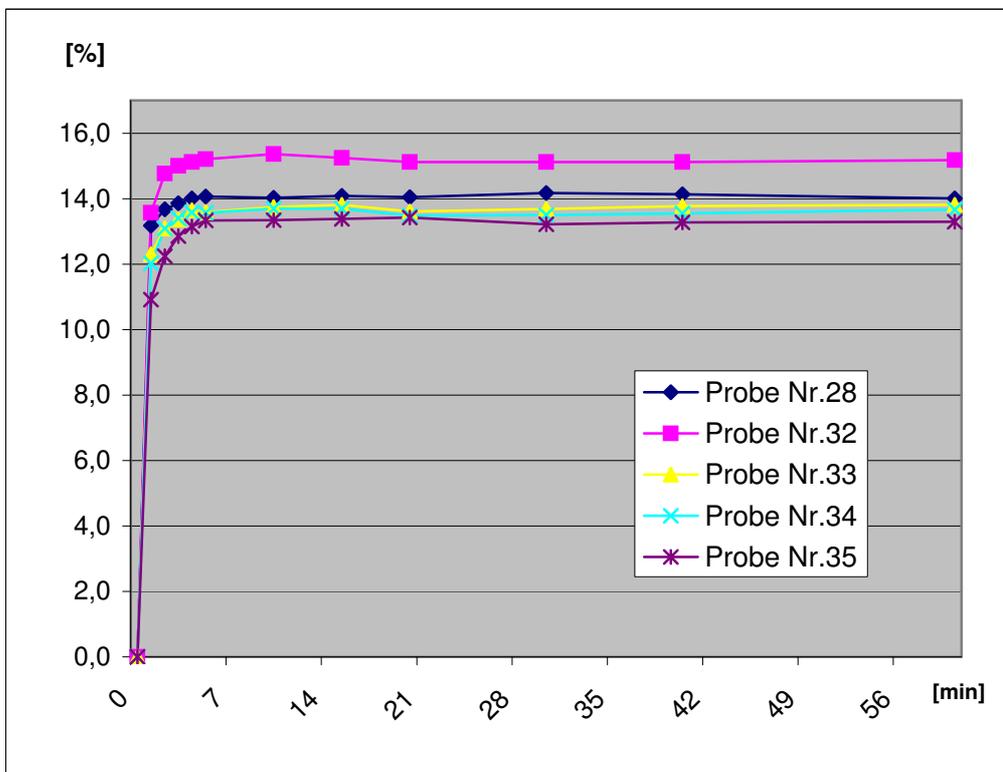


Diagramm 37: Wasseraufnahmeverhalten der Proben 28, 32, 33, 34 und 35

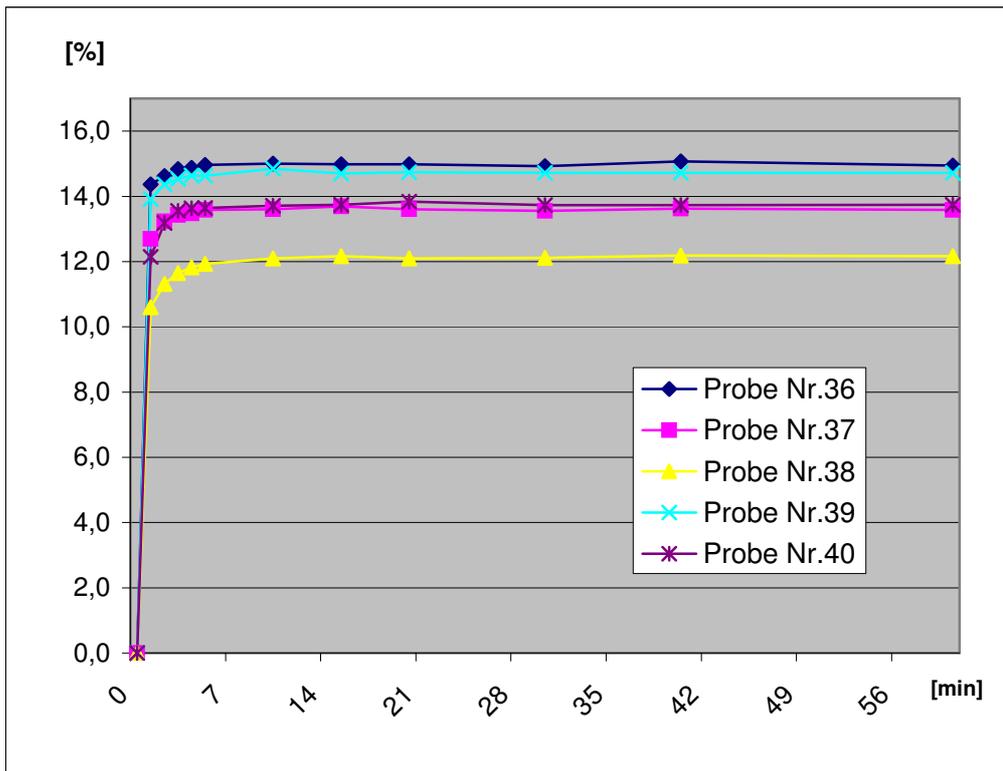


Diagramm 38: Wasseraufnahmeverhalten der Proben 36, 37, 38, 39 und 40

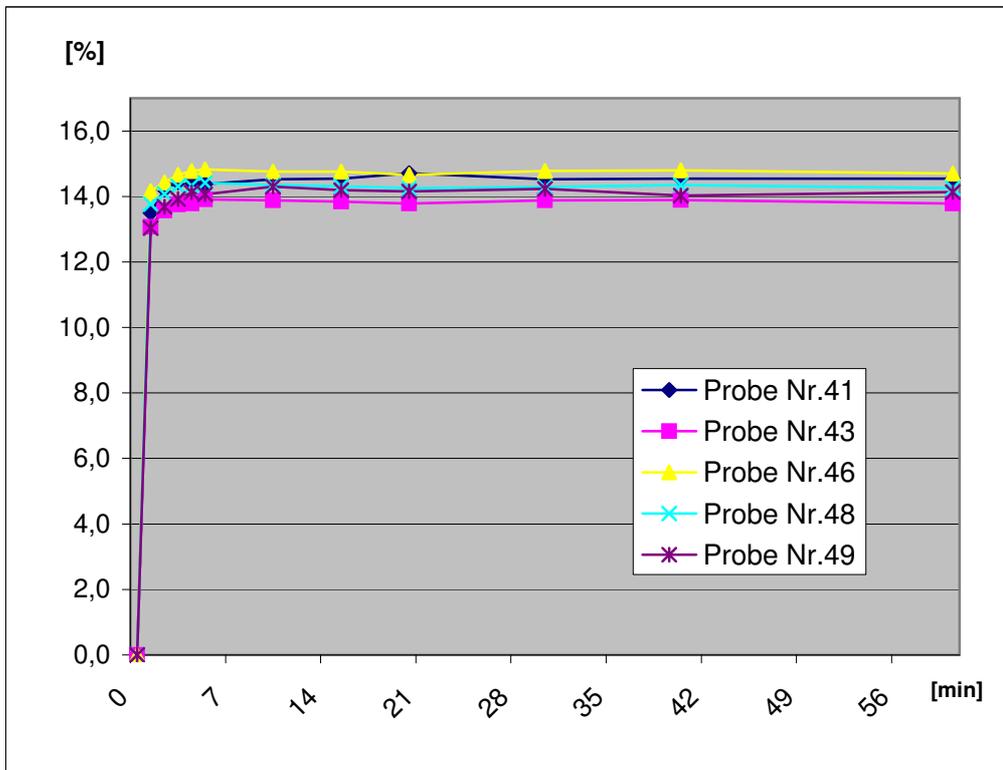


Diagramm 39: Wasseraufnahmeverhalten der Proben 41, 43, 46, 48 und 49

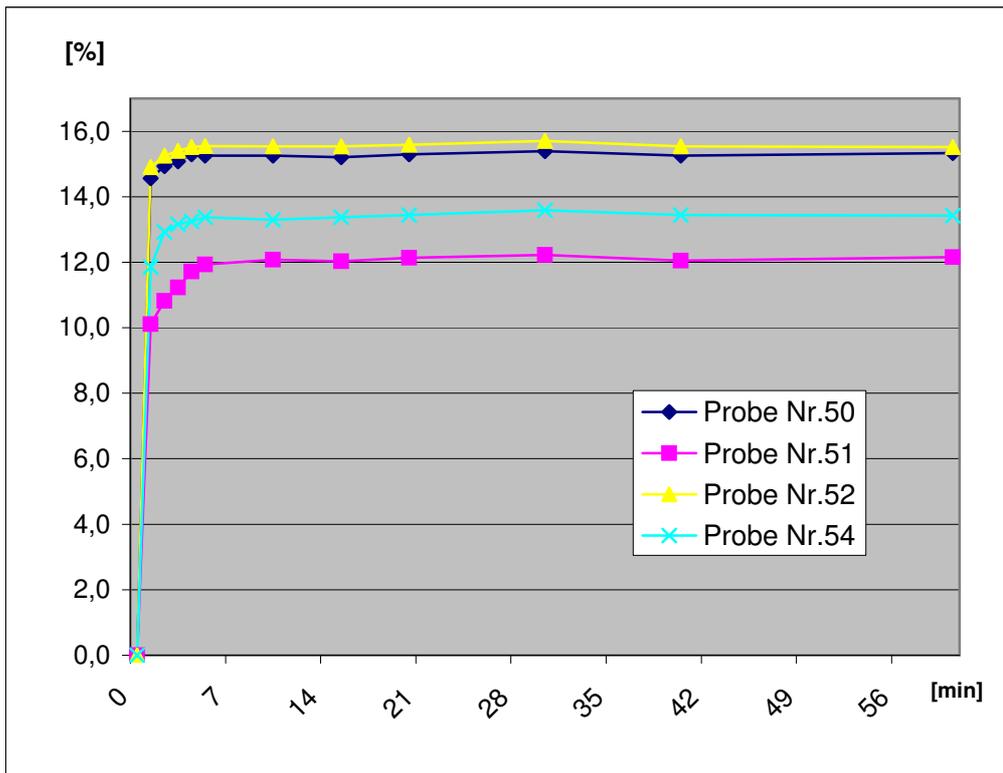


Diagramm 40: Wasseraufnahmeverhalten der Proben 50, 51, 52 und 54

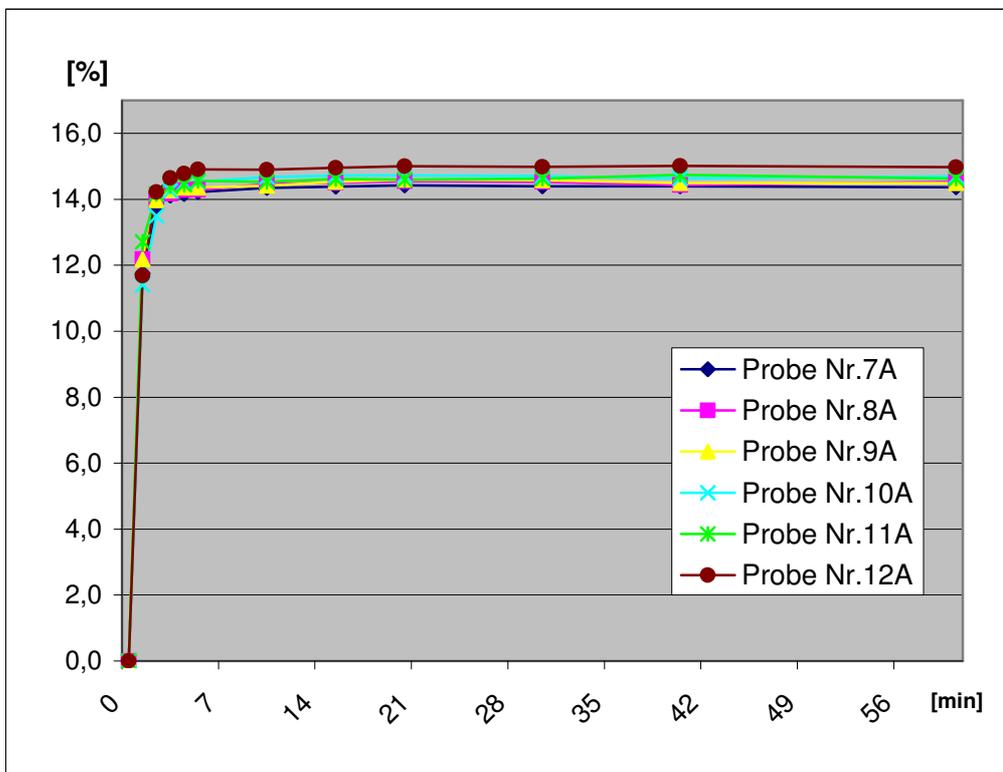


Diagramm 41: Wasseraufnahmeverhalten der Proben 7A, 8A, 9A, 10A, 11A und 12A

Wasseraufnahmeverhalten Zylinder																
Zeit [min]	0	1	2	3	4	5	10	15	20	30	40	60	90	120	180	1440
<b>1 m<sub>i</sub> [g]</b>	551,2	599,3	610,4	615,5	616,8	617,5	617,5	617,8	617,9	617,3	617,0	617,5	617,0	617,5	618,6	618,7
w [%]	0,0	8,7	10,7	11,7	11,9	12,0	12,0	12,1	12,1	12,0	11,9	12,0	11,9	12,0	12,2	12,2
<b>2 m<sub>i</sub> [g]</b>	556,3	635,9	637,6	638,8	639,3	639,7	639,4	639,8	639,8	639,0	638,3	638,8	638,4	639,2	641,1	641,2
w [%]	0,0	14,3	14,6	14,8	14,9	15,0	14,9	15,0	15,0	14,9	14,7	14,8	14,8	14,9	15,2	15,3
<b>3 m<sub>i</sub> [g]</b>	554,8	633,8	633,8	635,1	635,6	635,8	636,3	635,8	636,3	636,0	636,4	636,1	635,7	635,5	635,3	636,8
w [%]	0,0	14,2	14,2	14,5	14,6	14,6	14,7	14,6	14,7	14,6	14,7	14,7	14,6	14,5	14,5	14,8
<b>5 m<sub>i</sub> [g]</b>	560,1	634,5	635,3	636,6	637,8	636,5	637,2	637,1	636,9	637,2	637,2	637,1	637,1	636,6	636,6	637,2
w [%]	0,0	13,3	13,4	13,7	13,9	13,6	13,8	13,7	13,7	13,8	13,8	13,7	13,7	13,7	13,7	13,8
<b>6 m<sub>i</sub> [g]</b>	554,9	629,6	630,7	632,7	632,3	632,6	632,9	632,9	632,5	633,3	632,4	633,0	632,9	632,3	632,3	632,6
w [%]	0,0	13,5	13,7	14,0	13,9	14,0	14,1	14,1	14,0	14,1	14,0	14,1	14,1	13,9	13,9	14,0
<b>7 m<sub>i</sub> [g]</b>	548,1	609,0	617,3	620,3	621,5	621,9	622,4	622,5	623,0	623,2	622,4	622,7	622,6	623,4	622,7	622,7
w [%]	0,0	11,1	12,6	13,2	13,4	13,5	13,6	13,6	13,7	13,7	13,6	13,6	13,6	13,7	13,6	13,6
<b>8 m<sub>i</sub> [g]</b>	543,1	620,6	622,1	623,2	623,4	623,9	624,4	624,1	624,1	624,6	624,0	623,8	624,4	623,7	624,3	624,3
w [%]	0,0	14,3	14,5	14,7	14,8	14,9	15,0	14,9	14,9	15,0	14,9	14,9	15,0	14,8	15,0	15,0
<b>10 m<sub>i</sub> [g]</b>	547,8	614,4	617,4	618,1	619,4	619,8	620,0	619,8	619,7	620,1	619,7	619,6	619,8	619,5	619,4	619,4
w [%]	0,0	12,2	12,7	12,8	13,1	13,1	13,2	13,1	13,1	13,2	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1
<b>11 m<sub>i</sub> [g]</b>	550,6	617,3	622,0	622,3	623,2	623,3	624,3	623,5	623,7	623,5	623,6	623,6	623,7	623,7	623,8	623,8
w [%]	0,0	12,1	13,0	13,0	13,2	13,2	13,4	13,2	13,3	13,2	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3
<b>12 m<sub>i</sub> [g]</b>	539,4	613,8	616,5	616,7	617,9	617,6	618,2	617,9	617,6	617,7	617,8	617,7	618,1	617,8	617,7	617,7
w [%]	0,0	13,8	14,3	14,3	14,6	14,5	14,6	14,6	14,5	14,5	14,5	14,5	14,6	14,5	14,5	14,5
<b>13 m<sub>i</sub> [g]</b>	549,9	627,2	629,1	629,9	630,7	630,5	631,0	630,5	630,2	630,2	630,1	630,3	631,4	630,2	630,1	630,1
w [%]	0,0	14,1	14,4	14,5	14,7	14,7	14,7	14,7	14,6	14,6	14,6	14,6	14,8	14,6	14,6	14,6
<b>14 m<sub>i</sub> [g]</b>	533,0	605,0	607,8	609,4	611,9	610,7	610,9	611,1	611,3	610,9	611,0	611,3	610,9	610,9	610,3	608,5
w [%]	0,0	13,5	14,0	14,3	14,8	14,6	14,6	14,7	14,7	14,6	14,6	14,7	14,6	14,6	14,5	14,2
<b>15 m<sub>i</sub> [g]</b>	567,7	647,1	649,2	650,3	651,6	650,8	650,8	650,5	650,5	650,8	651,1	651,3	651,1	650,3	649,5	648,8
w [%]	0,0	14,0	14,4	14,5	14,8	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,7	14,7	14,7	14,5	14,4	14,3
<b>16 m<sub>i</sub> [g]</b>	574,4	647,9	653,8	655,2	657,0	655,9	657,4	653,3	655,3	656,0	655,8	656,2	656,0	655,3	655,1	654,3
w [%]	0,0	12,8	13,8	14,1	14,4	14,2	14,4	14,0	14,1	14,2	14,2	14,2	14,2	14,1	14,0	13,9
<b>17 m<sub>i</sub> [g]</b>	567,1	643,6	646,2	646,8	646,7	648,7	648,2	649,3	647,9	648,3	648,0	648,2	646,9	647,3	646,6	645,8
w [%]	0,0	13,5	13,9	14,1	14,0	14,4	14,3	14,5	14,2	14,3	14,3	14,3	14,1	14,1	14,0	13,9
<b>18 m<sub>i</sub> [g]</b>	551,0	619,0	622,2	622,9	622,9	624,0	624,0	624,1	623,9	624,5	623,9	623,5	622,4	622,4	622,2	621,2
w [%]	0,0	12,3	12,9	13,0	13,0	13,2	13,2	13,3	13,2	13,3	13,2	13,2	13,0	13,0	12,9	12,7
<b>19 m<sub>i</sub> [g]</b>	547,6	611,4	615,9	617,5	619,2	619,8	619,7	620,3	620,4	619,9	620,6	620,2	618,8	619,4	618,8	618,0
w [%]	0,0	11,7	12,5	12,8	13,1	13,2	13,2	13,3	13,3	13,2	13,3	13,3	13,0	13,1	13,0	12,9
<b>20 m<sub>i</sub> [g]</b>	570,3	627,4	635,8	639,3	641,1	641,5	641,9	642,5	642,3	642,1	641,6	640,7	641,3	641,2	640,7	640,2
w [%]	0,0	10,0	11,5	12,1	12,4	12,5	12,6	12,7	12,6	12,6	12,5	12,3	12,4	12,4	12,3	12,3
<b>21 m<sub>i</sub> [g]</b>	543,5	629,1	630,8	631,3	632,2	632,0	632,4	632,6	632,2	632,9	630,6	630,3	631,1	631,1	630,2	629,5
w [%]	0,0	15,7	16,1	16,2	16,3	16,3	16,4	16,4	16,3	16,4	16,0	16,0	16,1	16,1	16,0	15,8
<b>22 m<sub>i</sub> [g]</b>	628,6	711,1	715,5	716,8	717,0	716,8	718,2	717,9	717,5	717,8	716,5	716,1	716,3	716,3	715,7	715,4
w [%]	0,0	13,1	13,8	14,0	14,1	14,0	14,3	14,2	14,1	14,2	14,0	13,9	14,0	14,0	13,9	13,8

<b>23</b> m <sub>i</sub> [g]	546,1	621,6	624,6	625,2	625,7	626,2	626,4	626,4	626,1	628,1	626,3	626,8	625,6	626,2	625,6	625,6
w [%]	0,0	13,8	14,4	14,5	14,6	14,7	14,7	14,7	14,6	15,0	14,7	14,8	14,6	14,7	14,6	14,6
<b>24</b> m <sub>i</sub> [g]	525,4	605,7	607,7	608,2	608,6	609,2	609,3	609,4	609,4	611,0	609,0	610,2	608,7	608,7	608,2	608,2
w [%]	0,0	15,3	15,7	15,8	15,8	15,9	16,0	16,0	16,0	16,3	15,9	16,1	15,9	15,9	15,8	15,8
<b>25</b> m <sub>i</sub> [g]	568,8	646,8	649,5	650,8	651,4	651,3	652,1	651,7	652,1	653,5	651,8	652,4	651,0	651,3	650,9	650,9
w [%]	0,0	13,7	14,2	14,4	14,5	14,5	14,6	14,6	14,6	14,9	14,6	14,7	14,5	14,5	14,4	14,4
<b>26</b> m <sub>i</sub> [g]	559,1	628,1	630,9	631,9	632,6	633,1	632,9	633,3	633,0	633,5	633,7	632,6	632,6	632,3	632,3	632,3
w [%]	0,0	12,3	12,8	13,0	13,1	13,2	13,2	13,3	13,2	13,3	13,3	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1
<b>27</b> m <sub>i</sub> [g]	548,3	619,7	622,6	623,8	624,4	624,8	624,7	624,9	624,6	625,6	625,7	624,5	624,4	624,0	624,1	624,1
w [%]	0,0	13,0	13,6	13,8	13,9	14,0	13,9	14,0	13,9	14,1	14,1	13,9	13,9	13,8	13,8	13,8
<b>28</b> m <sub>i</sub> [g]	541,2	612,5	615,2	616,2	617,0	617,3	617,1	617,4	617,2	617,9	617,7	617,0	616,9	616,5	616,6	616,6
w [%]	0,0	13,2	13,7	13,9	14,0	14,1	14,0	14,1	14,0	14,2	14,1	14,0	14,0	13,9	13,9	13,9
<b>32</b> m <sub>i</sub> [g]	536,5	609,3	615,7	617,0	617,6	618,1	618,9	618,3	617,6	617,6	617,6	617,9	617,4	617,4	617,5	617,5
w [%]	0,0	13,6	14,8	15,0	15,1	15,2	15,4	15,2	15,1	15,1	15,1	15,2	15,1	15,1	15,1	15,1
<b>33</b> m <sub>i</sub> [g]	521,2	585,3	589,4	590,9	592,3	592,0	592,8	593,2	592,1	592,5	593,0	593,2	592,3	592,4	592,5	592,5
w [%]	0,0	12,3	13,1	13,4	13,6	13,6	13,7	13,8	13,6	13,7	13,8	13,8	13,6	13,7	13,7	13,7
<b>34</b> m <sub>i</sub> [g]	611,2	684,7	691,2	693,1	694,2	694,1	694,9	694,9	693,6	693,7	694,0	694,7	693,7	693,5	693,8	693,8
w [%]	0,0	12,0	13,1	13,4	13,6	13,6	13,7	13,7	13,5	13,5	13,5	13,7	13,5	13,5	13,5	13,5
<b>35</b> m <sub>i</sub> [g]	550,7	610,8	618,1	621,5	623,1	624,1	624,2	624,4	624,6	623,5	623,8	623,9	623,5	623,8	624,5	624,5
w [%]	0,0	10,9	12,2	12,9	13,1	13,3	13,3	13,4	13,4	13,2	13,3	13,3	13,2	13,3	13,4	13,4
<b>36</b> m <sub>i</sub> [g]	555,3	635,1	636,5	637,7	637,9	638,4	638,6	638,5	638,5	638,2	639,0	638,3	638,4	638,6	638,1	638,1
w [%]	0,0	14,4	14,6	14,8	14,9	15,0	15,0	15,0	15,0	14,9	15,1	14,9	15,0	15,0	14,9	14,9
<b>37</b> m <sub>i</sub> [g]	558,6	629,5	632,5	633,6	633,9	634,5	634,6	635,1	634,6	634,3	634,7	634,5	635,1	635,4	634,6	634,6
w [%]	0,0	12,7	13,2	13,4	13,5	13,6	13,6	13,7	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,7	13,7	13,6
<b>38</b> m <sub>i</sub> [g]	553,1	611,7	615,7	617,5	618,5	619,1	620,0	620,4	620,0	620,1	620,5	620,4	620,9	621,1	620,1	620,1
w [%]	0,0	10,6	11,3	11,6	11,8	11,9	12,1	12,2	12,1	12,1	12,2	12,2	12,3	12,3	12,1	12,1
<b>39</b> m <sub>i</sub> [g]	536,0	610,6	613,0	613,9	614,5	614,4	615,6	614,8	615,0	614,9	614,9	614,9	615,0	614,2	614,5	614,5
w [%]	0,0	13,9	14,4	14,5	14,6	14,6	14,9	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,6	14,6	14,6
<b>40</b> m <sub>i</sub> [g]	619,9	695,2	701,6	703,9	704,4	704,5	704,9	705,1	705,7	705,0	705,0	705,1	705,1	704,7	704,9	704,9
w [%]	0,0	12,1	13,2	13,6	13,6	13,6	13,7	13,7	13,8	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7
<b>41</b> m <sub>i</sub> [g]	543,1	616,4	620,3	621,5	621,5	621,2	622,0	622,1	623,0	622,0	622,1	622,1	621,8	622,1	622,1	622,1
w [%]	0,0	13,5	14,2	14,4	14,4	14,4	14,5	14,5	14,7	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5
<b>43</b> m <sub>i</sub> [g]	558,5	631,5	634,3	635,3	635,5	636,2	636,0	635,8	635,5	636,0	636,1	635,5	635,9	635,4	635,5	635,5
w [%]	0,0	13,1	13,6	13,8	13,8	13,9	13,9	13,8	13,8	13,9	13,9	13,8	13,9	13,8	13,8	13,8
<b>46</b> m <sub>i</sub> [g]	540,8	617,4	618,8	620,1	620,7	621,0	620,6	620,6	620,1	620,7	620,8	620,3	620,4	620,2	620,2	620,2
w [%]	0,0	14,2	14,4	14,7	14,8	14,8	14,8	14,8	14,7	14,8	14,8	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
<b>48</b> m <sub>i</sub> [g]	564,7	642,4	644,2	645,5	645,6	646,1	645,7	645,5	645,2	645,4	645,7	645,2	645,7	645,1	645,2	645,2
w [%]	0,0	13,8	14,1	14,3	14,3	14,4	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,2	14,3	14,3
<b>49</b> m <sub>i</sub> [g]	550,3	622,0	625,6	626,9	628,0	627,7	629,0	628,4	628,2	628,6	627,5	628,1	627,9	627,7	627,9	627,9
w [%]	0,0	13,0	13,7	13,9	14,1	14,1	14,3	14,2	14,2	14,2	14,0	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1
<b>50</b> m <sub>i</sub> [g]	548,5	628,4	630,4	631,2	632,4	632,2	632,2	631,9	632,4	632,9	632,2	632,6	632,0	632,1	632,2	632,2
w [%]	0,0	14,6	14,9	15,1	15,3	15,3	15,3	15,2	15,3	15,4	15,3	15,3	15,2	15,2	15,3	15,3

<b>51</b> m <sub>i</sub> [g]	548,8	604,3	608,2	610,4	613,1	614,3	615,1	614,8	615,4	615,9	614,9	615,5	615,3	615,4	615,5	615,5
w [%]	0,0	10,1	10,8	11,2	11,7	11,9	12,1	12,0	12,1	12,2	12,0	12,2	12,1	12,1	12,2	12,2
<b>52</b> m <sub>i</sub> [g]	541,4	622,1	624,0	624,8	625,4	625,6	625,5	625,5	625,8	626,4	625,5	625,4	625,3	625,1	625,2	625,2
w [%]	0,0	14,9	15,3	15,4	15,5	15,6	15,5	15,5	15,6	15,7	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5
<b>54</b> m <sub>i</sub> [g]	554,9	620,7	626,6	627,9	628,4	629,1	628,7	629,1	629,5	630,3	629,5	629,4	629,2	629,2	630,1	630,1
w [%]	0,0	11,9	12,9	13,2	13,2	13,4	13,3	13,4	13,4	13,6	13,4	13,4	13,4	13,4	13,6	13,6

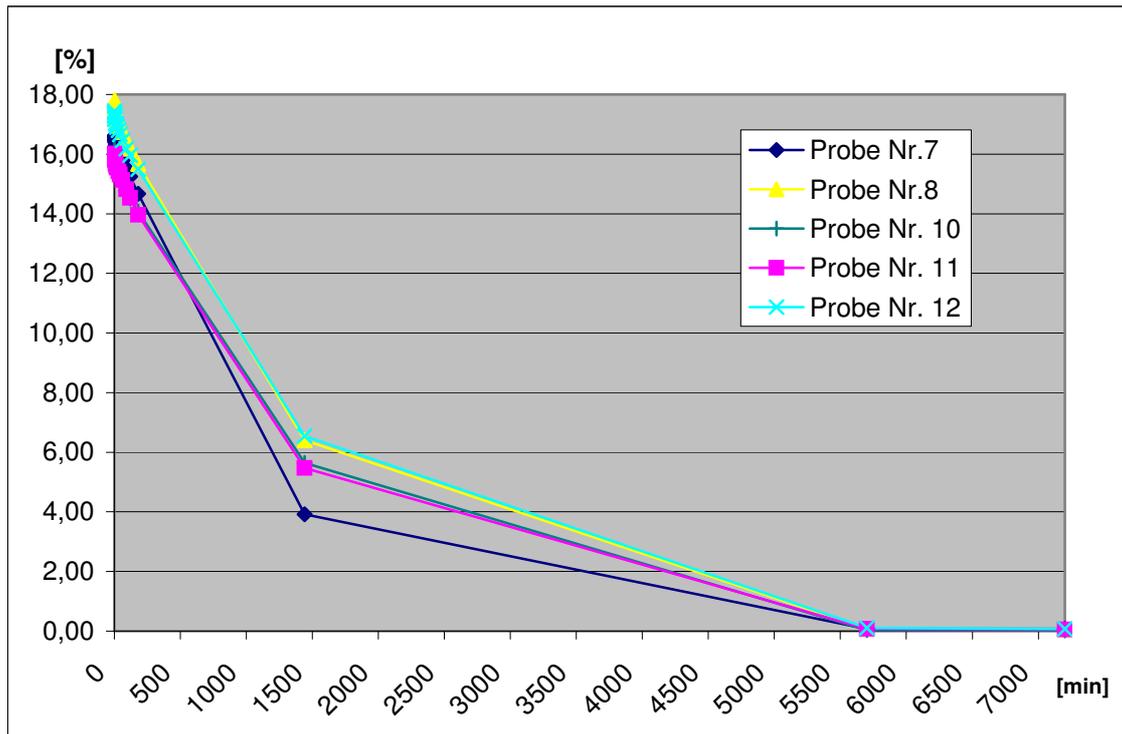


Diagramm 42: Wasserabnahmeverhalten der Probekörper 7, 8, 10, 11 und 12

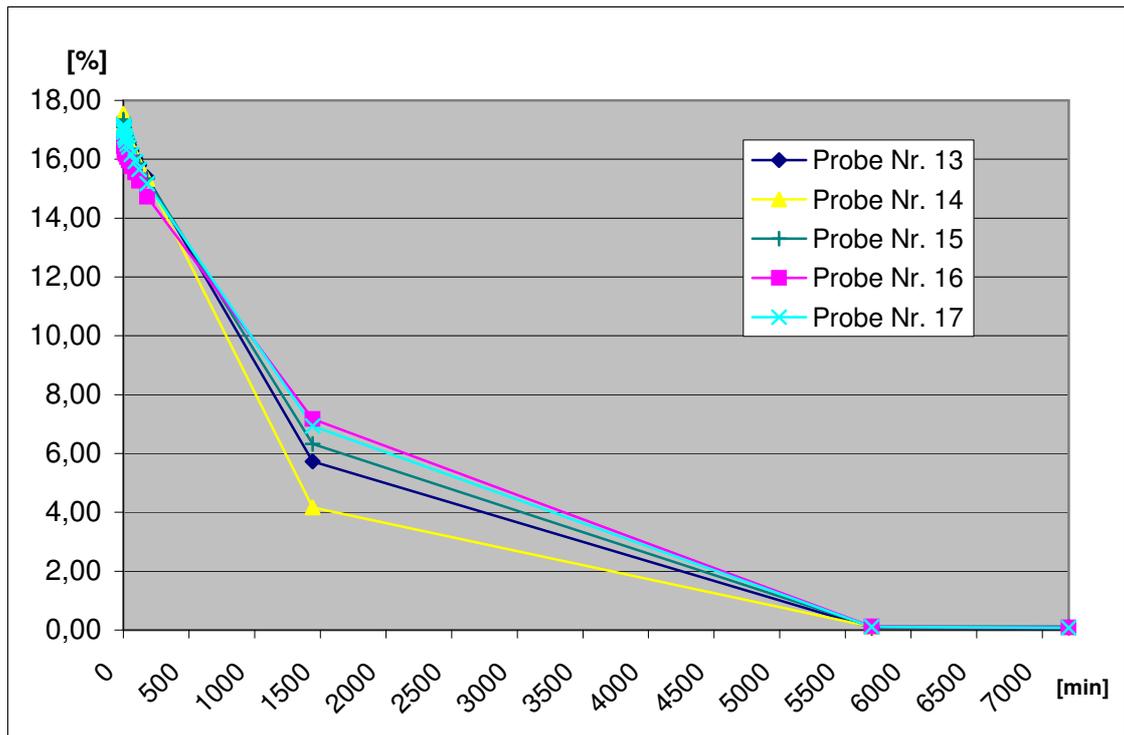


Diagramm 43: Wasserabnahmeverhalten der Probekörper 13, 14, 15, 16 und 17

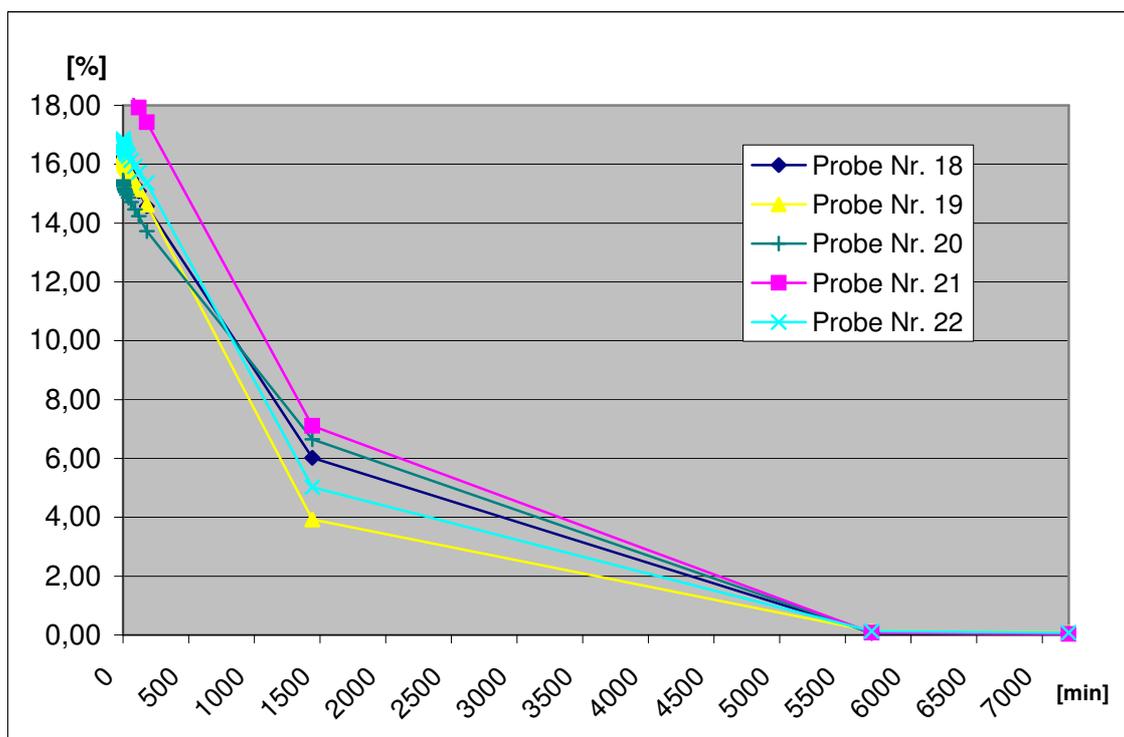


Diagramm 44: Wasserabnahmeverhalten der Probekörper 18, 19, 20, 21 und 22

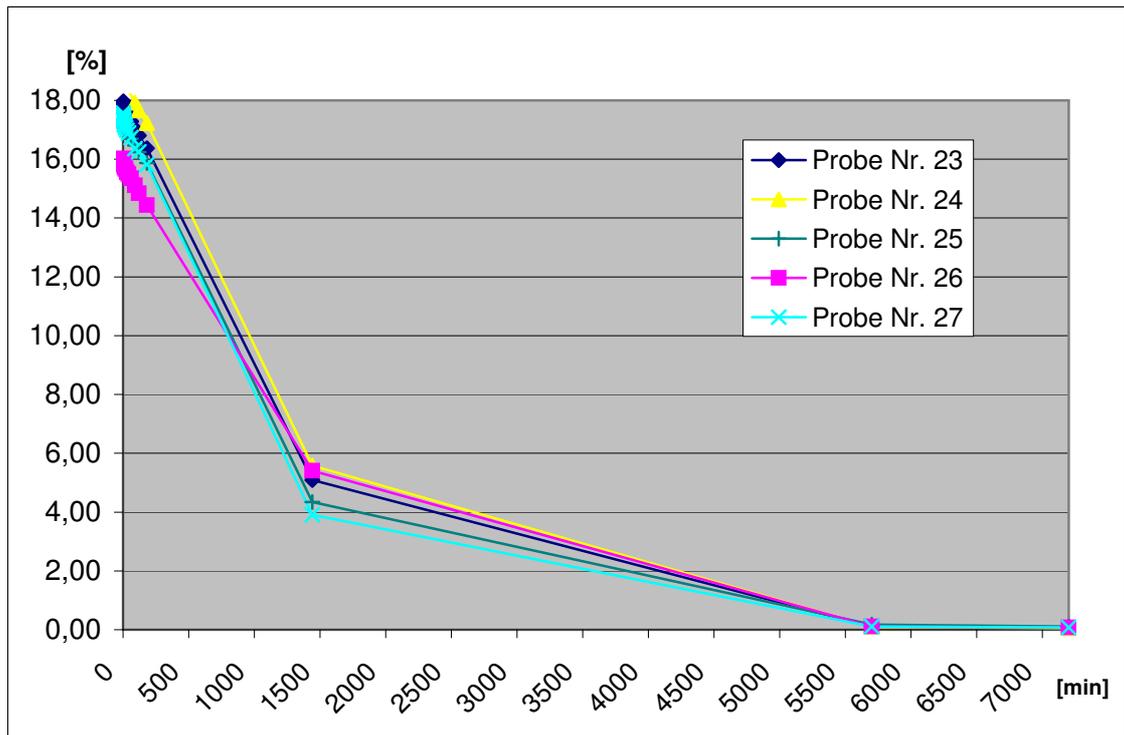


Diagramm 45: Wasserabnahmeverhalten der Probekörper 23, 24, 25, 26 und 27

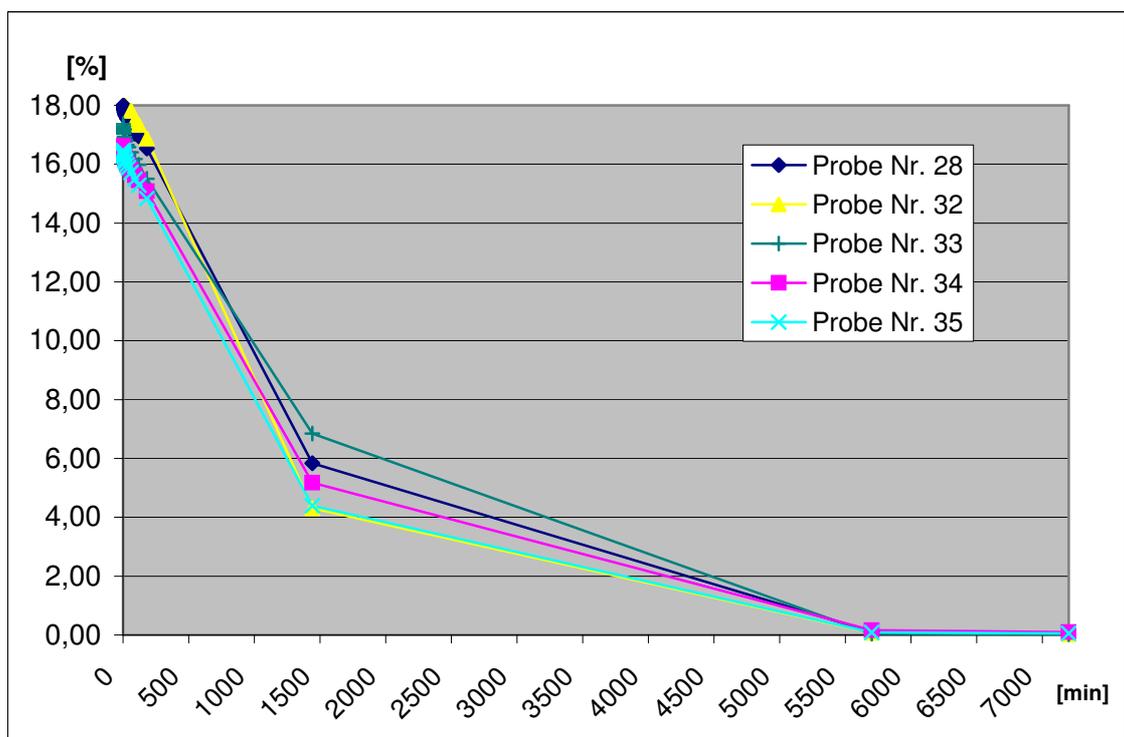


Diagramm 46: Wasserabnahmeverhalten der Probekörper 28, 32, 33, 34 und 35

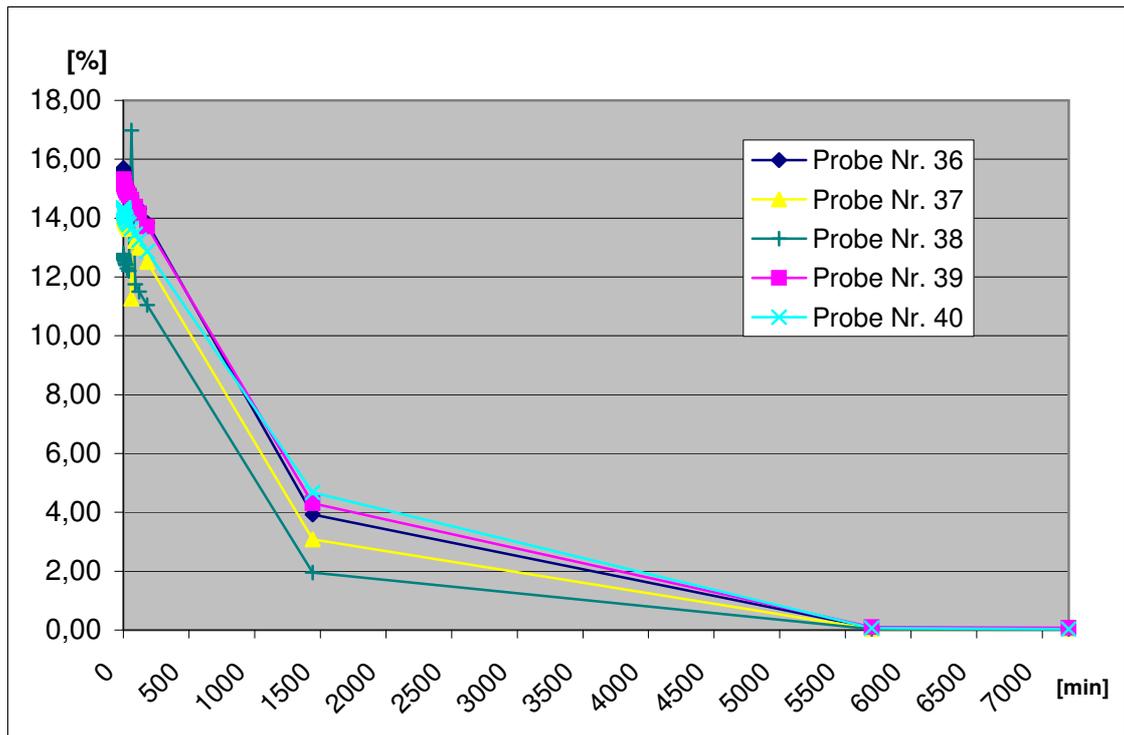


Diagramm 47: Wasserabnahmeverhalten der Probekörper 36, 37, 38, 39 und 40

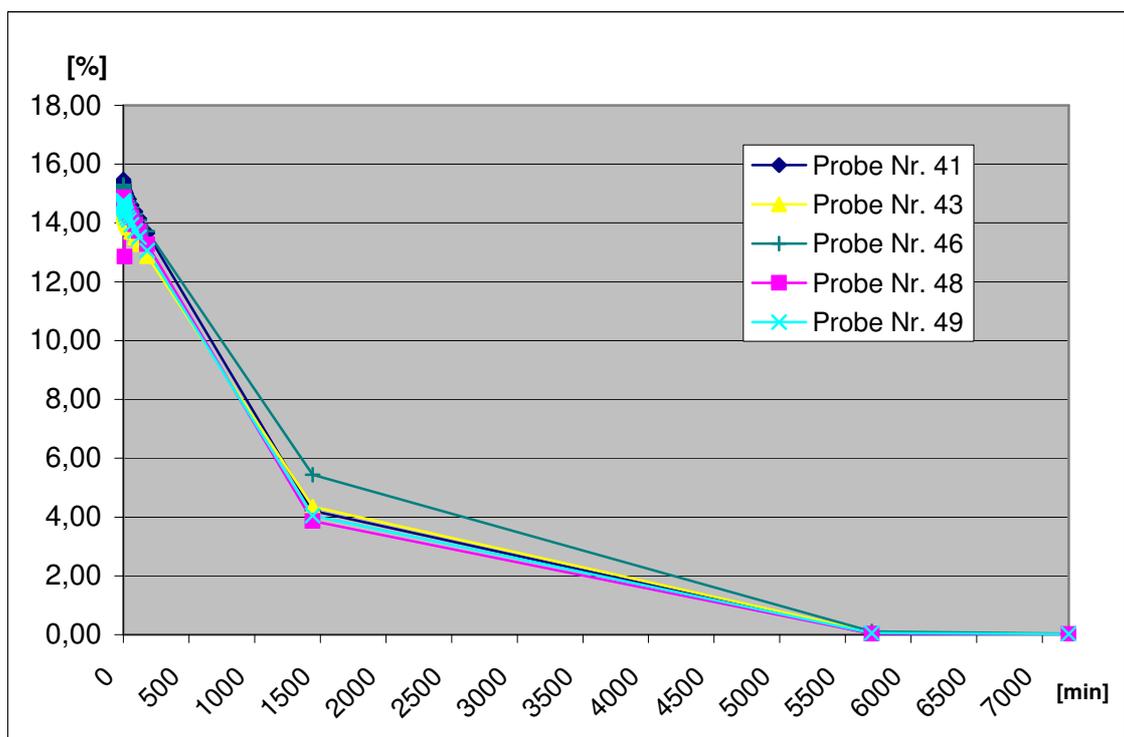


Diagramm 48: Wasserabnahmeverhalten der Probekörper 41, 43, 46, 48 und 49

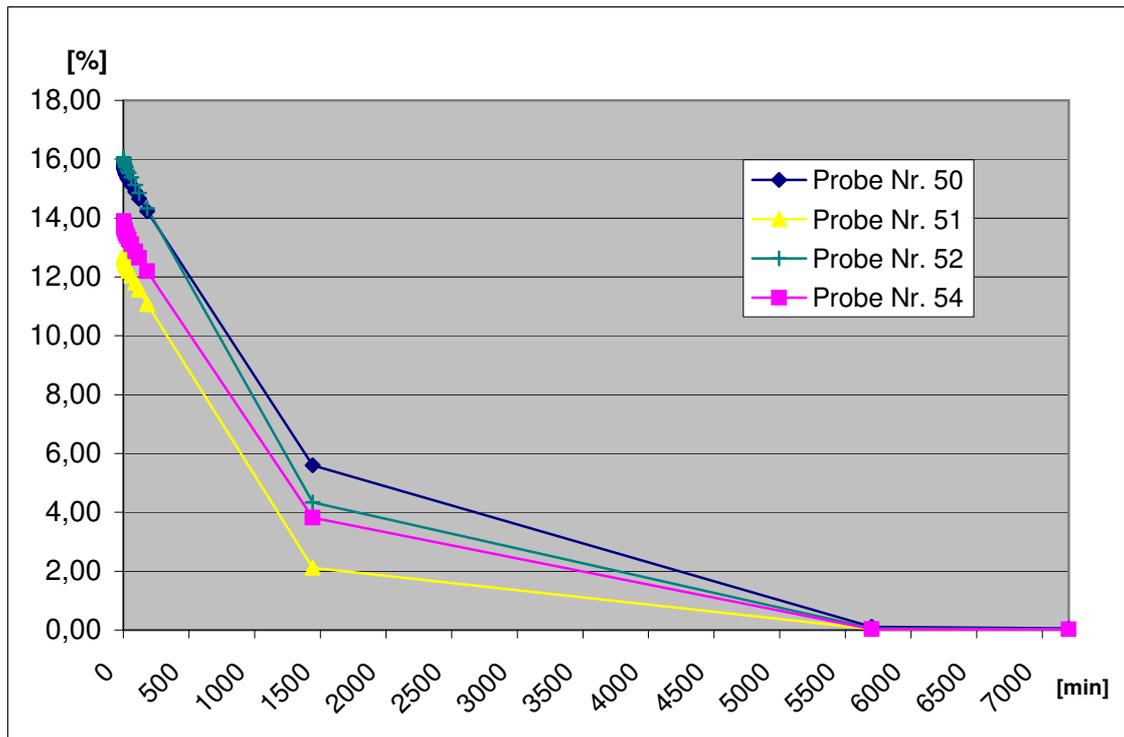


Diagramm 49: Wasserabnahmeverhalten der Probekörper 50, 51, 52 und 54

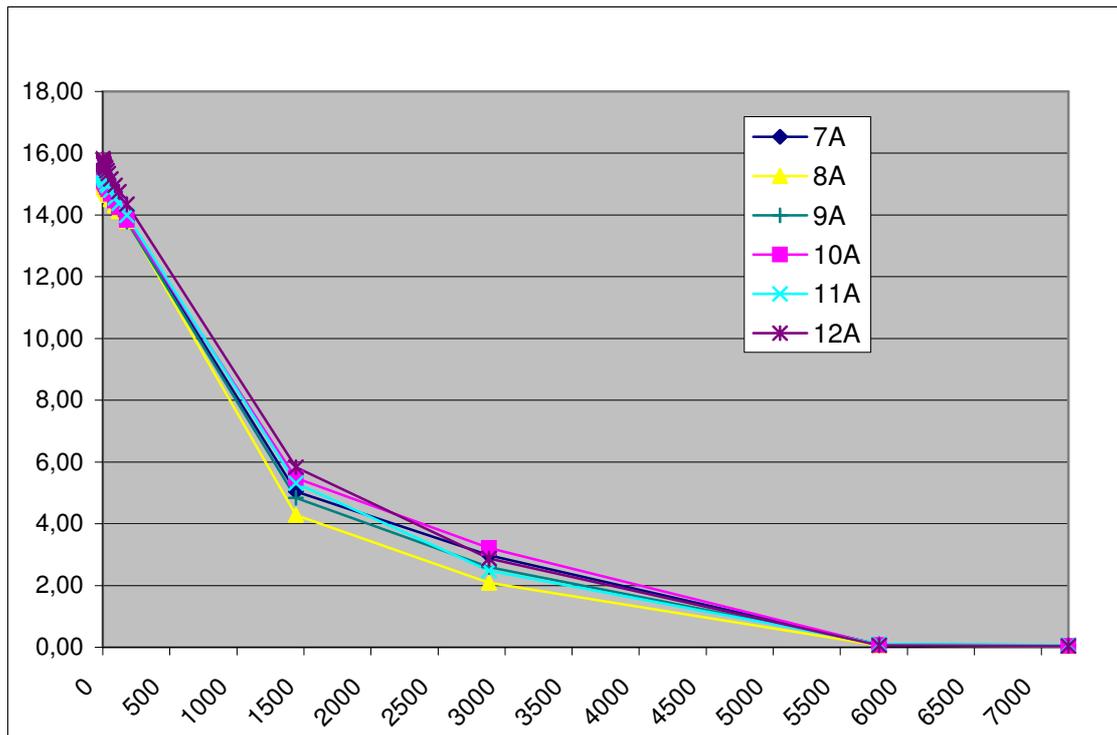


Diagramm 50: Wasserabnahmeverhalten der Probekörper 7A, 8A, 9A, 10A, 11A und 12A

Wasserabgabeverhalten Prismen																		
Zeit [min]	0	1	2	3	4	5	10	15	20	30	40	60	90	120	180	1440	5700	7200
1m <sub>i</sub> [g]	638,6	638,5	638,3	638,2	637,9	637,7	637,2	636,9	636,6	636,0	635,6	634,6	633,1	631,6	628,2	569,1	551,6	551,7
w [%]	15,86	15,84	15,80	15,78	15,73	15,69	15,60	15,55	15,49	15,38	15,31	15,13	14,86	14,59	13,97	3,25	0,07	0,09
2m <sub>i</sub> [g]	655,5	655,1	654,6	654,2	654,0	653,9	653,1	652,8	652,4	651,8	651,2	650,2	648,7	647,1	644,3	584,7	556,6	556,7
w [%]	17,83	17,76	17,67	17,60	17,56	17,54	17,40	17,35	17,27	17,17	17,06	16,88	16,61	16,32	15,82	5,11	0,05	0,07
3m <sub>i</sub> [g]	643,2	642,8	642,4	642,0	641,8	641,5	641,2	640,8	640,4	639,8	639,2	638,1	636,9	635,6	632,9	577,0	554,6	555,0
w [%]	15,93	15,86	15,79	15,72	15,68	15,63	15,57	15,50	15,43	15,32	15,21	15,01	14,80	14,56	14,08	4,00	0,04	0,04
5m <sub>i</sub> [g]	645,2	644,5	644,1	643,7	643,4	643,1	642,6	642,3	642,0	641,4	640,9	639,8	638,8	637,4	634,9	577,5	560,1	560,2
w [%]	15,19	15,07	15,00	14,93	14,87	14,82	14,73	14,68	14,62	14,52	14,43	14,23	14,05	13,80	13,35	3,11	0,01	0,02
6m <sub>i</sub> [g]	639,5	639,1	638,8	638,3	638,1	637,9	637,5	637,1	636,8	636,2	635,7	634,7	633,6	632,1	629,3	572,1	554,8	555,0
w [%]	15,25	15,17	15,12	15,03	14,99	14,96	14,89	14,81	14,76	14,65	14,56	14,38	14,18	13,91	13,41	3,10	0,02	0,02
7m <sub>i</sub> [g]	639,1	639,0	638,9	638,5	638,3	638,0	637,4	637,0	636,7	636,1	635,6	634,6	633,2	631,7	628,5	569,6	548,5	548,5
w [%]	16,60	16,58	16,57	16,49	16,46	16,40	16,29	16,22	16,16	16,06	15,96	15,78	15,53	15,25	14,67	3,92	0,07	0,07
8m <sub>i</sub> [g]	640,9	639,8	639,0	638,4	638,0	637,8	637,1	636,7	636,3	635,7	635,1	634,0	632,4	631,0	628,2	577,9	543,5	543,4
w [%]	18,01	17,81	17,66	17,55	17,47	17,44	17,31	17,23	17,16	17,05	16,94	16,74	16,44	16,18	15,67	6,41	0,07	0,06
10m <sub>i</sub> [g]	636,6	636,0	635,5	635,1	634,9	634,5	633,7	633,3	632,8	632,1	631,5	630,5	628,7	627,3	624,9	578,7	548,0	547,9
w [%]	16,21	16,10	16,01	15,94	15,90	15,83	15,68	15,61	15,52	15,39	15,28	15,10	14,77	14,51	14,07	5,64	0,04	0,02
11m <sub>i</sub> [g]	638,8	638,4	638,2	638,0	637,8	637,6	636,9	636,5	636,2	635,5	634,9	633,9	632,2	630,6	627,5	580,7	551,0	550,9
w [%]	16,02	15,95	15,91	15,87	15,84	15,80	15,67	15,60	15,55	15,42	15,31	15,13	14,82	14,53	13,97	5,47	0,07	0,05
12m <sub>i</sub> [g]	633,5	633,2	632,8	632,6	632,2	632,0	631,3	631,0	630,6	630,0	629,3	628,2	626,7	625,5	623,0	574,7	540,0	539,8
w [%]	17,45	17,39	17,32	17,28	17,20	17,17	17,04	16,98	16,91	16,80	16,67	16,46	16,18	15,96	15,50	6,54	0,11	0,07
13m <sub>i</sub> [g]	645,5	645,0	644,5	644,2	643,9	643,6	642,8	642,4	642,0	641,3	640,6	639,4	638,0	636,8	634,5	581,4	550,3	550,3
w [%]	17,38	17,29	17,20	17,15	17,09	17,04	16,89	16,82	16,75	16,62	16,49	16,28	16,02	15,80	15,38	5,73	0,07	0,07
14m <sub>i</sub> [g]	626,5	625,9	625,4	624,9	624,7	624,4	623,6	623,2	622,8	622,1	621,4	620,3	618,7	617,3	614,7	555,2	533,6	533,5

w [%]	17,54	17,43	17,34	17,24	17,20	17,15	17,00	16,92	16,85	16,72	16,59	16,38	16,08	15,82	15,33	4,17	0,11	0,09
<b>15m<sub>i</sub> [g]</b>	666,2	665,8	665,6	665,3	665,0	664,7	663,8	663,6	663,1	662,5	661,8	660,5	659,2	657,7	654,8	603,6	568,4	568,4
w [%]	17,35	17,28	17,25	17,19	17,14	17,09	16,93	16,89	16,80	16,70	16,58	16,35	16,12	15,85	15,34	6,32	0,12	0,12
<b>16m<sub>i</sub> [g]</b>	670,2	669,7	669,5	669,2	669,0	668,8	668,0	667,6	667,3	666,7	666,1	664,9	663,7	662,1	659,0	615,6	575,1	574,9
w [%]	16,68	16,59	16,56	16,50	16,47	16,43	16,30	16,23	16,17	16,07	15,96	15,76	15,55	15,27	14,73	7,17	0,12	0,09
<b>17m<sub>i</sub> [g]</b>	664,4	664,3	663,9	663,7	663,4	663,1	662,3	661,9	661,5	660,8	660,2	658,8	657,4	655,9	653,1	606,4	567,7	567,5
w [%]	17,16	17,14	17,07	17,03	16,98	16,93	16,79	16,72	16,65	16,52	16,42	16,17	15,92	15,66	15,16	6,93	0,11	0,07
<b>18m<sub>i</sub> [g]</b>	640,5	640,3	640,1	639,8	639,6	639,4	639,1	638,7	638,3	637,8	637,3	636,4	635,2	634,1	631,3	584,2	551,4	551,3
w [%]	16,24	16,21	16,17	16,12	16,08	16,04	15,99	15,92	15,84	15,75	15,66	15,50	15,28	15,08	14,57	6,03	0,07	0,05
<b>19m<sub>i</sub> [g]</b>	637,0	636,7	636,4	636,2	636,0	635,8	635,4	635,1	634,8	634,4	633,9	633,0	631,6	630,5	627,7	569,1	548,3	548,1
w [%]	16,33	16,27	16,22	16,18	16,14	16,11	16,03	15,98	15,92	15,85	15,76	15,60	15,34	15,14	14,63	3,93	0,13	0,09
<b>20m<sub>i</sub> [g]</b>	658,4	658,2	657,9	657,6	657,5	657,3	656,8	656,5	656,1	655,6	655,1	654,2	652,8	651,5	648,6	608,2	570,7	570,6
w [%]	15,45	15,41	15,36	15,31	15,29	15,26	15,17	15,11	15,04	14,96	14,87	14,71	14,47	14,24	13,73	6,65	0,07	0,05
<b>21m<sub>i</sub> [g]</b>	648,6	647,4	647,0	646,7	646,6	646,4	646,0	645,7	645,4	645,0	644,3	643,5	642,1	640,9	638,2	582,1	543,9	543,7
w [%]	19,34	19,12	19,04	18,99	18,97	18,93	18,86	18,80	18,75	18,68	18,55	18,40	18,14	17,92	17,42	7,10	0,07	0,04
<b>22m<sub>i</sub> [g]</b>	734,6	734,2	733,7	733,5	733,3	733,1	732,6	732,3	731,8	731,4	730,9	730,0	728,7	727,4	725,2	660,2	629,4	629,1
w [%]	16,86	16,80	16,72	16,69	16,66	16,62	16,54	16,50	16,42	16,35	16,27	16,13	15,92	15,72	15,37	5,03	0,13	0,08
<b>23m<sub>i</sub> [g]</b>	645,1	644,6	644,2	643,9	643,7	643,6	643,2	642,8	642,5	641,9	641,5	640,5	639,1	637,9	635,5	573,9	546,7	546,6
w [%]	18,13	18,04	17,96	17,91	17,87	17,85	17,78	17,71	17,65	17,54	17,47	17,29	17,03	16,81	16,37	5,09	0,11	0,09
<b>24m<sub>i</sub> [g]</b>	626,0	625,4	624,8	624,4	624,3	624,1	623,8	623,5	622,9	622,3	621,7	620,9	619,6	618,2	615,9	554,7	525,9	525,7
w [%]	19,15	19,03	18,92	18,84	22,25	22,21	18,73	18,67	18,56	18,44	18,33	18,18	17,93	17,66	17,22	5,58	0,10	0,06
<b>25m<sub>i</sub> [g]</b>	667,5	667,1	666,7	666,5	666,4	666,3	666,0	665,7	665,4	665,0	664,5	663,8	662,5	661,2	659,1	593,5	569,8	569,4
w [%]	17,35	17,28	17,21	17,18	17,16	17,14	17,09	17,04	16,98	16,91	16,82	16,70	16,47	16,24	15,88	4,34	0,18	0,11
<b>26m<sub>i</sub> [g]</b>	648,7	648,5	648,1	647,9	647,7	647,6	647,3	647,0	646,7	646,1	645,7	644,9	643,6	642,1	639,8	589,3	559,7	559,5
w [%]	16,03	15,99	15,92	15,88	15,85	15,83	15,78	15,72	15,67	15,56	15,49	15,35	15,11	14,85	14,43	5,40	0,11	0,07
<b>27m<sub>i</sub> [g]</b>	644,7	644,4	644,0	643,6	643,3	643,1	642,6	642,3	641,9	641,4	640,9	640,1	638,0	637,4	635,0	569,7	548,9	548,7
w [%]	17,58	17,53	17,45	17,38	17,33	17,29	17,20	17,14	17,07	16,98	16,89	16,74	16,36	16,25	15,81	3,90	0,11	0,07
<b>28m<sub>i</sub> [g]</b>	639,2	638,9	638,6	638,3	638,0	637,8	637,4	637,0	636,7	636,2	635,8	635,0	633,4	632,9	630,7	572,8	541,8	541,5
w [%]	18,11	18,05	18,00	17,94	17,89	17,85	17,78	17,70	17,65	17,55	17,48	17,33	17,04	16,94	16,54	5,84	0,11	0,06
<b>32m<sub>i</sub> [g]</b>	636,5	636,2	635,8	635,5	635,3	635,2	634,7	634,5	634,2	633,7	633,1	632,1	630,3	629,5	627,0	559,6	536,9	536,7
w [%]	18,64	18,58	18,51	18,45	18,42	18,40	18,30	18,27	18,21	18,12	18,01	17,82	17,48	17,33	16,87	4,31	0,07	0,04
<b>33m<sub>i</sub> [g]</b>	611,7	611,3	610,9	610,6	610,3	610,0	609,4	609,0	608,7	608,0	607,6	606,7	605,5	604,5	602,0	556,9	521,4	521,3
w [%]	17,36	17,29	17,21	17,15	17,10	17,04	16,92	16,85	16,79	16,65	16,58	16,40	16,17	15,98	15,50	6,85	0,04	0,02
<b>34m<sub>i</sub> [g]</b>	712,8	712,5	712,1	711,8	711,4	711,2	710,8	710,3	710,0	709,2	708,7	707,8	706,7	705,6	703,4	642,8	612,2	611,8
w [%]	16,62	16,57	16,51	16,46	16,39	16,36	16,30	16,21	16,16	16,03	15,95	15,80	15,63	15,45	15,09	5,17	0,16	0,10
<b>35m<sub>i</sub> [g]</b>	641,4	641,2	641,1	640,8	640,6	640,4	640,2	639,6	639,3	638,7	638,2	637,3	636,0	634,9	632,4	574,9	551,2	551,0
w [%]	16,47	16,43	16,42	16,36	16,32	16,29	16,25	16,14	16,09	15,98	15,89	15,73	15,49	15,29	14,84	4,39	0,09	0,05
<b>36m<sub>i</sub> [g]</b>	642,5	642,0	641,6	641,2	640,9	640,7	640,3	639,8	639,4	638,8	638,3	637,3	635,9	634,8	632,1	577,1	555,7	555,6
w [%]	15,70	15,61	15,54	15,47	15,42	15,38	15,31	15,22	15,14	15,04	14,95	14,75	14,51	14,32	13,83	3,93	0,07	0,05
<b>37m<sub>i</sub> [g]</b>	637,6	637,4	637,2	637,1	636,9	636,7	636,3	636,0	635,7	635,3	634,7	633,8	632,5	631,2	628,5	575,8	558,8	558,7
w [%]	14,14	14,11	14,07	14,05	14,02	13,98	13,91	13,86	13,80	13,73	13,62	11,26	13,23	13,00	12,51	3,08	0,04	0,02
<b>38m<sub>i</sub> [g]</b>	623,8	623,6	623,4	623,1	622,9	622,7	622,4	622,0	621,7	621,1	620,6	619,6	618,1	616,7	614,2	563,9	553,3	553,2
w [%]	12,78	12,75	12,71	12,66	12,62	12,58	12,53	12,46	12,40	12,29	12,20	16,98	11,75	11,50	11,05	1,95	0,04	0,02
<b>39m<sub>i</sub> [g]</b>	618,1	618,0	617,7	617,5	617,3	617,2	616,8	616,5	616,1	615,6	615,2	614,4	613,1	611,9	609,5	559,1	536,5	536,4
w [%]	15,32	15,30	15,24	15,21	15,17	15,15	15,07	15,02	14,94	14,85	14,78	14,63	14,38	14,16	13,71	4,31	0,09	0,07
<b>40m<sub>i</sub> [g]</b>	708,9	708,6	708,3	708,0	707,8	707,6	707,1	706,8	706,3	705,8	705,4	704,5	703,3	702,0	699,7	648,9	620,3	620,1
w [%]	14,36	14,31	14,26	14,21	14,18	14,15	14,07	14,02	13,94	13,86	13,79	13,65	13,45	13,24	12,87	4,68	0,06	0,03
<b>41m<sub>i</sub> [g]</b>	627,1	626,7	626,3	626,0	625,6	625,5	625,1	624,8	624,5	624,0	623,5	622,4	621,2	619,9	617,3	566,0	543,3	543,2
w [%]	15,47	15,39	15,32	15,26	15,19	15,17	15,10	15,04	14,99	14,90	14,80	14,60	14,38	14,14	13,66	4,22	0,04	0,02

<b>43m<sub>i</sub></b> [g]	639,2	639,0	638,8	638,5	638,2	638,0	637,6	637,2	636,8	636,3	635,8	635,0	633,9	632,7	630,4	582,8	559,0	558,7
w [%]	14,45	14,41	14,38	14,32	14,27	14,23	14,16	14,09	14,02	13,93	13,84	13,70	13,50	13,29	12,87	4,35	0,09	0,04
<b>46m<sub>i</sub></b> [g]	623,5	623,2	622,9	622,7	622,4	622,2	621,7	621,5	621,2	620,6	620,2	619,3	618,1	617,0	615,0	570,2	541,4	541,0
w [%]	15,29	15,24	15,18	15,14	15,09	15,05	14,96	14,92	14,87	14,76	14,68	14,52	14,29	14,09	13,72	5,44	0,11	0,04
<b>48m<sub>i</sub></b> [g]	648,7	648,5	648,3	648,0	647,8	647,6	637,3	647,0	646,7	646,1	645,6	644,8	643,5	642,2	639,7	586,5	564,9	564,8
w [%]	14,88	14,84	14,80	14,75	14,72	14,68	12,86	14,57	14,52	14,41	14,33	14,18	13,95	13,72	13,28	3,86	0,04	0,02
<b>49m<sub>i</sub></b> [g]	631,5	631,2	630,9	630,7	630,5	630,2	629,8	629,4	629,0	628,4	627,9	627,0	625,9	624,7	622,2	572,6	550,6	550,4
w [%]	14,76	14,70	14,65	14,61	14,57	14,52	14,45	14,37	14,30	14,19	14,10	13,94	13,74	13,52	13,07	4,05	0,05	0,02
<b>50m<sub>i</sub></b> [g]	635,6	635,3	635,0	634,8	634,5	634,4	634,0	633,6	633,3	632,7	632,3	631,4	630,2	628,9	626,6	579,2	549,1	548,8
w [%]	15,88	15,82	15,77	15,73	15,68	15,66	15,59	15,52	15,46	15,35	15,28	15,11	14,90	14,66	14,24	5,60	0,11	0,05
<b>51m<sub>i</sub></b> [g]	618,7	618,5	618,3	618,2	618,0	617,9	617,5	617,1	616,8	616,3	615,8	614,9	613,6	612,3	609,6	560,4	549,0	548,9
w [%]	12,74	12,70	12,66	12,65	12,61	12,59	12,52	12,45	12,39	12,30	12,21	12,04	11,81	11,57	11,08	2,11	0,04	0,02
<b>52m<sub>i</sub></b> [g]	628,4	628,3	628,1	627,9	627,6	627,5	627,1	626,8	626,5	625,9	625,5	624,7	623,3	621,8	619,0	564,9	541,7	541,6
w [%]	16,07	16,05	16,01	15,98	15,92	15,90	15,83	15,77	15,72	15,61	15,53	15,39	15,13	14,85	14,33	4,34	0,06	0,04
<b>54m<sub>i</sub></b> [g]	632,0	631,7	631,5	631,2	631,0	630,8	630,4	630,2	629,7	629,2	628,6	627,6	626,3	625,1	622,6	576,1	555,1	555,0
w [%]	13,89	13,84	13,80	13,75	13,71	13,68	13,61	13,57	13,48	13,39	13,28	13,10	12,87	12,65	12,20	3,82	0,04	0,02

Bestimmung Ultraschallgeschwindigkeit an den unbehandelten Prismen Vgl. Tabelle Tabelle 6													
Probe		1	2	3	5	6	7	8	10	11	12	13	
Abmessungen [mm]	h	200,0	201,0	201,0	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	201,0	201,0	200,0	
	b R2,1	40,7	40,3	39,8	39,9	40,1	40,4	40,0	40,3	40,4	40,5	40,4	
	b R2,2	40,7	40,3	40,1	39,8	40,1	40,4	40,1	40,4	40,5	40,5	40,4	
	b R2,3	40,8	40,3	40,1	39,5	40,1	40,4	40,1	40,4	40,4	40,4	40,4	
	b R3,1	40,3	40,4	40,6	40,6	40,4	41,1	40,5	40,0	40,2	40,0	40,2	
	b R3,2	40,4	40,4	40,6	40,6	40,3	40,9	40,5	40,1	40,2	39,9	40,2	
	b R3,3	40,3	40,4	40,6	40,7	40,4	40,2	40,5	40,2	40,2	40,0	40,1	
Laufzeit [ms]	R1	71,2	92,8	79,2	79	80	75	80,1	71,5	73,3	78,2	79,8	
	R2,1	15,5	16,5	17,3	15,8	15,1	14,7	14,9	13,8	14,4	14,3	14,5	
	R2,2	14,9	16,2	15,3	15,3	14,7	14,4	15,4	14	14,7	15	14,8	
	R2,3	15	19,5	14,8	14,4	15,5	14,9	15,1	13,7	13,7	14,9	14,7	
	R3,1	14,8	14	15,3	13	14,1	14,2	16,2	13,7	15,3	16,5	16,2	
	R3,2	14,8	15,1	14	13,3	13,7	14,6	16,1	13,6	15	14,8	16	
	R3,3	15,1	16,7	14	12,7	13,5	14,5	16,3	14,1	12,4	15,8	15,3	
Geschwindigkeit t [km/s]	vh	<b>2,81</b>	<b>2,17</b>	<b>2,54</b>	<b>2,53</b>	<b>2,50</b>	<b>2,67</b>	<b>2,50</b>	<b>2,80</b>	<b>2,74</b>	<b>2,57</b>	<b>2,51</b>	
	v R2,1	2,63	2,44	2,30	2,53	2,66	2,75	2,68	2,92	2,81	2,83	2,79	
	v R2,2	2,73	2,49	2,62	2,60	2,73	2,81	2,60	2,89	2,76	2,70	2,73	
	v R2,3	2,72	2,07	2,71	2,74	2,59	2,71	2,66	2,95	2,95	2,71	2,75	

v R3,1	2,72	2,89	2,65	3,12	2,87	2,89	2,50	2,92	2,63	2,42	2,48
v R3,2	2,73	2,68	2,90	3,05	2,94	2,80	2,52	2,95	2,68	2,70	2,51
v R3,3	2,67	2,42	2,90	3,20	2,99	2,77	2,48	2,85	3,24	2,53	2,62
Mittelwert	2,70	2,50	2,68	2,88	2,80	2,79	2,57	2,91	2,84	2,65	2,65

Bestimmung Ultraschallgeschwindigkeit an den unbehandelten Prismen Vgl. Tabelle Tabelle 6												
Probe		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Abmessungen [mm]	h	201,0	200,0	200,0	200,0	201,0	200,0	201,0	200,0	201,0	200,0	200,0
	b R2,1	40,1	40,6	40,5	40,6	40,2	40,6	40,3	41,1	45,5	40,4	40,4
	b R2,2	40,1	40,6	40,5	40,6	40,2	40,6	40,4	41,3	45,8	40,4	40,4
	b R2,3	40,1	40,6	40,5	40,6	40,3	40,6	40,4	41,4	45,6	40,4	40,4
	b R3,1	40,4	40,7	41,8	41,6	40,4	40,7	41,2	40,7	40,2	40,2	39,9
	b R3,2	40,4	41,1	41,6	41,7	40,5	40,5	41,5	40,7	40,2	40,3	39,9
	b R3,3	40,4	41,5	41,5	41,7	40,4	40,0	41,5	40,7	40,1	40,3	39,8
Laufzeit [ms]	R1	77,8	76,5	77,4	74,2	72,1	72,9	70,7	83	77,1	79,6	81,8
	R2,1	16,2	16,6	14,5	15,5	14,3	14,4	13,9	14,5	16,2	14,6	14,9
	R2,2	14,3	15,7	14,9	13,9	14,6	14	13,7	16,4	18	14,8	14,6
	R2,3	13,8	16	15	13,4	14,2	15,1	14,2	16,5	16,6	14,6	14,6
	R3,1	15,7	16,4	15,6	15,2	13,9	14,1	13,5	16,7	14,2	15,4	15
	R3,2	15,1	15,9	15,7	14,8	14,6	13,9	13,6	17,8	13,7	15,2	15,6
	R3,3	15,9	15,5	16	14,3	13,3	15,3	14,9	16,5	14	14,9	15,2
Geschwindigkeit [km/s]	vh	<b>2,58</b>	<b>2,61</b>	<b>2,58</b>	<b>2,70</b>	<b>2,79</b>	<b>2,74</b>	<b>2,84</b>	<b>2,41</b>	<b>2,61</b>	<b>2,51</b>	<b>2,44</b>
	v R2,1	2,48	2,45	2,79	2,62	2,81	2,82	2,90	2,83	2,81	2,77	2,71
	v R2,2	2,80	2,59	2,72	2,92	2,75	2,90	2,95	2,52	2,54	2,73	2,77
	v R2,3	2,91	2,54	2,70	3,03	2,84	2,69	2,85	2,51	2,75	2,77	2,77
	v R3,1	2,57	2,48	2,68	2,74	2,91	2,89	3,05	2,44	2,83	2,61	2,66
	v R3,2	2,68	2,58	2,65	2,82	2,77	2,91	3,05	2,29	2,93	2,65	2,56
	v R3,3	2,54	2,68	2,59	2,92	3,04	2,61	2,79	2,47	2,86	2,70	2,62
Mittelwert	2,66	2,55	2,69	2,84	2,85	2,80	2,93	2,51	2,79	2,71	2,68	

Bestimmung Ultraschallgeschwindigkeit an den unbehandelten Prismen Vgl. Tabelle Tabelle 6												
Probe												
Nr.		25	26	27	28	32	33	34	35	36	37	38
Abmessungen [mm]	h	201,0	200,0	200,0	201,0	201,0	201,0	201,0	200,0	200,0	200,0	201,0
	b R2,1	41,0	40,0	40,1	40,4	40,2	40,2	40,6	41,1	40,2	40,0	40,4
	b R2,2	41,2	40,0	40,2	40,4	40,3	40,1	40,6	41,1	40,2	40,0	40,4
	b R2,3	41,0	40,0	40,1	40,4	40,3	40,2	40,6	41,2	40,2	40,0	40,4
	b R3,1	40,5	40,3	40,7	40,5	40,6	40,2	45,0	40,7	40,4	40,3	40,5
	b R3,2	40,5	40,3	40,5	40,5	40,6	40,1	45,2	40,7	40,5	40,3	40,5
	b R3,3	40,5	40,3	40,5	40,5	40,6	40,0	45,2	40,6	40,5	40,3	40,5
Laufzeit [ms]	R1	76,6	72,6	78,1	76,3	82,7	76,3	75,9	74,8	81,8	73,3	72,5
	R2,1	15,6	14,7	14,6	15	16,7	16,9	14,9	13,5	15,8	15,5	14,7
	R2,2	15,5	13,3	14	15	16,6	14,6	14,1	14	16,4	15,3	15,7
	R2,3	15	14,6	14,6	15,4	16,7	15	14	13,9	16,5	14,9	13,9
	R3,1	14	14,5	15,7	15,7	16,6	15,6	15,5	13,5	14,3	15,1	13,5
	R3,2	15	13,7	14,3	15	15,4	15	15,8	13,4	14,8	15,5	14,8
	R3,3	14,4	14,7	14,4	15,6	16,5	15	16,1	15,7	14,7	14,3	14,4
Geschwindigkeit [km/s]	vh	<b>2,62</b>	<b>2,75</b>	<b>2,56</b>	<b>2,63</b>	<b>2,43</b>	<b>2,63</b>	<b>2,65</b>	<b>2,67</b>	<b>2,44</b>	<b>2,73</b>	<b>2,77</b>
	v R2,1	2,63	2,72	2,75	2,69	2,41	2,38	2,72	3,04	2,54	2,58	2,75
	v R2,2	2,66	3,01	2,87	2,69	2,43	2,75	2,88	2,94	2,45	2,61	2,57
	v R2,3	2,73	2,74	2,75	2,62	2,41	2,68	2,90	2,96	2,44	2,68	2,91
	v R3,1	2,89	2,78	2,59	2,58	2,45	2,58	2,90	3,01	2,83	2,67	3,00
	v R3,2	2,70	2,94	2,83	2,70	2,64	2,67	2,86	3,04	2,74	2,60	2,74
	v R3,3	2,81	2,74	2,81	2,60	2,46	2,67	2,81	2,59	2,76	2,82	2,81
	Mittelwert	2,72	2,81	2,77	2,65	2,47	2,62	2,85	2,93	2,62	2,66	2,80

Bestimmung Ultraschallgeschwindigkeit an den unbehandelten Prismen Vgl. Tabelle Tabelle 6												
Probe												
Nr.		39	40	41	43	46	48	49	50	51	52	54
Abmessungen [mm]	h	201,0	200,0	200,0	200,0	201,0	200,0	200,0	200,0	201,0	200,0	201,0
	b R2,1	40,2	45,2	40,6	40,6	40,0	41,3	40,6	40,3	40,3	40,6	40,5
	b R2,2	40,2	45,6	40,6	40,6	40,0	41,3	40,6	40,4	40,4	40,5	40,4
	b R2,3	40,2	45,7	40,6	40,6	40,0	41,4	40,6	40,2	40,4	40,6	40,4
	b R3,1	40,2	40,5	40,2	40,4	39,9	40,4	40,6	40,2	40,4	40,3	40,1
	b R3,2	40,2	40,5	40,3	40,4	40,2	40,5	40,6	40,3	40,5	40,3	40,1
	b R3,3	40,2	40,5	40,4	40,4	40,2	40,5	40,6	40,2	40,5	40,2	40,1
Laufzeit [ms]	R1	80,9	77,9	80,8	76,3	84,9	78	76,7	81,3	69,7	80,2	72,2
	R2,1	15	16,4	15,3	15,7	14,7	15,5	14,5	16,1	14,3	16,5	11,6
	R2,2	15,6	18,2	16,1	15,7	14,2	16	14,3	16,1	14,3	16,7	15,6
	R2,3	15,5	17,4	17,7	14	14,8	16,8	14,5	15,1	14,2	16,2	16,3
	R3,1	15,8	15,1	14,9	14,9	18	14,2	15,1	14,3	14,1	16	13,4
	R3,2	15	15	15,4	14,7	15,5	15,2	14,4	15,6	13,8	15,4	16,5
	R3,3	15,8	14,4	15,4	13,2	15,2	15,2	14,5	15,3	13,1	15,6	15,1
Geschwindigkeit [km/s]	vh	<b>2,48</b>	<b>2,57</b>	<b>2,48</b>	<b>2,62</b>	<b>2,37</b>	<b>2,56</b>	<b>2,61</b>	<b>2,46</b>	<b>2,88</b>	<b>2,49</b>	<b>2,78</b>
	v R2,1	2,68	2,76	2,65	2,59	2,72	2,66	2,80	2,50	2,82	2,46	3,49
	v R2,2	2,58	2,51	2,52	2,59	2,82	2,58	2,84	2,51	2,83	2,43	2,59
	v R2,3	2,59	2,63	2,29	2,90	2,70	2,46	2,80	2,66	2,85	2,51	2,48
	v R3,1	2,54	2,68	2,70	2,71	2,22	2,85	2,69	2,81	2,87	2,52	2,99
	v R3,2	2,68	2,70	2,62	2,75	2,59	2,66	2,82	2,58	2,93	2,62	2,43
	v R3,3	2,54	2,81	2,62	3,06	2,64	2,66	2,80	2,63	3,09	2,58	2,66
	Mittelwert	2,60	2,68	2,55	2,74	2,58	2,64	2,76	2,59	2,89	2,51	2,77

Bestimmung Ultraschallgeschwindigkeit an den unbehandelten Prismen Vgl. Tabelle Tabelle 6													
Probe													
Nr.		1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	9A	10A	11A	12A
Abmessungen [mm]	h	199,0	200,0	198,0	200,0	199,0	199,0	200,0	198,0	199,0	200,0	200,0	198,0
	b R2,1	49,6	50,4	50,5	50,7	50,6	50,3	50,8	50,8	50,7	50,8	50,8	49,5

	b R2,2	50,7	50,8	50,7	50,8	50,3	50,8	50,6	50,8	50,7	50,6	50,8	50,6
	b R2,3	50,6	50,7	50,7	50,8	50,8	50,6	50,5	50,7	50,6	50,0	50,8	50,6
	b R3,1	50,1	50,5	50,8	50,8	50,5	50,4	50,4	50,7	50,3	50,8	50,0	49,4
	b R3,2	50,8	50,8	50,6	50,8	50,5	50,6	50,7	50,7	50,3	50,9	50,3	50,6
	b R3,3	50,5	50,6	50,8	50,9	50,4	50,5	50,5	50,6	50,3	50,0	50,8	50,5
Laufzeit [ms]	R1	92,2	89,6	87,5	78,1	90,2	86,2	90,6	90,2	88,1	91,8	87,9	87,3
	R2,1	21,3	21,7	17,8	19	19,8	19,7	20,5	21	19,2	21,6	20,4	20
	R2,2	21	20,6	18,3	19,2	20,8	19,2	21	20,2	20	21,4	20,2	20,3
	R2,3	21	21,1	19	19,1	20,1	20,5	21,4	21,2	18,9	21,4	20,6	21
	R3,1	19,9	21,2	18,5	18,7	21,5	18,9	20	20,6	20	19,8	19,4	19,8
	R3,2	18,3	20,7	19,7	19	21,3	18,2	19,7	19,6	20	19,7	20,2	19,7
	R3,3	19,3	20,3	19,3	18,5	21,1	20,1	20,6	20,1	20	20,3	19,8	20,4
Geschwindigkeit [km/s]	vh	<b>2,16</b>	<b>2,23</b>	<b>2,26</b>	<b>2,56</b>	<b>2,21</b>	<b>2,31</b>	<b>2,21</b>	<b>2,20</b>	<b>2,26</b>	<b>2,18</b>	<b>2,28</b>	<b>2,27</b>
	v R2,1	2,33	2,32	2,84	2,67	2,56	2,55	2,48	2,42	2,64	2,35	2,49	2,48
	v R2,2	2,41	2,47	2,77	2,65	2,42	2,65	2,41	2,51	2,54	2,36	2,51	2,49
	v R2,3	2,41	2,40	2,67	2,66	2,53	2,47	2,36	2,39	2,68	2,34	2,47	2,41
	v R3,1	2,52	2,38	2,75	2,72	2,35	2,67	2,52	2,46	2,52	2,57	2,58	2,49
	v R3,2	2,78	2,45	2,57	2,67	2,37	2,78	2,57	2,59	2,52	2,58	2,49	2,57
	v R3,3	2,62	2,49	2,63	2,75	2,39	2,51	2,45	2,52	2,52	2,46	2,57	2,48
	Mittelwert	2,51	2,42	2,70	2,69	2,43	2,60	2,47	2,48	2,57	2,44	2,52	2,49

Vergleich Rohdichte der unbehandelten und mit Wasser und Bakterien behandelten Probekörper										
Vgl. Tabelle 11 und Diagramm 7										
Probe Nr.	unbehandelte Probekörper					behandelte Probekörper				
	$m_t$	$m_f$	$m_a$	$V_R$	$\rho_R$	$m_t$	$m_f$	$m_a$	$V_R$	$\rho_R$
1	551,20	618,70	294,10	324,60	1,70	532,90	597,50	286,00	311,50	1,71
2	556,30	641,20	322,50	318,70	1,75					
3	554,80	636,80	316,40	320,40	1,73	548,30	628,40	315,20	313,20	1,75
5	560,10	637,20	321,80	315,40	1,78	552,70	627,80	317,70	310,10	1,78
6	554,90	632,60	315,80	316,80	1,75	546,70	622,80	311,50	311,30	1,76
7	548,10	622,70	299,80	322,90	1,70	539,80	611,30	294,70	316,60	1,70
8	543,10	624,30	304,10	320,20	1,70	533,30	611,20	300,70	310,50	1,72
10	547,80	619,40	300,20	319,20	1,72	539,80	609,70	296,90	312,80	1,73
11	550,60	623,80	302,80	321,00	1,72	536,90	606,80	294,60	312,20	1,72
12	539,40	617,70	298,80	318,90	1,69					
13	549,90	630,10	312,00	318,10	1,73	539,20	616,70	305,40	311,30	1,73

5A	682,90	788,10	390,50	397,60	1,72	666,10	768,30	382,20	386,10	1,73
6A	699,70	800,00	400,40	399,60	1,75	692,80	794,10	410,20	383,90	1,80
7A	687,70	787,20	387,50	399,70	1,72	677,60	776,10	384,30	391,80	1,73

Vergleich Rohdichte der unbehandelten und mit Kalkwasser und Bakterien behandelten Probekörper										
Vgl. Tabelle 11 und Diagramm 6										
Probe Nr.	unbehandelte Probekörper					behandelte Probekörper				
	$m_t$	$m_f$	$m_a$	$V_R$	$\rho_R$	$m_t$	$m_f$	$m_a$	$V_R$	$\rho_R$
14	533,00	608,50	292,10	316,40	1,68	526,00	601,30	288,00	313,30	1,68
15	567,70	648,80	320,50	328,30	1,73	557,20	635,50	314,60	320,90	1,74
16	574,40	654,30	321,50	332,80	1,73	567,80	645,20	318,30	326,90	1,74
17	567,10	645,80	316,30	329,50	1,72	559,20	637,50	312,90	324,60	1,72
18	551,00	621,20	301,40	319,80	1,72	545,10	614,70	298,50	316,20	1,72
19	547,60	618,00	298,10	319,90	1,71	542,60	612,70	296,30	316,40	1,71
20	570,30	640,20	311,20	329,00	1,73	562,30	630,20	305,80	324,40	1,73
21	543,50	629,50	303,30	326,20	1,67	537,90	621,30	299,80	321,50	1,67
22	628,60	715,40	355,50	359,90	1,75	622,20	707,40	354,70	352,70	1,76
23	546,10	625,60	308,90	316,70	1,72	538,50	615,80	303,10	312,70	1,72
24	525,40	608,20	296,50	311,70	1,69					
1A	692,00	791,50	399,40	392,10	1,76	669,10	767,70	387,80	379,90	1,76
2A	666,30	767,90	375,80	392,10	1,70	661,60	761,50	369,40	392,10	1,69
3A	689,80	790,30	397,60	392,70	1,76	682,10	781,10	391,30	389,80	1,75

Vergleich Rohdichte der unbehandelten und mit Kalkwasser behandelten Probekörper										
Vgl. Tabelle 11 und Diagramm 5										
Probe Nr.	unbehandelte Probekörper					behandelte Probekörper				
	$m_t$	$m_f$	$m_a$	$V_R$	$\rho_R$	$m_t$	$m_f$	$m_a$	$V_R$	$\rho_R$
27	548,30	624,10	304,80	319,30	1,72	548,50	624,30	305,70	318,60	1,72
28	541,20	616,60	293,70	322,90	1,68	541,50	616,50	295,00	321,50	1,68
32	536,50	617,50	297,10	320,40	1,67	536,80	617,30	296,70	320,60	1,67
33	521,20	592,50	280,20	312,30	1,67	521,30	589,70	275,40	314,30	1,66
34	611,20	693,80	335,90	357,90	1,71	611,70	690,70	332,80	357,90	1,71
35	550,70	624,50	295,90	328,60	1,68	551,20	622,00	294,60	327,40	1,68
36	555,30	638,10	319,10	319,00	1,74	555,10	636,40	318,20	318,20	1,74

37	558,60	634,60	318,10	316,50	1,76	558,80	632,50	315,60	316,90	1,76
38	553,10	620,10	297,20	322,90	1,71	553,20	618,70	296,80	321,90	1,72
39	536,00	614,50	296,80	317,70	1,69	536,10	614,30	296,90	317,40	1,69
40	619,90	704,90	343,00	361,90	1,71	620,10	702,60	342,20	360,40	1,72
10A	693,50	796,20	398,10	398,10	1,74	693,50	795,90	400,10	395,80	1,75
11A	688,20	789,90	390,60	399,30	1,72	688,10	789,50	392,00	397,50	1,73
12A	675,90	777,70	385,70	392,00	1,72	675,60	779,50	388,50	391,00	1,73

Vergleich Wasseraufnahme der unbehandelten und mit Wasser und Bakterien behandelten Probekörper								
Vgl. Tabelle 12 und Diagramm 9								
Probe Nr.	unbehandelte Probekörper			behandelte Probekörper				
	$m_t$	$m_f$	w	$m_t$	$m_f$	w		
1	551,20	618,70	12,25	532,90	597,50	12,12		
2	556,30	641,20	15,26					
3	554,80	636,80	14,78	548,30	628,40	14,61		
5	560,10	637,20	13,77	552,70	627,80	13,59		
6	554,90	632,60	14,00	546,70	622,80	13,92		
7	548,10	622,70	13,61	539,80	611,30	13,25		
8	543,10	624,30	14,95	533,30	611,20	14,61		
10	547,80	619,40	13,07	539,80	609,70	12,95		
11	550,60	623,80	13,29	536,90	606,80	13,02		
12	539,40	617,70	14,52					
13	549,90	630,10	14,58	539,20	616,70	14,37		
5A	682,90	788,10	15,40	666,10	768,30	15,34		
6A	699,70	800,00	14,33	692,80	794,10	14,62		
7A	687,70	787,20	14,47	677,60	776,10	14,54		

Vergleich Wasseraufnahme der unbehandelten und mit Kalkwasser und Bakterien behandelten Probekörper								
Vgl. Tabelle 12 und Diagramm 10								
Probe Nr.	unbehandelte Probekörper			behandelte Probekörper				
	$m_t$	$m_f$	w	$m_t$	$m_f$	w		
14	533,00	608,50	14,17	526,00	601,30	14,32		
15	567,70	648,80	14,29	557,20	635,50	14,05		
16	574,40	654,30	13,91	567,80	645,20	13,63		

17	567,10	645,80	13,88	559,20	637,50	14,00
18	551,00	621,20	12,74	545,10	614,70	12,77
19	547,60	618,00	12,86	542,60	612,70	12,92
20	570,30	640,20	12,26	562,30	630,20	12,08
21	543,50	629,50	15,82	537,90	621,30	15,50
22	628,60	715,40	13,81	622,20	707,40	13,69
23	546,10	625,60	14,56	538,50	615,80	14,35
24	525,40	608,20	15,76			
1A	692,00	791,50	14,38	669,10	767,70	14,74
2A	666,30	767,90	15,25	661,60	761,50	15,10
3A	689,80	790,30	14,57	682,10	781,10	14,51

Vergleich Wasseraufnahme der unbehandelten und mit Kalkwasser behandelten Probekörper Vgl. Tabelle 12 und Diagramm 8						
Probe Nr.	unbehandelte Probekörper			behandelte Probekörper		
	$m_t$	$m_f$	w	$m_t$	$m_f$	w
27	548,30	624,10	13,82	548,50	624,30	13,82
28	541,20	616,60	13,93	541,50	616,50	13,85
32	536,50	617,50	15,10	536,80	617,30	15,00
33	521,20	592,50	13,68	521,30	589,70	13,12
34	611,20	693,80	13,51	611,70	690,70	12,91
35	550,70	624,50	13,40	551,20	622,00	12,84
36	555,30	638,10	14,91	555,10	636,40	14,65
37	558,60	634,60	13,61	558,80	632,50	13,19
38	553,10	620,10	12,11	553,20	618,70	11,84
39	536,00	614,50	14,65	536,10	614,30	14,59
40	619,90	704,90	13,71	620,10	702,60	13,30
10A	693,50	796,20	14,81	693,50	795,90	14,77
11A	688,20	789,90	14,78	688,10	789,50	14,74
12A	675,90	777,70	15,06	675,60	779,50	15,38

Vergleich Wasseraufnahmeverhalten vor und nach der Behandlung mit Bakterien und Wasser													
Vgl. Diagramm 11, Diagramm 12 und Diagramm 13													
	Zeit [min]	0	1	2	3	4	5	10	15	20	30	40	
6	unbe- handelt	$m_i$ [g]	554,90	629,60	630,70	632,70	632,30	632,60	632,90	632,90	632,50	633,30	632,40
		$w_i$ [%]	0,00	13,46	13,66	14,02	13,95	14,00	14,06	14,06	13,98	14,13	13,97
	behan- delt	$m_i$ [g]	545,90	620,70	622,50	623,10	623,80	624,00	623,80	624,00	624,50	624,00	623,60
		$w_i$ [%]	0,00	13,70	14,03	14,14	14,27	14,31	14,27	14,31	14,40	14,31	14,23
11	unbe- handelt	$m_i$ [g]	550,60	617,30	622,00	622,30	623,20	623,30	624,30	623,50	623,70	623,50	623,60
		$w_i$ [%]	0,00	12,11	12,97	13,02	13,19	13,20	13,39	13,24	13,28	13,24	13,26
	behan- delt	$m_i$ [g]	536,10	603,90	606,40	607,20	607,90	608,20	608,00	607,90	608,00	607,90	607,60
		$w_i$ [%]	0,00	12,65	13,11	13,26	13,39	13,45	13,41	13,39	13,41	13,39	13,34
6A	unbe- handelt	$m_i$ [g]	699,70	787,40	796,90	797,80	797,80	798,30	798,90	799,10	799,70	799,40	799,40
		$w_i$ [%]	0,00	12,53	13,89	14,02	14,02	14,09	14,18	14,21	14,29	14,25	14,25
	behan- delt	$m_i$ [g]	691,90	782,80	789,30	790,90	791,10	791,80	792,40	792,10	792,20	792,40	792,20
		$w_i$ [%]	0,00	13,14	14,08	14,31	14,34	14,44	14,53	14,48	14,50	14,53	14,50

Vergleich Wasseraufnahmeverhalten vor und nach der Behandlung mit Bakterien und Kalkwasser													
Vgl. Diagramm 14, Diagramm 15 und Diagramm 16													
17	unbe- handelt	$m_i$ [g]	567,10	643,60	646,20	646,80	646,70	648,70	648,20	649,30	647,90	648,30	648,00
		$w_i$ [%]	0,00	13,49	13,95	14,05	14,04	14,39	14,30	14,49	14,25	14,32	14,27
	behan- delt	$m_i$ [g]	558,20	632,00	633,60	634,60	635,70	635,80	636,00	635,80	635,90	635,80	635,70
		$w_i$ [%]	0,00	13,22	13,51	13,69	13,88	13,90	13,94	13,90	13,92	13,90	13,88
22	unbe- handelt	$m_i$ [g]	628,60	711,10	715,50	716,80	717,00	716,80	718,20	717,90	717,50	717,80	716,50
		$w_i$ [%]	0,00	13,12	13,82	14,03	14,06	14,03	14,25	14,21	14,14	14,19	13,98
	behan- delt	$m_i$ [g]	621,30	701,80	704,50	705,30	705,10	706,50	706,10	706,60	706,10	706,30	705,80
		$w_i$ [%]	0,00	12,96	13,39	13,52	13,49	13,71	13,65	13,73	13,65	13,68	13,60
1A	unbe- handelt	$m_i$ [g]	692,00	775,10	788,80	790,30	790,60	791,40	791,00	791,50	791,70	792,00	791,40
		$w_i$ [%]	0,00	12,01	13,99	14,21	14,25	14,36	14,31	14,38	14,41	14,45	14,36
	behan- delt	$m_i$ [g]	668,10	752,20	760,70	762,30	763,30	763,40	764,70	764,90	764,40	764,90	764,20
		$w_i$ [%]	0,00	12,59	13,86	14,10	14,25	14,26	14,46	14,49	14,41	14,49	14,38

Vergleich Wasseraufnahmeverhalten vor und nach der Behandlung mit Kalkwasser														
Vgl. Diagramm 17, Diagramm 18 und Diagramm 19														
32	unbe-	handelt	$m_i$ [g]	536,50	609,30	615,70	617,00	617,60	618,10	618,90	618,30	617,60	617,60	617,60
			$w_i$ [%]	0,00	13,57	14,76	15,00	15,12	15,21	15,36	15,25	15,12	15,12	15,12
	behandelt	$m_i$ [g]	535,90	609,50	615,00	615,80	616,80	617,10	617,80	617,80	617,70	617,50	617,40	617,40
		$w_i$ [%]	0,00	13,73	14,76	14,91	15,10	15,15	15,28	15,28	15,26	15,23	15,21	15,21
36	unbe-	handelt	$m_i$ [g]	555,30	635,10	636,50	637,70	637,90	638,40	638,60	638,50	638,50	638,20	639,00
			$w_i$ [%]	0,00	14,37	14,62	14,84	14,87	14,96	15,00	14,98	14,98	14,93	15,07
	behandelt	$m_i$ [g]	554,20	633,60	635,10	635,80	636,20	636,90	636,80	637,00	636,80	636,50	636,70	636,70
		$w_i$ [%]	0,00	14,33	14,60	14,72	14,80	14,92	14,90	14,94	14,90	14,85	14,89	14,89
12A	unbe-	handelt	$m_i$ [g]	675,90	754,90	772,00	774,90	775,80	776,70	776,60	777,00	777,30	777,20	777,40
			$w_i$ [%]	0,00	11,69	14,22	14,65	14,78	14,91	14,90	14,96	15,00	14,99	15,02
	behandelt	$m_i$ [g]	674,50	736,70	757,30	768,80	773,70	775,30	776,50	776,80	776,60	776,70	776,70	776,70
		$w_i$ [%]	0,00	9,22	12,28	13,98	14,71	14,94	15,12	15,17	15,14	15,15	15,15	15,15

Vergleich Wasserabgabeverhalten vor und nach der Behandlung mit Bakterien und Wasser																	
Vgl. Diagramm 20, Diagramm 21 und Diagramm 22																	
	$m_t$	Zeit [min]	0,0	2	4	10	15	20	40	60	90	120	1440	5700	7200		
6	554,9	unbe-	handelt	$m_i$ [g]	639,5	638,8	638,1	637,5	637,1	636,8	635,7	634,7	633,6	632,1	572,1	554,8	555,0
				$w_i$ [%]	15,25	15,12	14,99	14,89	14,81	14,76	14,56	14,38	14,18	13,91	3,10	0,02	0,02
		behandelt	$m_i$ [g]	622,9	622,7	622,5	622,0	621,8	621,5	620,9	620,1	619,0	618,2	579,4	546,1	546,0	546,0
			$w_i$ [%]	14,11	14,07	14,03	13,94	13,90	13,85	13,74	13,59	13,39	13,24	6,14	0,04	0,02	
11	550,6	unbe-	handelt	$m_i$ [g]	638,8	638,2	637,8	636,9	636,5	636,2	634,9	633,9	632,2	630,6	580,7	551,0	550,9
				$w_i$ [%]	16,02	15,91	15,84	15,67	15,60	15,55	15,31	15,13	14,82	14,53	5,47	0,07	0,05
		behandelt	$m_i$ [g]	606,8	606,7	606,5	606,0	605,9	605,8	605,1	604,4	603,2	602,3	560,3	536,5	536,3	536,3
			$w_i$ [%]	13,19	13,17	13,13	13,04	13,02	13,00	12,87	12,74	12,52	12,35	4,51	0,07	0,04	
6A	699,7	unbe-	handelt	$m_i$ [g]	804,5	804,1	803,4	802,8	802,4	802,0	800,9	799,9	798,3	796,9	738,1	700,3	700,3
				$w_i$ [%]	14,98	14,92	14,82	14,73	14,68	14,62	14,46	14,32	14,09	13,89	5,49	0,09	0,09
		behandelt	$m_i$ [g]	793,5	793,3	793,1	792,7	792,4	792,2	791,5	790,5	789,3	787,3	742,4	692,0	692,0	692,0
			$w_i$ [%]	14,68	14,66	14,63	14,57	14,53	14,50	14,40	14,25	14,08	13,79	7,30	0,01	0,01	

Vergleich Wasserabgabeverhalten vor und nach der Behandlung mit Bakterien und Kalkwasser																
Vgl. Diagramm 23, Diagramm 24 und Diagramm 25																
	$m_t$	Zeit [min]	0,0	2	4	10	15	20	40	60	90	120	1440	5700	7200	
17	567,1	unbe-handelt	$m_i$ [g]	664,4	663,9	663,4	662,3	661,9	661,5	660,2	658,8	657,4	655,9	606,4	567,7	567,5
			$w_i$ [%]	17,16	17,07	16,98	16,79	16,72	16,65	16,42	16,17	15,92	15,66	6,93	0,11	0,07
		behan-delt	$m_i$ [g]	634,6	634,4	634,3	633,9	633,7	633,5	632,8	632,1	631,0	630,3	593,3	558,5	558,4
			$w_i$ [%]	13,69	13,65	13,63	13,56	13,53	13,49	13,36	13,24	13,04	12,92	6,29	0,05	0,04
22	628,6	unbe-handelt	$m_i$ [g]	734,6	733,7	733,3	732,6	732,3	731,8	730,9	730,0	728,7	727,4	660,2	629,4	629,1
			$w_i$ [%]	16,86	16,72	16,66	16,54	16,50	16,42	16,27	16,13	15,92	15,72	5,03	0,13	0,08
		behan-delt	$m_i$ [g]	704,8	704,6	704,5	704,2	703,9	703,7	703,0	702,2	701,1	700,2	660,1	621,4	621,4
			$w_i$ [%]	13,44	13,41	13,39	13,34	13,29	13,26	13,15	13,02	12,84	12,70	6,24	0,02	0,02
1A	692,0	unbe-handelt	$m_i$ [g]	799,6	798,3	797,4	796,8	796,4	796,1	795,0	794,1	792,7	791,5	727,4	692,8	692,6
			$w_i$ [%]	15,55	15,36	15,23	15,14	15,09	15,04	14,88	14,75	14,55	14,38	5,12	0,12	0,09
		behan-delt	$m_i$ [g]	765,8	765,6	765,6	765,1	765,0	764,7	764,0	763,1	761,6	760,7	712,7	668,4	668,3
			$w_i$ [%]	14,62	14,59	14,59	14,52	14,50	14,46	14,35	14,22	13,99	13,86	6,68	0,04	0,03

Vergleich Wasserabgabeverhalten vor und nach der Behandlung mit Kalkwasser																
Vgl. Diagramm 26, Diagramm 27 und Diagramm 28																
	$m_t$	Zeit [min]	0,0	2	4	10	15	20	40	60	90	120	1440	5700	7200	
32	536,5	unbe-handelt	$m_i$ [g]	636,5	635,8	635,3	634,7	634,5	634,2	633,1	632,1	630,3	629,5	559,6	536,9	536,7
			$w_i$ [%]	18,64	18,51	18,42	18,30	18,27	18,21	18,01	17,82	17,48	17,33	4,31	0,07	0,04
		behan-delt	$m_i$ [g]	618,4	618,2	618,1	617,6	617,3	617,2	616,4	615,6	614,5	613,6	570,3	536,2	536,1
			$w_i$ [%]	15,39	15,36	15,34	15,25	15,19	15,17	15,02	14,87	14,67	14,50	6,42	0,06	0,04
36	555,3	unbe-handelt	$m_i$ [g]	642,5	641,6	640,9	640,3	639,8	639,4	638,3	637,3	635,9	634,8	577,1	555,7	555,6
			$w_i$ [%]	15,70	15,54	15,42	15,31	15,22	15,14	14,95	14,75	14,51	14,32	3,93	0,07	0,05
		behan-delt	$m_i$ [g]	637,6	637,3	637,1	636,6	636,3	636,1	635,4	634,6	633,4	632,3	587,1	554,6	554,5
			$w_i$ [%]	13,24	14,99	14,96	14,87	14,81	14,78	14,65	14,51	14,29	14,09	5,94	0,07	0,05
12A	675,9	unbe-handelt	$m_i$ [g]	782,9	782,4	781,9	781,5	781,1	780,8	779,6	778,4	777,0	775,6	715,3	676,3	676,2
			$w_i$ [%]	15,83	15,76	15,68	15,62	15,56	15,52	15,34	15,16	14,96	14,75	5,83	0,06	0,04
		behan-delt	$m_i$ [g]	778,7	778,5	778,3	777,8	777,7	777,4	776,7	775,8	774,5	773,6	724,4	675,0	674,9
			$w_i$ [%]	15,45	15,42	15,39	15,32	15,30	15,26	15,15	15,02	14,83	14,69	7,40	0,07	0,06

Vergleich der Ultraschallgeschwindigkeit vor und nach der Behandlung mit Bakterien und Wasser Vgl. Tabelle 13 und Diagramm 29														
		Probe												
		Nr.	1	3	5	6	7	8	10	11	135A	6A	7A	
Abmessungen	h		200,0	201,0	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	201,0	200,0	199,0	199,0	200,0
	b R2,1		40,7	39,8	39,9	40,1	40,4	40,0	40,3	40,4	40,4	50,6	50,3	50,8
	b R2,2		40,7	40,1	39,8	40,1	40,4	40,1	40,4	40,5	40,4	50,3	50,8	50,6
	b R2,3		40,8	40,1	39,5	40,1	40,4	40,1	40,4	40,4	40,4	50,8	50,6	50,5
	b R3,1		40,3	40,6	40,6	40,4	41,1	40,5	40,0	40,2	40,2	50,5	50,4	50,4
	b R3,2		40,4	40,6	40,6	40,3	40,9	40,5	40,1	40,2	40,2	50,5	50,6	50,7
	b R3,3		40,3	40,6	40,7	40,4	40,2	40,5	40,2	40,2	40,1	50,4	50,5	50,5
Laufzeit unbehandelte Proben														
	R1		71,2	79,2	79,0	80,0	75,0	80,1	71,5	73,3	79,8	90,2	86,2	90,6
	R2,1		15,5	17,3	15,8	15,1	14,7	14,9	13,8	14,4	14,5	19,8	19,7	20,5
	R2,2		14,9	15,3	15,3	14,7	14,4	15,4	14,0	14,7	14,8	20,8	19,2	21,0
	R2,3		15,0	14,8	14,4	15,5	14,9	15,1	13,7	13,7	14,7	20,1	20,5	21,4
	R3,1		14,8	15,3	13,0	14,1	14,2	16,2	13,7	15,3	16,2	21,5	18,9	20,0
	R3,2		14,8	14,0	13,3	13,7	14,6	16,1	13,6	15,0	16,0	21,3	18,2	19,7
R3,3		15,1	14,0	12,7	13,5	14,5	16,3	14,1	12,4	15,3	21,1	20,1	20,6	
Geschwindigkeit unbehandelte Proben														
	vh		<b>2,81</b>	<b>2,54</b>	<b>2,53</b>	<b>2,50</b>	<b>2,67</b>	<b>2,50</b>	<b>2,80</b>	<b>2,74</b>	<b>2,51</b>	<b>2,21</b>	<b>2,31</b>	<b>2,21</b>
	v R2,1		2,63	2,30	2,53	2,66	2,75	2,68	2,92	2,81	2,79	2,56	2,55	2,48
	v R2,2		2,73	2,62	2,60	2,73	2,81	2,60	2,89	2,76	2,73	2,42	2,65	2,41
	v R2,3		2,72	2,71	2,74	2,59	2,71	2,66	2,95	2,95	2,75	2,53	2,47	2,36
	v R3,1		2,72	2,65	3,12	2,87	2,89	2,50	2,92	2,63	2,48	2,35	2,67	2,52
	v R3,2		2,73	2,90	3,05	2,94	2,80	2,52	2,95	2,68	2,51	2,37	2,78	2,57
	v R3,3		2,67	2,90	3,20	2,99	2,77	2,48	2,85	3,24	2,62	2,39	2,51	2,45
Mittelwert		2,72	2,66	2,83	2,75	2,77	2,56	2,90	2,83	2,63	2,43	2,60	2,47	
Laufzeit, behandelte Proben														
	R1		70,4	78,3	76,4	79,1	73,7	79,6	71,2	73,0	79,9	89,6	89,8	91,8
	R2,1		14,9	16,0	15,6	14,9	14,2	14,8	13,7	14,4	14,0	20,4	20,3	21,1
	R2,2		14,3	13,8	15,0	14,3	13,6	15,2	13,4	14,4	14,7	21,5	20,1	21,8
	R2,3		13,8	14,1	14,7	15,4	14,7	14,7	13,6	13,3	14,6	20,6	20,8	22,4
	R3,1		14,9	14,9	13,0	13,9	14,0	14,7	13,3	14,8	15,8	22,1	19,5	20,2
	R3,2		13,7	13,7	13,1	13,9	14,3	15,5	13,4	14,2	15,5	22,0	19,1	20,7
R3,3		13,0	13,0	12,2	13,5	14,3	16,2	13,8	12,4	14,8	21,8	20,4	21,5	
behandelte Proben														
	vh		<b>2,84</b>	<b>2,57</b>	<b>2,62</b>	<b>2,53</b>	<b>2,71</b>	<b>2,51</b>	<b>2,81</b>	<b>2,75</b>	<b>2,50</b>	<b>2,22</b>	<b>2,22</b>	<b>2,18</b>
	v R2,1		2,73	2,49	2,56	2,69	2,85	2,70	2,94	2,81	2,89	2,48	2,48	2,41
	v R2,2		2,85	2,91	2,65	2,80	2,97	2,64	3,01	2,81	2,75	2,34	2,53	2,32
v R2,3		2,96	2,84	2,69	2,60	2,75	2,73	2,97	3,04	2,77	2,47	2,43	2,25	

v R3,1	2,70	2,72	3,12	2,91	2,94	2,76	3,01	2,72	2,54	2,29	2,58	2,50
v R3,2	2,95	2,96	3,10	2,90	2,86	2,61	2,99	2,83	2,59	2,30	2,65	2,45
v R3,3	3,10	3,12	3,34	2,99	2,81	2,50	2,91	3,24	2,71	2,31	2,48	2,35
Mittelwert	2,88	2,80	2,87	2,78	2,84	2,64	2,95	2,89	2,68	2,36	2,52	2,38

Vergleich der Ultraschallgeschwindigkeit vor und nach der Behandlung mit Bakterien und Kalkwasser Vgl. Tabelle 13 und Diagramm 30														
Probe		14	15	16	17	18	19	20	21	22	231A	2A	3A	
Abmessungen [mm]	h	201,0	200,0	200,0	200,0	201,0	200,0	201,0	200,0	201,0	200,0	199,0	200,0	198,0
	b R2,1	40,1	40,6	40,5	40,6	40,2	40,6	40,3	41,1	45,5	40,4	49,6	50,4	50,5
	b R2,2	40,1	40,6	40,5	40,6	40,2	40,6	40,4	41,3	45,8	40,4	50,7	50,8	50,7
	b R2,3	40,1	40,6	40,5	40,6	40,3	40,6	40,4	41,4	45,6	40,4	50,6	50,7	50,7
	b R3,1	40,4	40,7	41,8	41,6	40,4	40,7	41,2	40,7	40,2	40,2	50,1	50,5	50,8
	b R3,2	40,4	41,1	41,6	41,7	40,5	40,5	41,5	40,7	40,2	40,3	50,8	50,8	50,6
	b R3,3	40,4	41,5	41,5	41,7	40,4	40,0	41,5	40,7	40,1	40,3	50,5	50,6	50,8
Laufzeit unbehandelte Proben [μs]	R1	77,8	76,5	77,4	74,2	72,1	72,9	70,7	83,0	77,1	79,6	92,2	89,6	87,5
	R2,1	16,2	16,6	14,5	15,5	14,3	14,4	13,9	14,5	16,2	14,6	21,3	21,7	17,8
	R2,2	14,3	15,7	14,9	13,9	14,6	14,0	13,7	16,4	18,0	14,8	21,0	20,6	18,3
	R2,3	13,8	16,0	15,0	13,4	14,2	15,1	14,2	16,5	16,6	14,6	21,0	21,1	19,0
	R3,1	15,7	16,4	15,6	15,2	13,9	14,1	13,5	16,7	14,2	15,4	19,9	21,2	18,5
	R3,2	15,1	15,9	15,7	14,8	14,6	13,9	13,6	17,8	13,7	15,2	18,3	20,7	19,7
	R3,3	15,9	15,5	16,0	14,3	13,3	15,3	14,9	16,5	14,0	14,9	19,3	20,3	19,3
Geschwindigkeit unbehandelte Proben [km/s]	vh	<b>2,58</b>	<b>2,61</b>	<b>2,58</b>	<b>2,70</b>	<b>2,79</b>	<b>2,74</b>	<b>2,84</b>	<b>2,41</b>	<b>2,61</b>	<b>2,51</b>	<b>2,16</b>	<b>2,23</b>	<b>2,26</b>
	v R2,1	2,48	2,45	2,79	2,62	2,81	2,82	2,90	2,83	2,81	2,77	2,33	2,32	2,84
	v R2,2	2,80	2,59	2,72	2,92	2,75	2,90	2,95	2,52	2,54	2,73	2,41	2,47	2,77
	v R2,3	2,91	2,54	2,70	3,03	2,84	2,69	2,85	2,51	2,75	2,77	2,41	2,40	2,67
	v R3,1	2,57	2,48	2,68	2,74	2,91	2,89	3,05	2,44	2,83	2,61	2,52	2,38	2,75
	v R3,2	2,68	2,58	2,65	2,82	2,77	2,91	3,05	2,29	2,93	2,65	2,78	2,45	2,57
	v R3,3	2,54	2,68	2,59	2,92	3,04	2,61	2,79	2,47	2,86	2,70	2,62	2,49	2,63
	Mittelwert	2,65	2,56	2,67	2,82	2,84	2,80	2,92	2,49	2,76	2,68	2,51	2,42	2,70
behandelte Proben [μs]	R1	77,8	76,0	75,7	74,5	71,2	73,0	70,0	82,1	76,3	80,2	95,2	88,7	89,6
	R2,1	16,1	16,5	14,4	15,5	14,8	13,9	13,7	14,2	15,9	14,3	22,5	22,1	18,0
	R2,2	15,5	15,7	14,7	14,8	14,7	13,5	13,4	17,8	17,2	14,2	21,6	21,2	19,8
	R2,3	13,3	15,6	14,3	13,3	14,1	15,7	13,8	16,1	16,5	14,2	21,6	21,3	19,8
	R3,1	14,1	15,7	15,6	14,5	13,9	14,1	13,0	15,4	14,0	15,0	20,3	21,5	19,0

	R3,2	14,5	15,5	15,5	14,7	13,9	13,7	13,3	18,4	13,7	15,0	19,6	21,1	20,3
	R3,3	15,9	15,4	15,6	14,1	13,1	15,3	14,4	16,2	13,9	16,3	19,5	20,6	19,9
Geschwindigkeit, behandelte Proben [km/s]	vh	<b>2,58</b>	<b>2,63</b>	<b>2,64</b>	<b>2,68</b>	<b>2,82</b>	<b>2,74</b>	<b>2,87</b>	<b>2,44</b>	<b>2,63</b>	<b>2,49</b>	<b>2,09</b>	<b>2,25</b>	<b>2,21</b>
	v R2,1	2,49	2,46	2,81	2,62	2,72	2,92	2,94	2,89	2,86	2,83	2,20	2,28	2,81
	v R2,2	2,59	2,59	2,76	2,74	2,73	3,01	3,01	2,32	2,66	2,85	2,35	2,40	2,56
	v R2,3	3,02	2,60	2,83	3,05	2,86	2,59	2,93	2,57	2,76	2,85	2,34	2,38	2,56
	v R3,1	2,87	2,59	2,68	2,87	2,91	2,89	3,17	2,64	2,87	2,68	2,47	2,35	2,67
	v R3,2	2,79	2,65	2,68	2,84	2,91	2,96	3,12	2,21	2,93	2,69	2,59	2,41	2,49
	v R3,3	2,54	2,69	2,66	2,96	3,08	2,61	2,88	2,51	2,88	2,47	2,59	2,46	2,55
	Mittelwert	2,70	2,60	2,72	2,82	2,86	2,82	2,99	2,51	2,80	2,69	2,42	2,38	2,61

Vergleich der Ultraschallgeschwindigkeit vor und nach der Behandlung mit Kalkwasser Vgl. Tabelle 13 und Diagramm 31														
Probe		27	28	32	33	34	35	36	37	38	39	4010A	11A	12A
Abmessungen [mm]	h	200,0	201,0	201,0	201,0	201,0	200,0	200,0	200,0	201,0	201,0	200,0	200,0	198,0
	b R2,1	40,1	40,4	40,2	40,2	40,6	41,1	40,2	40,0	40,4	40,2	45,2	50,8	49,5
	b R2,2	40,2	40,4	40,3	40,1	40,6	41,1	40,2	40,0	40,4	40,2	45,6	50,6	50,6
	b R2,3	40,1	40,4	40,3	40,2	40,6	41,2	40,2	40,0	40,4	40,2	45,7	50,0	50,6
	b R3,1	40,7	40,5	40,6	40,2	45,0	40,7	40,4	40,3	40,5	40,2	40,5	50,8	49,4
	b R3,2	40,5	40,5	40,6	40,1	45,2	40,7	40,5	40,3	40,5	40,2	40,5	50,9	50,3
	b R3,3	40,5	40,5	40,6	40,0	45,2	40,6	40,5	40,3	40,5	40,2	40,5	50,0	50,5
Laufzeit unbehandelte Proben [μs]	R1	78,1	76,3	82,7	76,3	75,9	74,8	81,8	73,3	72,5	80,9	77,9	91,8	87,3
	R2,1	14,6	15,0	16,7	16,9	14,9	13,5	15,8	15,5	14,7	15,0	16,4	21,6	20,0
	R2,2	14,0	15,0	16,6	14,6	14,1	14,0	16,4	15,3	15,7	15,6	18,2	21,4	20,2
	R2,3	14,6	15,4	16,7	15,0	14,0	13,9	16,5	14,9	13,9	15,5	17,4	21,4	21,0
	R3,1	15,7	15,7	16,6	15,6	15,5	13,5	14,3	15,1	13,5	15,8	15,1	19,8	19,8
	R3,2	14,3	15,0	15,4	15,0	15,8	13,4	14,8	15,5	14,8	15,0	15,0	19,7	19,7
	R3,3	14,4	15,6	16,5	15,0	16,1	15,7	14,7	14,3	14,4	15,8	14,4	20,3	20,4
Geschwindigkeit unbehandelte Proben [km/s]	vh	<b>2,56</b>	<b>2,63</b>	<b>2,43</b>	<b>2,63</b>	<b>2,65</b>	<b>2,67</b>	<b>2,44</b>	<b>2,73</b>	<b>2,77</b>	<b>2,48</b>	<b>2,57</b>	<b>2,18</b>	<b>2,28</b>
	v R2,1	2,75	2,69	2,41	2,38	2,72	3,04	2,54	2,58	2,75	2,68	2,76	2,35	2,48
	v R2,2	2,87	2,69	2,43	2,75	2,88	2,94	2,45	2,61	2,57	2,58	2,51	2,36	2,49
	v R2,3	2,75	2,62	2,41	2,68	2,90	2,96	2,44	2,68	2,91	2,59	2,63	2,34	2,41
	v R3,1	2,59	2,58	2,45	2,58	2,90	3,01	2,83	2,67	3,00	2,54	2,68	2,57	2,49
	v R3,2	2,83	2,70	2,64	2,67	2,86	3,04	2,74	2,60	2,74	2,68	2,70	2,58	2,57
	v R3,3	2,81	2,60	2,46	2,67	2,81	2,59	2,76	2,82	2,81	2,54	2,81	2,46	2,48

	Mittelwert	2,74	2,65	2,46	2,62	2,82	2,89	2,60	2,67	2,79	2,59	2,66	2,44	2,52	2,49
Laufzeit, behandelte Proben [ $\mu$ s]	R1	76,5	74,8	80,2	74,5	74,0	72,6	79,5	70,7	69,0	77,4	75,3	89,8	86,4	87,9
	R2,1	13,8	14,3	16,2	16,3	14,3	12,9	15,1	14,0	13,9	14,7	15,4	21,4	20,1	19,7
	R2,2	14,0	14,9	16,0	14,4	13,5	12,9	16,2	14,3	14,8	13,8	16,5	20,7	20,1	19,9
	R2,3	13,5	14,2	16,0	14,2	13,5	13,6	15,8	13,7	13,4	14,9	15,4	21,3	20,4	20,6
	R3,1	15,1	15,4	15,5	15,8	14,2	13,0	13,5	14,1	12,8	13,6	14,2	19,5	19,1	19,8
	R3,2	14,4	15,8	14,8	14,0	15,5	12,9	14,4	14,7	13,7	14,6	14,1	19,7	19,8	19,7
	R3,3	14,1	15,0	15,4	14,5	15,4	15,2	14,5	14,1	13,4	14,6	13,2	19,5	19,8	20,6
Geschwindigkeit, behandelte Proben [km/s]	vh	<b>2,61</b>	<b>2,69</b>	<b>2,51</b>	<b>2,70</b>	<b>2,72</b>	<b>2,75</b>	<b>2,52</b>	<b>2,83</b>	<b>2,91</b>	<b>2,60</b>	<b>2,66</b>	<b>2,23</b>	<b>2,32</b>	<b>2,25</b>
	v R2,1	2,91	2,83	2,48	2,47	2,84	3,19	2,66	2,86	2,91	2,73	2,94	2,37	2,53	2,51
	v R2,2	2,87	2,71	2,52	2,78	3,01	3,19	2,48	2,80	2,73	2,91	2,76	2,44	2,53	2,54
	v R2,3	2,97	2,85	2,52	2,83	3,01	3,03	2,54	2,92	3,01	2,70	2,97	2,35	2,49	2,46
	v R3,1	2,70	2,63	2,62	2,54	3,17	3,13	2,99	2,86	3,16	2,96	2,85	2,61	2,62	2,49
	v R3,2	2,81	2,56	2,74	2,86	2,92	3,16	2,81	2,74	2,96	2,75	2,87	2,58	2,54	2,57
	v R3,3	2,87	2,70	2,64	2,76	2,94	2,67	2,79	2,86	3,02	2,75	3,07	2,56	2,57	2,45
	Mittelwert	2,82	2,71	2,57	2,71	2,94	3,02	2,69	2,84	2,96	2,77	2,87	2,49	2,54	2,50

Bestimmung der Biegezugfestigkeit an den mit Bakterien und Wasser behandelten Prismen															
Vgl. Tabelle 15 und Diagramm 1															
Probe Nr.	Abmessungen [mm]										$I_s$ [mm]	$F_{max}$ [kN]	$W$ [mm <sup>3</sup> ]	$M_{BZmax}$ [N*mm]	$\sigma_{BZ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
	h	b R2,1	b R2,2	b R2,3	b1	b R3,1	b R3,2	b R3,3	b2						
1	200	40,7	40,7	40,8	40,7	40,3	40,4	40,3	40,3	140,0	0,90	11153,5	31465	2,82	
3	201	39,8	40,1	40,1	40,0	40,6	40,6	40,6	40,6	140,0	0,60	10826,7	21000	1,94	
6	200	40,1	40,1	40,1	40,1	40,4	40,3	40,4	40,4	140,0	0,67	10818,3	23555	2,18	
7	200	40,4	40,4	40,4	40,4	41,1	40,9	40,2	40,7	140,0	0,80	11080,6	28070	2,53	
8	200	40,0	40,1	40,1	40,1	40,5	40,5	40,5	40,5	140,0	0,85	10836,0	29715	2,74	
10	200	40,3	40,4	40,4	40,4	40,0	40,1	40,2	40,1	140,0	1,01	10890,3	35350	3,25	
11	201	40,4	40,5	40,4	40,4	40,2	40,2	40,2	40,2	140,0	0,70	10953,5	24465	2,23	
12	201	40,5	40,5	40,4	40,5	40,0	39,9	40,0	40,0	140,0	0,68	10907,9	23730	2,18	
13	200	40,4	40,4	40,4	40,4	40,2	40,2	40,1	40,2	140,0	0,63	10926,4	22050	2,02	

Bestimmung der Biegezugfestigkeit an den mit Bakterien und Kalkwasser behandelten Prismen

Vgl. Tabelle 15 und Diagramm 1

Probe Nr.	Abmessungen [mm]										$I_s$ [mm]	$F_{max}$ [kN]	$W$ [mm <sup>3</sup> ]	$M_{BZmax}$ [N*mm]	$\sigma_{BZ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
	h	b R2,1	b R2,2	b R2,3	b1	b R3,1	b R3,2	b R3,3	b2						
14	201	40,1	40,1	40,1	40,1	40,4	40,4	40,4	40,4	140,0	0,52	10827,3	18165	1,68	
15	200	40,6	40,6	40,6	40,6	40,7	41,1	41,5	41,1	140,0	0,88	11291,3	30800	2,73	
16	200	40,5	40,5	40,5	40,5	41,8	41,6	41,5	41,6	140,0	1,00	11381,5	34930	3,07	
17	200	40,6	40,6	40,6	40,6	41,6	41,7	41,7	41,7	140,0	0,88	11446,9	30660	2,68	
18	201	40,2	40,2	40,3	40,2	40,4	40,5	40,4	40,4	140,0	0,70	10908,4	24465	2,24	
19	200	40,6	40,6	40,6	40,6	40,7	40,5	40,0	40,4	140,0	1,04	11099,0	36330	3,27	
20	201	40,3	40,4	40,4	40,4	41,2	41,5	41,5	41,4	140,0	0,57	11243,3	20055	1,78	
21	200	41,1	41,3	41,4	41,3	40,7	40,7	40,7	40,7	140,0	0,51	11551,6	17990	1,56	
22	201	45,5	45,8	45,6	45,6	40,2	40,2	40,1	40,2	140,0	0,79	13940,5	27720	1,99	
23	200	40,4	40,4	40,4	40,4	40,2	40,3	40,3	40,3	140,0	0,72	10953,6	25025	2,28	
24	200	40,4	40,4	40,4	40,4	39,9	39,9	39,8	39,9	140,0	0,67	10844,8	23345	2,15	

Bestimmung der Biegezugfestigkeit an den mit Kalkwasser unbehandelten Prismen

Vgl. Tabelle 15 und Diagramm 1

Probe Nr.	Abmessungen [mm]										$I_s$ [mm]	$F_{max}$ [kN]	$W$ [mm <sup>3</sup> ]	$M_{BZmax}$ [N*mm]	$\sigma_{BZ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
	h	b R2,1	b R2,2	b R2,3	b1	b R3,1	b R3,2	b R3,3	b2						
41	200	40,6	40,6	40,6	40,6	40,2	40,3	40,4	40,3	140,0	0,13	11071,5	4620	0,42	
43	200	40,6	40,6	40,6	40,6	40,4	40,4	40,4	40,4	140,0	0,75	11099,0	26215	2,36	
46	201	40,0	40,0	40,0	40,0	39,9	40,2	40,2	40,1	140,0	0,59	10693,3	20755	1,94	
48	200	41,3	41,3	41,4	41,3	40,4	40,5	40,5	40,5	140,0	0,78	11522,5	27300	2,37	
49	200	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	140,0	0,80	11153,9	28000	2,51	
50	200	40,3	40,4	40,2	40,3	40,2	40,3	40,2	40,2	140,0	0,70	10890,4	24430	2,24	
51	201	40,3	40,4	40,4	40,4	40,4	40,5	40,5	40,5	140,0	1,32	10989,9	46060	4,19	
52	200	40,6	40,5	40,6	40,6	40,3	40,3	40,2	40,3	140,0	0,89	11044,2	31150	2,82	
54	201	40,5	40,4	40,4	40,4	40,1	40,1	40,1	40,1	140,0	0,56	10926,3	19600	1,79	

## Bestimmung der Biegezugfestigkeit an den mit Kalkwasser behandelten Prismen

Vgl. Tabelle 15 und Diagramm 1

Probe Nr.	Abmessungen [mm]										$I_s$	$F_{\max}$	W	$M_{BZ\max}$	$\sigma_{BZ}$
	h	b R2,1	b R2,2	b R2,3	b1	b R3,1	b R3,2	b R3,3	b2		[mm]	[kN]	[mm <sup>3</sup> ]	[N*mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]
27	200	40,1	40,2	40,1	40,1	40,7	40,5	40,5	40,6		140,0	0,90	10890,0	31360	2,88
28	201	40,4	40,4	40,4	40,4	40,5	40,5	40,5	40,5		140,0	0,56	11017,1	19670	1,79
32	201	40,2	40,3	40,3	40,3	40,6	40,6	40,6	40,6		140,0	0,73	10971,5	25480	2,32
34	201	40,6	40,6	40,6	40,6	45,0	45,2	45,2	45,1		140,0	1,28	12399,3	44625	3,60
35	200	41,1	41,1	41,2	41,1	40,7	40,7	40,6	40,7		140,0	1,04	11467,7	36540	3,19
36	200	40,2	40,2	40,2	40,2	40,4	40,5	40,5	40,5		140,0	0,72	10899,3	25165	2,31
37	200	40,0	40,0	40,0	40,0	40,3	40,3	40,3	40,3		140,0	0,92	10746,7	32235	3,00
38	201	40,4	40,4	40,4	40,4	40,5	40,5	40,5	40,5		140,0	0,50	11017,1	17535	1,59
39	201	40,2	40,2	40,2	40,2	40,2	40,2	40,2	40,2		140,0	0,70	10827,5	24395	2,25
40	200	45,2	45,6	45,7	45,5	40,5	40,5	40,5	40,5		140,0	0,98	13974,2	34230	2,45