

FACHHOCHSCHULE POTSDAM

FACHBEREICH STADT | BAU | KULTUR


BACHELORSTUDIENGANG KONSERVIERUNG UND RESTAURIERUNG

Studienrichtung Stein

**Die Wasseraufnahme von kapillaraktiven Baustoffen
im Hinblick auf die Ausbildung des Wasserkörpers in die Tiefe**

BACHELORTHESES

Autorin: Johanna Marie Quadrizius

Matrikelnummer.: 

Telefon: 

E-Mail: 

Erstprüferin: Prof. Dr. Jeannine Meinhardt (FACHHOCHSCHULE POTSDAM)

Zweitprüfer: Dr. Eberhard Wendler (FACHLABOR FÜR KONSERVIERUNGSFRAGEN, MÜNCHEN)

Bearbeitungszeitraum: 05.11.2018 - 22.01.2019

KURZZUSAMMENFASSUNG/ABSTRACT

Quadrius, Johanna Marie

Die Wasseraufnahme von kapillaraktiven Baustoffen im Hinblick auf die Ausbildung des Wasserkörpers in die Tiefe

Bachelorthesis; 22.01.2019; deutsch; S. 73; Abb. 280

Erstprüferin: Prof. Dr. Jeannine Meinhardt (Fachhochschule Potsdam)

Zweitprüfer: Dr. Eberhard Wendler (Fachlabor für Konservierungsfragen in der Denkmalpflege, München)

Die Auswertung der Prüfung kapillarer Wasseraufnahme mittels Karsten'schen Prüfröhrchen erfolgt nach einer seit Jahren festgelegten Durchfeuchtungsgeometrie. In der praktischen Anwendung erwies sich diese allerdings als fehlerhaft. Ziel der Arbeit ist es neue Erkenntnisse zur Form des Durchfeuchtungskörpers zu gewinnen. Grundlage der Qualifikationsarbeit ist es eine geeignete Methode zur Visualisierung des Wasserkörpers innerhalb des Porengefüges zu ermitteln. Dies erfolgte durch Anfärben des Porenraums mittels Kaliumpermanganatlösung und tomographieartigen Schnitten durch Probekörper. Schwerpunkt der Arbeit ist die Ausdehnung des Wasserkörpers empirisch zu erfassen, Methoden zu vergleichen und grundlegende Zusammenhänge zwischen Porenraum und Wasserkörpergeometrie unterschiedlicher Gesteine besser nachvollziehen zu können.

Schlagworte: Kapillare Wasseraufnahme, Karsten'sches Prüfröhrchen, Wassertransport, Wasserkörper, Durchfeuchtungsgeometrie, Durchfeuchtungsform, Durchfeuchtungskalotte, Durchfeuchtungshorizont, Sandstein, Porenraum, Anfärbung, Kaliumpermanganat, Tetraamminkupfersulfat, poröse Baustoffe

ABSTRACT

Quadrizius, Johanna Marie

Water absorption of capillary active building materials in regard to the shaping of the inner wetting front

bachelor's thesis; January 22th 2019; German; p. 73; ill. 280

Supervisor: Prof. Dr. Jeannine Meinhardt (University of Applied Sciences Potsdam)
Supporting supervisor: Dr. Eberhard Wendler (Fachlabor für Konservierungsfragen in der Denkmalpflege)

The evaluation of capillary water absorption using the Karsten tube test is dependent on a wetting theory which has been established many years ago. In the practical application this theory has been proven wrong. This thesis aims to reach new conclusions concerning the form of the wetting body. Finding a method to visualise the wetting body inside a porous system is the base to this bachelor thesis. For that purpose the pore space has been dyed with a potassium permanganate solution and afterwards cut into tomography-like slices. The focus of this thesis was the empirical measurement of the dilatation of the wetting body and in reaching a better understanding of basic correlations between the pore space and geometry of the wetting body.

key words: capillary water absorption, Karsten tube, water transport, water body, wetting front, pore space, sandstone, potassium permanganate, tetraamminecopper sulphate, porous building materials

DANKSAGUNGEN

Mein erstes Dankeschön geht zunächst an meine beiden Betreuer dieser Arbeit, Prof.Dr. Jeannine Meinhardt und Dr. Eberhard Wendler.

Prof. Dr. J. Meinhardt danke ich für den Vorschlag dieses Themas, die Diskussionen, Anregungen und die Herstellung zahlreicher Kontakte.

Mein Dank geht ebenso an Dr. Eberhard Wendler für die klärenden Gespräche, die unterstützenden Untersuchungen und die Gastfreundschaft im Fachlabor.

Prof. Dr.-Ing. Stephan Pfefferkorn gilt mein Dank, da er die Fragestellung überhaupt angestoßen hat. Vielen Dank für den netten und informativen Austausch.

Ein großes Dankeschön geht an Katja Schmeikal. Für ihre Unterstützung als Werkstatteleiterin, für ihre Ideen, ihr Vertrauen und für die vielen lieben Worte.

Ausserdem geht mein Dank an:

Dipl.-Chem. Christine Fuchs (FH Potsdam),

Prof. Dr. Helmut Cölfen (Universität Konstanz),

Dr. Enno Steindlberger (Institut für Steinkonservierung Mainz) und

Dr. Jürgen Legrum (Büro und Labor für Baustoffe, Bausanierung, Bauphysik Gau-Odernheim).

Vielen lieben Dank an Matthias Wittner, Fa. Wittner Deiningen, der mir die Probesteine nicht nur freundlicherweise zur Verfügung gestellt hat, sondern auch den Zuschnitt dieser übernahm.

Benjamin Hübner, Almuth Escher und Niklas Arendt danke ich für das Korrekturlesen meiner Arbeit.

Desweiteren geht mein Dank an:

Johanna Kaminska für die unendlich vielen gemeinsamen Stunden an der FH, deine Hilfe, den täglichen Mensagang, den Schlafplatz...

Maria Richter, die mir bei Fragen zur Steinmetztechnik behilflich war.

Janosch Klein, der mir im Vorfeld der Arbeit der beste Projektpartner war, den ich mir wünschen konnte.

Mein ganz besonderer Dank gilt Benjamin Hübner für seine wirklich allumfassende Unterstützung und seine Geduld mit mir.

Inhaltsverzeichnis

KURZZUSAMMENFASSUNG/ABSTRACT	I
DANKSAGUNGEN.....	II
1. Einleitung	1
1.1 Ausgangslage und Zielsetzung der Arbeit	1
1.2 Vorgehensweise	1
2. Feuchttransport in porösen Systemen	3
2.1 Vertiefung kapillarer Wassertransport	3
3. Prüfmethode zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme	7
3.1 Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme mit dem Prüfröhrchen nach Karsten..	8
3.1.1 Ausbreitung des Wasserkörpers in der Theorie.....	11
3.2 Bestimmung der Wasseraufnahme in Anlehnung an DIN EN ISO 15148.....	12
4. Experimenteller Nachweis des Wasserkörpers.....	14
4.1 Vorversuche	14
4.2 Versuchsaufbau	15
4.3 Verwendete Probesteine	17
4.4 Bestimmung der Wasseraufnahme der Probekörper	18
4.4.1 Wasseraufnahme mittels Karsten'schem Prüfröhrchen	18
4.4.2 Wasseraufnahme in Anlehnung an DIN EN ISO 15148	21
4.4.3 Bestimmung der Wasseraufnahmekapazität	23
4.4.4 Weitere Untersuchungen zur Wasseraufnahme.....	23
4.5 Anfärbemittel	26
4.5.1 Kaliumpermanganat	26
4.5.2 Tetraamminkupfersulfat	28
4.5.3 Vergleich der Eignung v. Kaliumpermanganat u. Tetraamminkupfersulfat ..	29
4.5.4 Bestimmung der Dichte und Oberflächenspannung der Farblösung	32
4.6 Wahl der Trennmethode.....	34
4.6.1 Spalten als Trennmethode.....	34
4.6.2 Sägen als Trennmethode	35
5. Analyse des visualisierten Durchfeuchtungskörpers.....	37
5.1 Formatieren der Probekörper nach Eintrag des Kaliumpermanganats	37
5.2 Auswertung.....	39
5.3 Berechnung eines idealen Grundkörpers auf der Basis eines Ellipsoids	50
6. Zusätzliche Versuche und Beobachtungen.....	53
6.1 „Halbes Karsten“ nach Pfefferkorn.....	53
6.2 Einfrieren des Wasserkörpers mittels Flüssigstickstoff.....	58
7. Schlussbetrachtung	59
Literaturverzeichnis	62
Abbildungsverzeichnis	65
Abbildungsnachweis und Abkürzungsverzeichnis	71
ANHANG.....	III

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage und Zielsetzung der Arbeit

Die Prüfung des Wasseraufnahmeverhaltens von porösen Baustoffen mit dem Karsten'sche Prüfröhrchen, welches seinen Namen dem Entwickler Rudolf Karsten verdankt, ist aufgrund seiner einfachen und zerstörungsfreien Anwendung eine häufig angewandte Methode in der Konservierung und Baudenkmalpflege.

Ein Teil der Auswertung dieser Prüfmethode basiert auf der Annahme einer definierten Ausbreitungsgeometrie des Wassers im Gefüge. Beobachtungen in der Forschungsgruppe „Kapillare Wasseraufnahme“ der Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V. (WTA) haben gezeigt, dass diese bisher angenommene Geometrie des Wasserkörpers nicht mit den Beobachtungen in der Realität übereinstimmen.

Im Rahmen der Untersuchungsmethode wird neben dem Wasseraufnahmekoeffizienten (w -Wert in $\text{kg/m}^2 \cdot \sqrt{h}$), der die aufgenommene Wassermenge über eine bestimmte Fläche in Abhängigkeit der Zeit beschreibt, der Wassereindringkoeffizient (B -Wert in cm/\sqrt{h}) bestimmt. Der Wassereindringkoeffizient definiert die Eindringtiefe des kapillar aufgenommenen Wasser. Im Rahmen der Bachelorthesis sollen neue Erkenntnisse zur Form des Durchfeuchtungskörpers gewonnen werden, die dazu beitragen sollen, die bisherigen Rechenmodelle an die realen Vorgänge anzupassen. So sollen reproduzierbare Aussagen über die Eindringtiefe ermöglicht werden.

1.2 Vorgehensweise

Um die reale Ausdehnung des Durchfeuchtungskörpers erfassen zu können, sollte dieser möglichst eindeutig identifizierbar sein. Für die Visualisierung wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, der den sich bildenden Wasserkörper abbildet. Realisiert wurde dies durch das Einbringen einer zuvor durch Vorversuche festgelegten Menge einer Kaliumpermanganatlösung. Die Lösung gelangt über ein Karsten'sches Prüfröhrchen in die entsprechenden Probekörper verschiedener Gesteinsarten. Diese jeweiligen Probekörper wurden, soweit möglich, tomographieartig in Scheiben

geschnitten und die Ausdehnung des Feuchtehorizonts photographisch dokumentiert. Im weiteren Teil der Arbeit wurden diese Aufnahmen ausgewertet und Versuche angestellt, verallgemeinbare Aussagen zur Ausbreitung des Wasserkörper abzuleiten.

2. Feuchtetransport in porösen Systemen

Porensysteme poröser Baustoffe sind kompliziert verästelte Netzwerke aus Hohlräumen unterschiedlicher Form und Größe, die durch Porenmodelle vereinfacht dargestellt werden (GERTIS, WERNER 1976; MENG 1991). Diese Porensysteme versucht man durch verschiedene Parameter, wie Porosität, Porengröße, Porenform und den damit verknüpften Feuchtetransportphänomenen zu charakterisieren. Die Transportprozesse von Wasser innerhalb poröser Baustoffe werden nach dem Aggregatzustand des Wassers unterschieden. Neben der Wasserdampfdiffusion, welche den Feuchtetransport in der gasförmigen Phase beschreibt, sowie dem Transport flüssigen Wassers durch Einfluss der Schwerkraft (Sickerströmung), ist der kapillare Flüssigkeitstransport zu nennen. Der in der vorliegenden Arbeit zu untersuchende Wasserkörper bildet sich maßgeblich durch kapillare Wasseraufnahme, weswegen dieser Transportprozess im folgenden Kapitel näher betrachtet wird.

2.1 Vertiefung kapillarer Wassertransport

Ein kapillarer Wassertransport liegt vor, wenn Wasser teilweise oder ausschließlich durch die Wirkung des Kapillardrucks innerhalb eines Gefüges transportiert wird (SCHUBERT 1982).

Um den kapillaren Wassertransport näher erklären zu können, müssen zunächst die folgenden physikalischen Begrifflichkeiten, Oberflächenspannung, Randwinkel, Kapillardruck und Steighöhe innerhalb der Kapillaren, erläutert werden:

Jedes Material besitzt eine charakteristische *Oberflächenspannung* σ , welche auch als Grenzflächenspannung bezeichnet wird. Diese Spannung beschreibt den Zustand der Atome und Moleküle an der Oberfläche eines spezifischen Stoffes im Vergleich zum Stoffinneren. Die Atome bzw. Moleküle, welche die Oberfläche des Fluides bilden, befinden sich im Gegensatz zu den isotropen Teilchen im Inneren in einem instabileren Zustand und benötigen eine nach innen gerichtete Kraft, um eine stabile Oberfläche auszubilden, wodurch Spannung entsteht (HALL, HOFF 2012). Die Grenzflächenspannung σ ist von der mechanischen Spannung σ zu unterscheiden.

Während die mechanische Spannung, welche bei der Verformung von Körpern auftritt, als Kraft F pro Fläche A definiert ist, wird die Grenzflächenspannung mit Kraft F pro Randlänge l_R beschrieben (HOMANN 2012).

Als *Randwinkel* θ wird der Winkel bezeichnet, den eine Flüssigkeit auf der Oberfläche eines Feststoffes ausbildet. Dieser Randwinkel ist festgelegt durch ein Kräftegleichgewicht der Oberflächenspannungen zwischen Flüssigkeit, Feststoff und Gas (siehe Abb. 1).

Hierbei gilt für den Randwinkel θ die Young'sche Gleichung (HOMANN 2012):

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{1,3} - \sigma_{1,2}}{\sigma_{2,3}}$$

σ - Grenzflächenspannung

Die Indizes bezeichnen folgende Phasen: 1 Festkörper, 2 Gas/Luft, 3 Flüssigkeit.

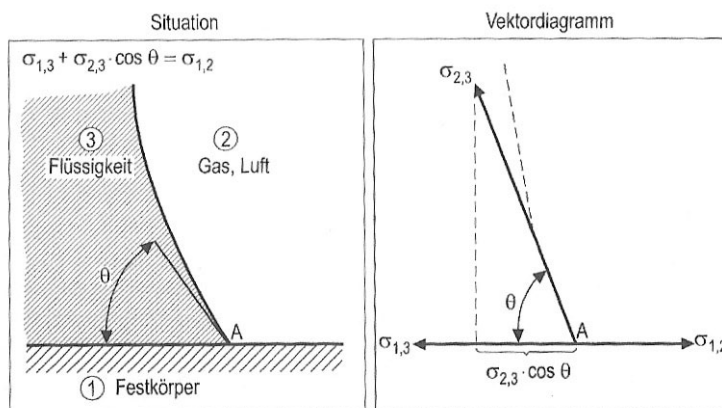


Abb. 1: Kräftegleichgewicht an der gemeinsamen Kante von Feststoff, Flüssigkeit und Gas

Der *Kapillardruck* p_k kann als Druckdifferenz Δp zwischen zwei Phasen abhängig von der Oberflächenspannung an einer gekrümmten Grenzfläche gesehen werden. Der Druck auf der inneren Seite einer gekrümmten Grenzfläche ist größer als auf der äußeren Seite.

$$p_k = \frac{2 \cdot \sigma}{r}$$

σ - Grenzflächenspannung, r – Kapillarradius

Die *Steighöhe* h einer Kapillare bezeichnet die Höhe, die eine Flüssigkeit innerhalb einer Kapillare steigen kann. Diese Höhe ist abhängig von der Oberflächenspannung σ , dem Kapillardurchmesser r , der Dichte der Flüssigkeit ρ

und der Erdbeschleunigung g (9,809 m/s²).

$$h = \frac{2 \cdot \sigma}{r \cdot \rho \cdot g}$$

Mit dem Kapillarradius im Nenner beider Gleichungen ergibt sich eine indirekt proportionale Abhängigkeit bezüglich dem Radius.

Es gilt:

Je kleiner dieser Radius, desto höher ist der herrschende Kapillardruck.

Je kleiner dieser Radius ist, desto höher kann die Flüssigkeit in der Kapillare steigen.

Wenn poröse, wasserbenetzbare Baustoffe wie Naturstein mit Wasser in Kontakt kommen, wird das Wasser durch den Kapillardruck in das Porensystem gezogen (Kapillaraszension). Mit zunehmender Eindringtiefe erhöht sich der Fließwiderstand des Wassers, was die Wassereindringgeschwindigkeit minimiert (HOMANN 2012). Um dies fassen zu können, wurden die Transportkoeffizienten, der Wasseraufnahmekoeffizient und der Wassereindringkoeffizient, entsprechend dem Wurzel-Zeit-Gesetz definiert (SCHWARZ 1972, MENG 1993).

Der *Wasseraufnahmekoeffizient* w (auch: w-Wert) gibt an, wie viel Wasser m ein Stoff über eine definierte Fläche A innerhalb einer bestimmten Zeit t aufnimmt.

$$w = \frac{m}{A \cdot \sqrt{t}}$$

In der Regel wird dieser Wert in kg/(m²·√h) angegeben.

Der *Wassereindringkoeffizient* B (auch: B-Wert) beschreibt die Eindringtiefe x des Wassers in den Baustoff über die Zeit t .

$$B = \frac{x}{\sqrt{t}}$$

Als Einheit wird hier meist cm/√h verwandt.

Für kapillare Transportvorgänge sind Porenradien über 0,1 mm theoretisch irrelevant, da der Kapillardruck nicht ausreichend hoch genug ist, um der durch Schwerkraft hervorgerufenen Sickerströmung entgegenzuwirken. In Abb. 2 ist dargestellt für welche Porenradien, welche Transportphänomene relevant sind. In der Realität lassen sich die einzelnen Transportphänomene nicht genau voneinander abgrenzen,

da sie untrennbar miteinander verbunden sind und fließend ineinander übergehen (MENG 1991).

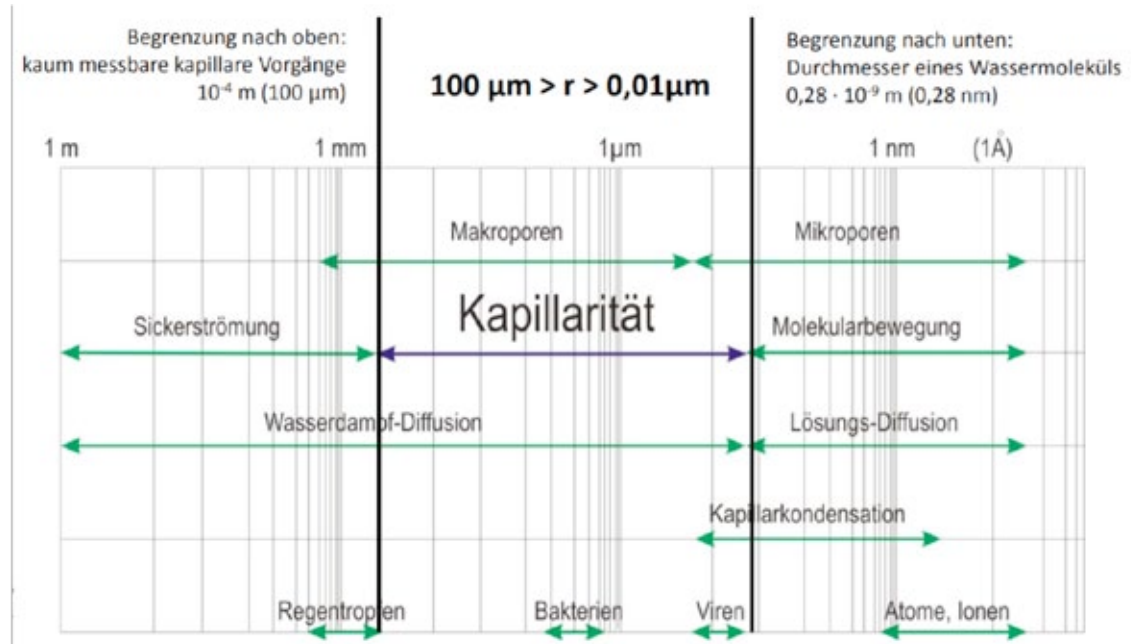


Abb. 2: Größenbereiche der für die verschiedenen Transportphänomene relevante Porengrößen

Für die Einschätzung der Kapillarität eines Baustoffes werden unterschiedliche Methoden, wie die Prüfung der kapillaren Wasseraufnahme genutzt. Diese werden im folgenden Kapitel erläutert.

3. Prüfmethode zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme

Um die kapillare Wasseraufnahme zur Charakterisierung eines porösen Feststoffes näher bestimmen zu können, gibt es verschiedene Messmethoden. Im Folgenden werden zunächst bekannte in situ-Methoden benannt und kurz erläutert.

Beim *Wassereindringprüfer nach Karsten* handelt es sich um ein gläsernes, skaliertes Röhrchen mit einer angesetzten Glasglocke, deren flacher Rand die Prüffläche begrenzt. An der Skalierung wird die über die Saugfläche aufgenommene Wassermenge angezeigt. Die genaue Durchführung und Auswertung der Messung wird in Kapitel 3.1 näher erläutert.

Die *Prüfplatte nach Franke*, auch Wasseraufnahmeprüfplatte genannt, sowie das *Prüfröhrchen nach Pleyers*, basieren auf dem Karsten'schen Prüfröhrchen. Sie unterscheiden sich jedoch in Ausführung und Auswertung. Die Prüfplatte nach Franke besitzt im Gegensatz zum Karsten'schen Prüfröhrchen keine runde sondern eine große rechteckige Aufnahmefläche (ca. 200 cm²) (HAINDL et al. 2016). Der Wassereindringprüfer nach Pleyers ähnelt dem runden Karstenröhrchen, besitzt aber eine, die gemessene Saugfläche umschließende, weitere Flüssigkeitskammer. Diese ermöglicht die zusätzliche Berücksichtigung von lateralen Verteilungseffekten (STELZMANN 2018).

Neben den zuvor genannten Methoden gibt es für schwer zugängliche oder kleine Messflächen das Verfahren nach Mirowski. Das *Mirowski-Röhrchen* ist ein skaliertes, oben geschlossenes Glasröhrchen mit abknickendem offenen Ende, in dem ein Schwämmchen sitzt. Das Glasröhrchen wird mit Wasser gefüllt und mit dem Schwämmchen verschlossen. Der Schwamm dient dem Wassertransport und begrenzt zugleich die Saugfläche (VANDEVOORDE et al. 2012).

Bei der *contact sponge*-Methode wird ein rundes, in einer Abklatschplatte befestigtes und mit Wasser getränktes Schwämmchen eine bestimmte Zeitspanne an die Objekt Oberfläche gedrückt und anschließend die Massedifferenz aufgezeichnet (VANDEVOORDE et al. 2012).

Für größere vertikale Flächen, wie beispielsweise Fassaden, kann das halbautomatische *Wasseraufnahmemessgerät (WAM) nach Stelzmann* zur Verwendung

kommen. Das WAM beregnet künstlich eine Wandfläche (40 x 30 cm) und misst mittels eingebauter Waage kontinuierlich die aufgenommene Wassermenge (STELZMANN, MÖLLER 2016). Aufgrund des großen Installationsaufwands und des hohen Preises ist diese Prüfmethode bisher eher unüblich in der Konservierung (WEHLE, GARIGLIO 2015).

Bei Messmethoden, die nicht direkt am Objekt, sondern an speziell formatierten Prüfkörpern (Quader, Zylinder) durchgeführt werden, kann die kapillare Wasseraufnahme durch mehrere genormte Methoden erhoben werden. Hier sind folgende Normen zu nennen: „Bestimmung der Wasserabsorption durch Kapillarität“ (DIN EN 15801:2010-04), „Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten infolge Kapillarwirkung“ (DIN EN 1925:1999-05) sowie „Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen“ (DIN EN ISO 15148:2016-12)¹. Diese Prüfmethode basieren auf der Grundlage, dem Probekörper kapillar Wasser anzubieten und diesen in regelmäßigen Abständen zu wiegen.

3.1 Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme mit dem Prüfröhrchen nach Karsten

Mithilfe des Karsten'schen Prüfröhrchens lässt sich die Wasseraufnahme weitestgehend zerstörungsfrei vor Ort, direkt an den zu beurteilenden Objekten ermitteln.

Die skalierten Prüfröhrchen gibt es in zwei verschiedenen Ausführungen mit jeweils unterschiedlich großen Saugflächen. Für senkrechte Prüfflächen ist das Steigröhrchen parallel zur Messfläche angebracht. Um waagrechte Oberflächen zu messen, können Röhrchen mit einem senkrecht über der Glasglocke angebrachtem Steigröhrchen verwendet werden. Die gebräuchlichsten Durchmesser der Prüfflächen betragen 26 und 45 mm. Die Messgenauigkeit der kapillaren Wasseraufnahme steigt mit größer werdender Prüffläche .

¹ Die Vorgehensweise zur „Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen“ wird in Kapitel 3.2 beschrieben.

Im Rahmen der Bachelorarbeit wurden Prüfröhrchen mit einem Durchmesser von 26 mm und mit 0,1 ml Schritten skalierten Steigröhrchen (max. 4 ml) verwendet (siehe Abb. 3).

Messung (D'HAM et al. 2011)

Bevor die eigentliche Messung beginnt, wird der Rand der Glasglocke mittels dauerelastischem Klebekitt (bspw. Plastic-fermit®) an der Objektoberfläche befestigt. Überstehende Kittränder werden, wenn möglich, glasbündig abgenommen, um Hofbildung der Wasserfront um die Saugfläche herum frühzeitig erkennen zu können. Das Röhrchen wird nach dem Anbringen zügig mit Wasser bis zur Nullmarke befüllt und die Zeitmessung gestartet. Während der Prüfung wird die aufgenommene Wassermenge abgelesen und die entsprechende Eindringzeit notiert. Das Auftreten eines Wasserhofes um das Röhrchen wird mit dem

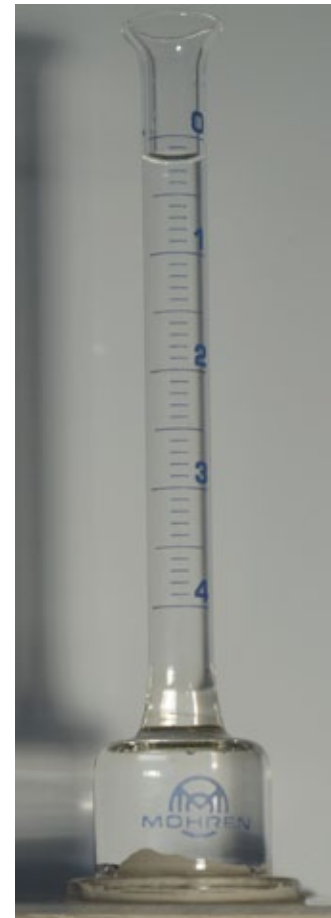


Abb. 3: Ein in den Versuchen verwendetes Prüfröhrchen der Firma Mohren

Zeitpunkt des Auftretens vermerkt. Die Messung muss abgebrochen werden, sobald Undichtigkeiten entstehen. Die Messung sollte im Idealfall 60 Minuten bzw. bis das Wasser die unterste Markierung im Steigröhrchen erreicht hat, durchgeführt werden. Nach Beendigung kann zur Erhöhung der Messgenauigkeit der innere Durchmesser der Kittwulst dokumentiert werden. Allerdings ist dabei zu beachten, dass der Durchmesser durch das Abnehmen leicht verändert wird und somit nicht die exakte Saugfläche wiedergibt. Diese Unschärfe ist jedoch für die Interpretation der Messergebnisse unproblematisch.

Auswertung

Zur Auswertung der wie oben beschrieben erhobenen Daten sind zwei in Microsoft Excel® geschriebene Auswerteprogramme gebräuchlich.

Zum einen das Programm Calkarow (Calculative Evaluation of Karsten Measure-

ments for Optimization of w-Values) von Wendler und Pfefferkorn (aktuelle Version 3.22) und

zum anderen das Auswerteprogramm von Niemeyer (NIEMEYER 2013).

In beiden Programmen erfolgt im Rahmen der Auswertung die Eingabe des Innendurchmessers des Röhrchens, sowie bis zu 15 Messpaaren aus Zeit und aufgenommener Wassermenge.

Im Auswerteprogramm Calkarow wird eine Spanne der unteren und oberen Grenze des Wassereindringkoeffizienten B vorgegeben (siehe Abb. 4). Diese Spanne wird automatisch in zehn Zwischenschritte geteilt. Entsprechend dieser Schritte wird im Hintergrund eine Kurvenschar berechnet.

Abschätzung des B-Wertes	
Untere Grenze [cm/h^{0,5}]:	
Obere Grenze [cm/h^{0,5}]:	
Schrittweite:	0,00

Abb. 4: Ausschnitt des Auswerteprogramms Calkarow 3.22

Durch Korrekturrechnungen wird aus dieser Schar die Kurve ermittelt, die möglichst nahe an den Datenpunkten der Karsten-Messung verläuft. Durch Variieren der Grenzwerte des B-Werts kann der maximale Korrelationskoeffizient und somit die Genauigkeit des Ergebnisses erhöht werden. Aus der so erhaltenen Idealkurve wird der sogenannte optimierte w-Wert ermittelt (SNETHLAGE, WENDLER 1989, D'HAM et al. 2011).

Im Ergebnisfeld gibt das Programm den optimierten w-Wert, den dazugehörigen B-Wert und die Wasseraufnahmekapazität an.

Die Wasseraufnahmekapazität ermittelt sich hier nach:

$$WAK = \frac{w}{B}$$

Das Auswerteprogramm von Niemeyer wurde als Alternative zu Calkarow geschrieben. Im Gegensatz zum rein mathematischen Ansatz von Calkarow wird bei Niemeyer eine Kurvenschar visuell abgeschätzt. Diese Kurvenschar wird durch Angabe der Saugfläche, der Wasseraufnahmekapazität und einem frei wählbaren Intervall des w-Wertes generiert. Durch Verändern des w-Wert-Intervalls versucht

man, diese Kurve der Kurve der Karsten-Messung anzugleichen. Das Auswerteprogramm ist abhängig von einer möglichst realitätsnahen, material- und zustandsspezifischen Angabe der Wasseraufnahmekapazität (NIEMEYER 2013, D'HAM et al. 2011).

Neben der selbst gewählten WAK und dem ermittelten w-Wert, wird der B-Wert angegeben. Bei Niemyer wird die Eindringtiefe durch Umstellen folgender Formel aus dem w-Wert und der WAK berechnet:

$$x = \frac{w \cdot \sqrt{t}}{WAK \cdot \delta}$$

$\delta = 0,998 \text{ g/cm}^3$ bei 20 °C (Dichte des Wassers)

3.1.1 Ausbreitung des Wasserkörpers in der Theorie

Die Auswertung der erhobenen Messdaten erfolgt unter anderem auf der Annahme, dass sich der Durchfeuchtungskörper dreidimensional in Form eines Zylinders mit angesetztem Vierteltorus ausbreitet (siehe Abb. 5).

Dieses Modell basiert auf der Theorie, dass die Eindringtiefen und -geschwindigkeiten aufgrund der Kapillargesetze richtungsunabhängig annähernd gleich sind (WENDLER, SNETHLAGE 1989).

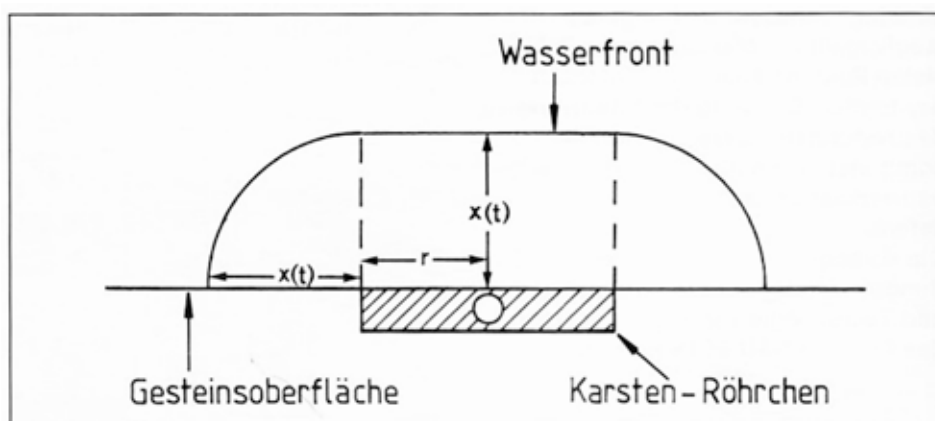


Abb. 5: Schematische Darstellung des beim Karsten-Röhrchen durchfeuchteten Gesteinsvolumens, $x(t)$: zeitabhängige Eindringtiefe bei kapillarem Wassertransport, r : Radius des zylindrischen Zentralteils der Durchfeuchtungszone.

Die Formel zur Berechnung des Durchfeuchtungs volumens setzt sich aus dem Volumen

des zentralen Zylinders und dem Volumenanteil des Vierteltorus zusammen.

$$V_{Dkar(t)} = V_{Zylinder} + V_{Vierteltorus}$$

$$V_{Dkar(t)} = \pi \cdot r^2 \cdot x(t) + \frac{\pi^2 \cdot r \cdot x(t)^2}{2} + \frac{2 \cdot \pi \cdot x(t)^3}{3} \quad (\text{NIEMEYER 2013})$$

ODER

$$V_{(t)} = r^2 \cdot \pi \cdot x(t) + \frac{r \cdot \pi^2}{2} \cdot x(t)^2 + \frac{\pi^2}{4} \cdot x(t)^3 \quad (\text{WENDLER, SNETHLAGE 1989})$$

Die Formeln nach WENDLER, SNETHLAGE (1989) und nach NIEMEYER (2013) unterscheiden sich leicht in der Berechnung des Vierteltorusvolumen (siehe dritter Summand beider Formeln).

Allerdings haben Beobachtungen von Prof. Dr.-Ing. Stephan Pfefferkorn (HTW Dresden) gezeigt, dass diese bisherigen Annahmen bezüglich der Ausbreitung des Wasserkörpers nicht mit der Realität übereinstimmen. In der Anwendung beider Auswertprogramme hat sich in der Praxis gezeigt, dass die dadurch berechneten Wassereindringtiefen keine verlässlichen Angaben liefern.

3.2 Bestimmung der Wasseraufnahme in Anlehnung an DIN EN ISO 15148

Die DIN EN ISO 15148:2016-12 „Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen“ (früher: DIN 52617) ist eine für das Bauwesen erarbeitete Norm zur Prüfung der kapillaren Wasseraufnahme poröser Baustoffe².

Die in dieser Arbeit durchgeführten Prüfungen der Wasseraufnahme ohne Karsten'sches Prüfrohr lehnen sich an diese Norm an. Hierbei wurde wie folgt vorgegangen:

Die Prüfkörper wurden bis zur Massekonstante getrocknet, seitlich mit Parafilm M® zur exakten Begrenzung der Saugfläche abgedichtet und die Trockenmasse ermittelt. In einem flach mit Wasser gefüllten Gefäß wird der Körper mit seiner Saugfläche auf

2 Eine Kurzzusammenfassung dieser ist im Anhang zu finden.

ein Kunststoffgitter gestellt und die Zeitmessung begonnen (siehe Anhang Abb. 47). In regelmäßigen Abständen wird der Probekörper gewogen und die verstrichene Zeit notiert. Hierbei wird vor jeder Wägung nicht aufgenommenes Wasser mit einem mattfeuchten Schwammtuch von der Saugfläche abgetupft. Die Messung erfolgt mindestens 60 Minuten bzw. bis der Feuchtehorizont die Oberfläche des Prüfkörpers durchbricht. Um den Kennwert der Wasseraufnahmekapazität zu ermitteln, kann die Prüfung zusätzlich bis zur vollständigen Durchfeuchtung des Probekörpers fortgeführt werden (siehe Kapitel 4.4.3).

Die so erhobenen Daten werden wie folgt ausgewertet:

$$\Delta m_t = \frac{(m_t - m_i)}{A}$$

Dabei ist

m_t - Masse zu Zeitpunkt t [kg], m_i - Ausgangsmasse [kg], A - Saugfläche [m²]

Alle Δm_t werden über \sqrt{t} in Punkten in einem Graph aufgetragen

Dabei ist t - Wägezeitpunkt [sec]

Aus den Werten von Δm_t wird ein w -Wert zum jeweiligen Zeitpunkt t berechnet.

Anhand dieser Werte wird ein allgemein gültiger w -Wert zunächst abgeschätzt.

Ein linearer Graph ($f(x)=a \cdot x+b$) wird auf Grundlage dieses abgeschätzten w -wertes erstellt, wobei der w -Wert der Steigung des Graphen und \sqrt{t} dem Wert x entspricht.

Durch Variieren der Steigung und der Achsenverschiebung b wird der Graph so lange angepasst, bis dieser möglichst genau auf den zuvor aufgetragenen Punkten liegt. Aus dem optimierten Graphen lässt sich nun auf einen allgemeinen w -Wert für diese Messung schließen.

Da üblicherweise das Anfangssaugverhalten einen überhöhten w -Wert abbildet, können ein Start- w -Wert und ein Verlaufswert differenziert werden.

In vorliegender Arbeit wurde sich auf den Verlaufswert bezogen.

4. Experimenteller Nachweis des Wasserkörpers

Der im Folgenden detailliert beschriebene Hauptversuch soll Aufschluss über die Geometrie des Wasserkörpers in den ausgewählten Gesteinen liefern. Dazu wurde ein mit Kaliumpermanganatlösung gefülltes Karsten'sches Prüfröhrchen für die Messung der kapillaren Wasseraufnahme verwendet. Nach erfolgreicher Messung wurde der Natursteinquader tomographieartig aufgetrennt, um den durch den Farbstoff penetrierten Bereich zu dokumentieren. Die auf diese Art gewonnene Visualisierung dient der Auswertung des Ausbreitungsverhalten von Flüssigkeiten in porösen Baustoffen. Besonders bisher angenommene Berechnungsansätze der Eindringtiefe (siehe Kapitel 3.1.1) werden durch diesen Versuch auf den Prüfstand gestellt.

4.1 Vorversuche

Zunächst wurden Probeversuche an kleinen Gesteinsprismen¹ (4 x 4 x 8 cm) durchgeführt, um die grundsätzliche Durchführbarkeit der geplanten Methode zu eruieren (siehe Abb. 6). An diesen Körpern wurden erste Versuche zum Anfärben und zum Auftrennen durchgeführt.

Die aus den Vorversuchen gewonnenen Erkenntnisse flossen direkt in die weitere Versuchsplanung ein. Relevante Vorversuche wurden in die entsprechenden Kapitel im Fortgang dieser Qualifikationsarbeit näher erläutert.



Abb. 6: Mit Plastic-fermit® befestigtes Kunststoffröhrchen auf Cottaer Sandstein, darin $KMnO_4$ -Lösung

¹ Diese Prismen aus Postaer, Obernkirchner und Cottaer Sandstein stammten aus dem Lager der Fachhochschule Potsdam und waren nicht weiter spezifiziert. Eine Behandlung mit Konservierungsmitteln o.ä. konnte daher nicht vollständig ausgeschlossen werden.

4.2 Versuchsaufbau

Für die Versuchsreihe wurden die, durch Herrn M. Wittner bereits würfelförmig formatierten, Probekörper (Kantenlänge von ca. 7 cm^2)³ nach dem folgenden Schema benannt: **XXn**

Die Bezeichnung besteht aus zwei Großbuchstaben **XX**, welche das jeweilige Gestein näher spezifizieren (BS – Nürnberger Burgsandstein; BU – Bucher Sandstein; LE – Leistädter Sandstein; SA – Sander Sandstein). Die Gesteine wurden innerhalb einer Gruppe fortlaufend mit der Ziffer *n* nummeriert. Die Kennzeichnung erfolgte mit einem Permanentmarker stets in der linken oberen Ecke der Oberseite. Die Schichtung der Probekörper verläuft horizontal zur Oberfläche (siehe Abbildung 7, Bleistiftmarkierung =).

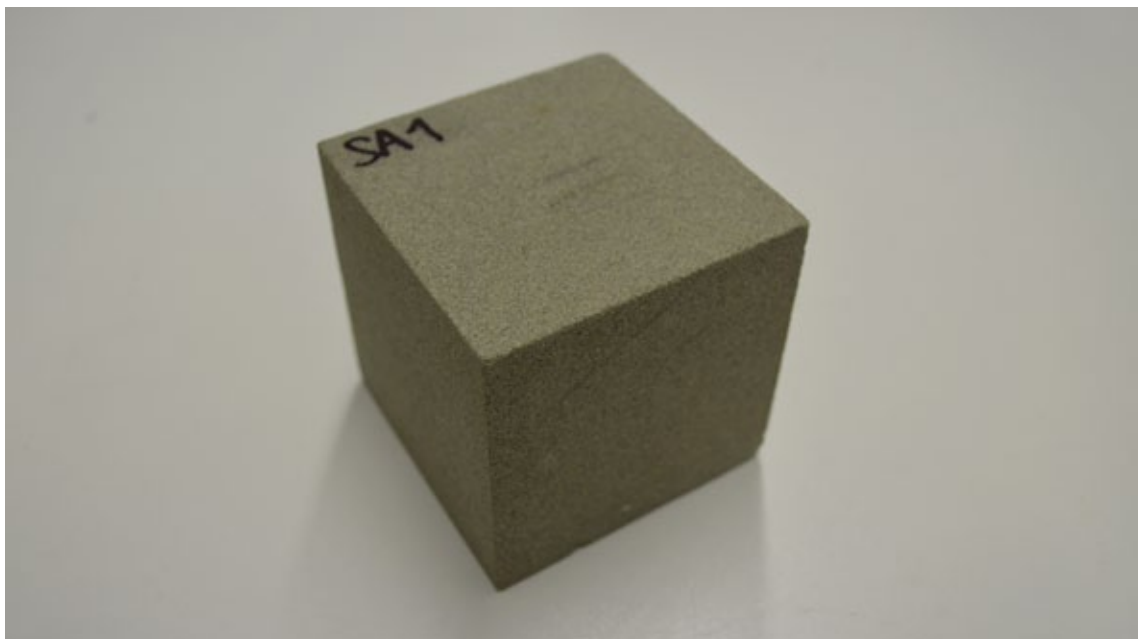


Abb. 7: Beispiel für einen Probekörper (SA1)

Alle Natursteinwürfel wurden vor dem Versuch bei 40 °C im Trockenschrank bis zur Massekonstante getrocknet.

Für den Hauptversuch wurde ein Karsten'sches Prüfröhrchen ($\varnothing 26\text{ cm}$) mit waagerechter Saugfläche, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, mittig mit Installationskitt

2 Detaillierte Maße und Gewicht im Anhang

3 Die Probenkörpergröße wurde durch die verwendete Trenntechnik begrenzt (siehe Kapitel 4.6 Trennmethode).

plastic-fermit® aufgebracht. Anschließend wurde das Steigröhrchen mit Kaliumpermanganat-Lösung (0,04 M) gefüllt und die kapillare Wasseraufnahme in Abhängigkeit der Zeit gemessen. Nachdem eine vorher festgelegte Menge Farblösung in den Stein eingedrungen war, wurde das Prüfröhrchen zügig über Kopf ausgeleert, abgenommen und die Saugfläche von auf der Oberfläche stehender Lösung mittels Tuch abgenommen und von Kittresten⁴ befreit. Die so gereinigte Oberfläche wurde zeitnah fotografisch festgehalten.

Nach der Dokumentation der Saugfläche wurden mit einer Trennschleifmaschine der Prüfkörper in gleichmäßige dünne Scheiben geschnitten. Das Trennverfahren ist in Kapitel 4.6 weiterführend beschrieben.

4 durch Andrücken weiteren Kitts

4.3 Verwendete Probegesteine

In der vorliegenden Bachelorthesis wurden folgenden Gesteine ausgewählt und beprobt:

Bucher Sandstein (BU)

Nürnberger Burgsandstein (BS)

Leistädter Sandstein (LE)

Sander Sandstein (SA)⁵

Um eine Varianz an verschiedenen Gesteinen abzudecken, wurden Bucher Sandstein und Nürnberger Burgsandstein als mittel- bis grobkörnige Gesteine ausgewählt. Als Vertreter für fein- bis mittelkörnige Sandsteine wurde Leistädter Sandstein beprobt. Um einen feineren Sandstein mit tonigem Anteil zu untersuchen, wurde Sander Sandstein in die Probenreihe aufgenommen.

Um hinsichtlich der WTA-Arbeitsgruppe „Kapillare Wasseraufnahme“ die größtmöglichen Synergien zu erzeugen, waren zunächst Leistädter Sandstein, Abtswinder Sandstein und der Krenzheimer Muschelkalk als Probegesteine geplant. Diese wurden im Rahmen der Arbeitsgruppe oft beprobt, so dass ein entsprechend großer Datensatz an Kennwerten zur Verfügung steht. Bei Voruntersuchungen zum Anfärbemittel erwiesen sich jedoch der Abtswinder Sandstein und der Krenzheimer Muschelkalk als nicht geeignet für den geplanten Versuchsaufbau (siehe 4.5 Anfärbemittel). Als Alternative zum Abtswinder Sandstein wurde der bereits erwähnte Sander Sandstein gewählt. Darüber hinaus wurden für die Vorversuche weitere Gesteine wie Postaer Sandstein, Cottaer Sandstein und Božanov-Sandstein (Tschechien) verwendet.

⁵ in Klammern: Probenkürzel

Detaillierte Gesteinsbeschreibung im Anhang (S. 101 bis 105) sowie petrophysikalischen Parametern siehe Anhang Tab. 3

4.4 Bestimmung der Wasseraufnahme der Probekörper

Um die Probekörper in ihrem Wasseraufnahmeverhalten einschätzen zu können, wurde die Wasseraufnahme mit dem Karsten'schen Prüfröhr (waagerechte Saugfläche mit \varnothing 26 mm) an allen Probekörpern gemessen. Als zusätzliche Bestimmung der jeweiligen Wasseraufnahme erfolgte die Prüfung durch teilweises Eintauchen (siehe Beschreibung Kapitel 3.2). Im Rahmen dieser Messung erfolgte auch die Ermittlung der Wasseraufnahmekapazität.

4.4.1 Wasseraufnahme mittels Karsten'schem Prüfröhrchen

Zur Auswertung wurden die ermittelten Daten als Graphen abgebildet, sowie der optimierte Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert) über Calkarow abgeschätzt. Aus den beschriebenen Fehlern der Auswerteprogramme, können diese Werte nur untereinander vergleichbar sein.

In den folgenden Darstellungen (Abb. 8 - 12) beschreibt die y-Achse die Wasseraufnahme in Millilitern. Im Verhältnis dazu gibt die x-Achse den dazugehörigen Messzeitpunkt in Sekunden an.

Das Wasseraufnahmeverhalten der Probekörper aus *Bucher Sandstein* ist generell als schnell saugend zu beurteilen (siehe Abb. 8). Die w-Werte liegen zwischen 26 und 44 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}}$).

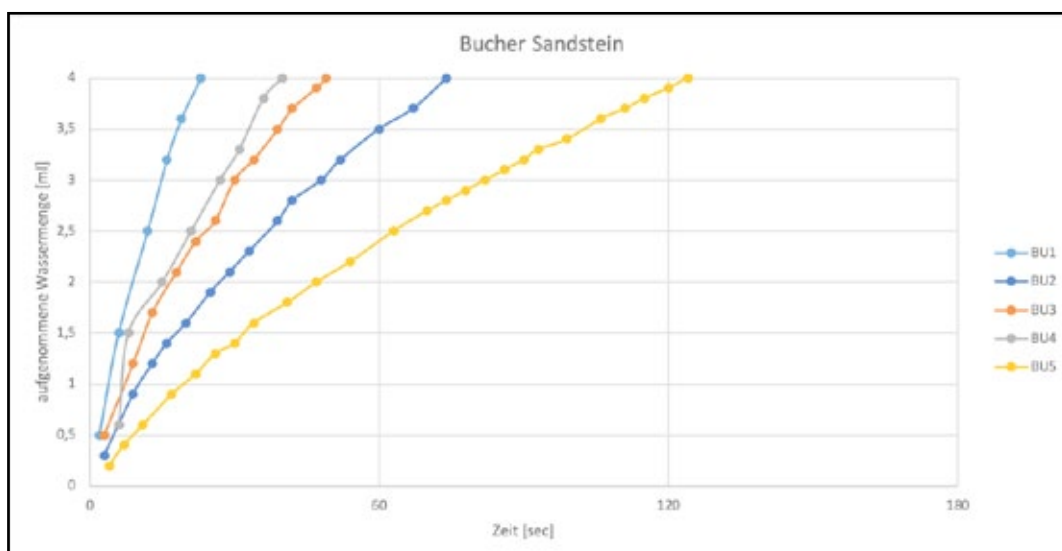


Abb. 8: Graphen der Wasseraufnahme mittels Karsten'schem Prüfröhrchen an *Bucher Sandstein*

Beim *Nürnberger Burgsandstein* liegen die Wasseraufnahmekoeffizienten zwischen 20 und 29 $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})]$. Er ist ebenfalls als schnell saugend zu bezeichnen. Die Graphen der Probekörper liegen recht nah beieinander. Ausnahme bildet hier der Prüfkörper BS3, der sich etwas langsamer saugend verhält (siehe Abb. 9).

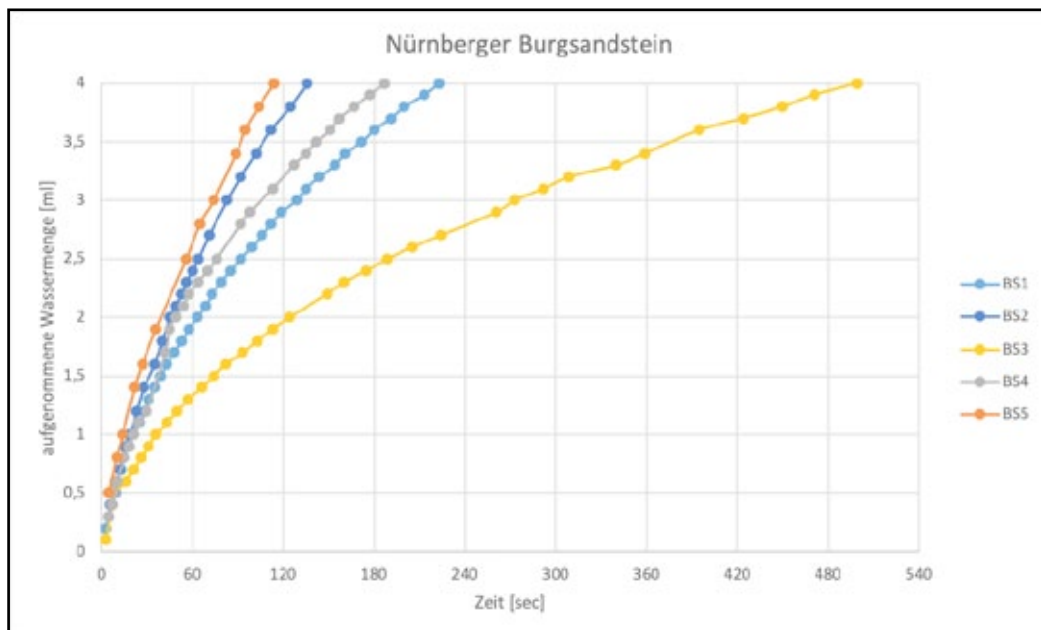


Abb. 9: Graphen der Wasseraufnahme mittels Karsten'schem Prüfröhrchen an Nürnberger Burgsandstein

Die Wasseraufnahmekurven des *Leistädter Sandstein* zeigen ein ebenfalls hohes Saugverhalten zu Beginn der Messung. Ab Sekunden 120 - 180 verlangsamt sich die Wasseraufnahme. Nach etwa 360 Sekunden wird der Widerstand deutlich größer und der Sandstein nimmt nur noch sehr langsam Wasser auf. Die Streuung der Messdaten ist recht gering. Mit Ausnahme des Probekörper LE4; dieser zeigt eine deutlich langsameres Wassereindringverhalten und eine geringere Wasseraufnahme (siehe Abb. 10 + 11). Die w -Werte liegen zwischen 2,6 und 4,8 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$].

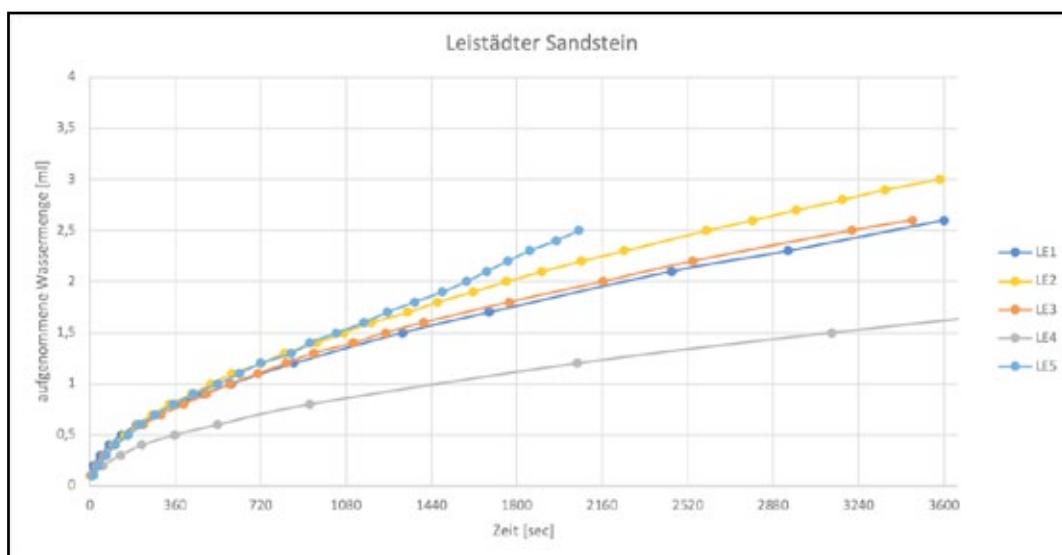


Abb. 10: Graphen der Wasseraufnahme mittels Karsten'schem Prüfröhrchen an Leistädter Sandstein

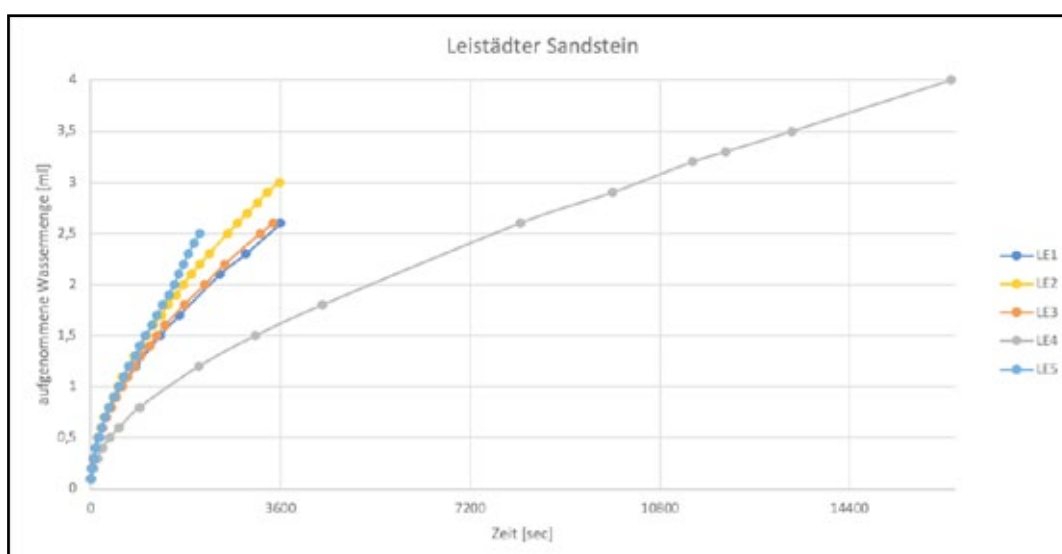


Abb. 11: Wasseraufnahme mittels Karsten'schem Prüfröhrchen an Leistädter Sandstein, Verlauf LE4

Das Wassereindringverhalten bei *Sander Sandstein* kann als langsam saugend beschrieben werden. Ein besonders ausgeprägtes, gesteigertes Anfangssaugverhalten ist nicht erkennbar. Die Streuung der Graphen ist gering. Lediglich Probekörper SA4 und SA5 weichen nach längeren Messzeitraum nach unten ab (siehe Abb. 12). Die Wasseraufnahmekoeffizienten liegen zwischen 1,5 und 2 [kg/(m²·√h)].

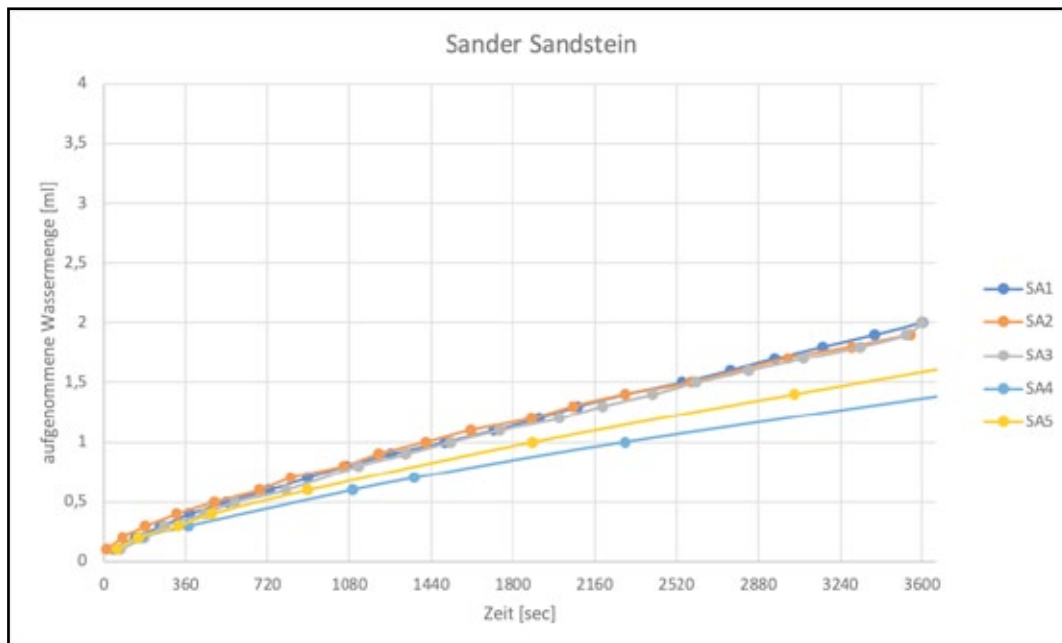


Abb. 12: Graphen der Wasseraufnahme mittels Karsten'schem Prüfröhrchen an Sander Sandstein

4.4.2 Wasseraufnahme in Anlehnung an DIN EN ISO 15148

An je einem Prüfkörper wurde die kapillare Wasseraufnahme durch teilweises Eintauchen, wie in 3.2 beschrieben, ermittelt.

Alle Probegesteine können als „gut saugend“ beschrieben werden (SNETHLAGE, PFANNER 2013). Im direkten Vergleich untereinander lassen sich die Wasseraufnahmeeigenschaften der Gesteine jedoch differenzieren.

Der am *Bucher Sandstein* ermittelte w-Wert liegt bei 9,5 [kg/(m²·√h)] (Probekörper BU2), was ihn als das am stärksten saugende Probegestein auszeichnet. Der Wasseraufnahmekoeffizient von *Nürnberger Burgsandstein* liegt bei 6 [kg/(m²·√h)] (Probekörper BS4). Die Prüfung am *Sander Sandstein* kommt auf einen w-Wert

von 4 [kg/(m²·√h)] (Probekörper SA5). Mit einem Aufnahmekoeffizienten von 3,6 [kg/(m²·√h)] (Probekörper LE5) zeigt sich der Probekörper des *Leistädter Sandstein* als am schwächsten saugend.

Werden die w-Werte der Karsten-Messungen mit diesen Werten verglichen, zeigt sich, dass die w-Werte von Bucher Sandstein und Nürnberger Burgsandstein extrem abweichen. Die überhöhten w-Werte sind der kurzen Messzeit geschuldet und bilden nicht das Wassereindringverhalten über einen längeren Zeitraum ab. Es wird zum einen nur das Anfangssaugen der Gesteine abbildet, zum anderen beeinflusst die Sickerströmung die Wasseraufnahme.

Die in Anlehnung an DIN am Probekörper SA5 ermittelte w-Wert ist mindestens doppelt so hoch wie die über Calkarow berechneten Werte. Es wird davon ausgegangen, dass die quellenden Tonminerale im Sander Sandstein einen Einfluss auf die Wasseraufnahme besitzen.

Tab. 1: Zusammenfassung aller ermittelten w-Werte

Messung	w-Wert [kg/(m ² ·√h)]	Messung	w-Wert [kg/(m ² ·√h)]
BU1 (Calkarow)	40,4	BS1 (Calkarow)	25,1
BU2 (Calkarow)	32,5	BS2 (Calkarow)	23,9
BU3 (Calkarow)	39,6	BS3 (Calkarow)	20,0
BU4 (Calkarow)	44,0	BS4 (Calkarow)	28,2
BU5 (Calkarow)	26,0	BS5 (Calkarow)	26,9
BU2 (i.A.a DIN)	9,5	BS4 (i.A.a DIN)	6
Messung	w-Wert [kg/(m ² ·√h)]	Messung	w-Wert [kg/(m ² ·√h)]
LE1 (Calkarow)	3,9	SA1 (Calkarow)	1,9
LE2 (Calkarow)	4,8	SA2 (Calkarow)	2,0
LE3 (Calkarow)	3,5	SA3 (Calkarow)	1,6
LE4 (Calkarow)	3,0	SA4 (Calkarow)	1,6
LE5 (Calkarow)	2,6	SA5 (Calkarow)	1,5
LE5 (i.A.a DIN)	3,6	SA5 (i.A.a DIN)	4

4.4.3 Bestimmung der Wasseraufnahmekapazität

Im Zuge der Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten in Anlehnung an DIN EN ISO 15148 wurde zusätzlich die Wasseraufnahmekapazität (WAK) bestimmt. Hierzu wird der Probekörper so lange in der Prüfanordnung belassen, bis die komplette Probekörperoberfläche feucht erscheint. Durch Wägung wird die zu diesem Zeitpunkt aufgenommene Wassermenge bestimmt (m_{nass}).

Die Wasseraufnahmekapazität wurde nach folgender Formel berechnet:

$$WAK_{(Gew.-\%)} = \frac{m_{nass} - m_{trocken}}{m_{trocken}}$$

$$WAK_{(Vol.-\%)} = \frac{m_{nass} - m_{trocken}}{V_{Probekörper}}$$

Tab. 2: Ermittelte Wasseraufnahmekapazitäten der Probekörper

WAK	[Gew.-%]	[Vol.-%]
BU2	5,9	11,9
BS4	6,5	12,9
LE5	4,0	8,7
SA5	5,5	12,0

4.4.4 Weitere Untersuchungen zur Wasseraufnahme

An Bohrkernen aus Postaer und Leistädter Sandstein wurden zusätzliche Prüfungen der Wasseraufnahme durchgeführt, um weitere Aussagen über das kapillare Wassereindringverhalten machen zu können.

Die Wasseraufnahme der Bohrkern wurden wie in Kapitel 3.2 beschrieben durch kapillares Saugen gegen die Schwerkraft geprüft. Hierbei wurde die Messung am Bohrkern des Postaer Sandstein bis zum Durchbruch des Feuchtehorizonts an der Oberseite durchgeführt. Bei der Messung am Leistädter Sandstein wurde die Messung nach 60 Minuten abgebrochen.

Ergänzend zum Messverfahren in Anlehnung an DIN EN ISO 15148 wurde ein Versuch mit am Bohrkern befestigtem Karstenröhrchen mit senkrechter Saugfläche

durchgeführt. Hierzu wurden die Bohrkern bis zu Massekonstante getrocknet, mit Parafilm M® abgedichtet und ein Karstenröhrchen (\varnothing 26 mm) an der Standfläche mit geschmolzenem Paraffin befestigt und die Prüfung der kapillaren Wasseraufnahme wie in Kapitel 3.2 beschrieben durchgeführt (siehe Abb. 13).

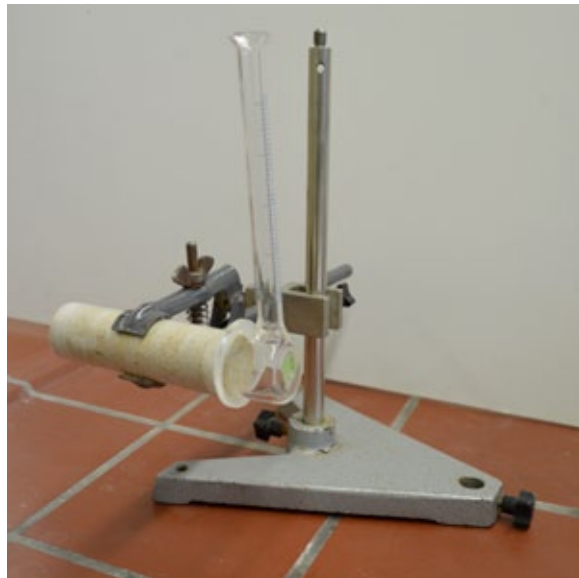


Abb. 13: Karstenröhrchen mit senkrechter Saugfläche an eingespanntem Bohrkern

Auswertung

An den Kurvenverläufen von Bohrkern P1 (Abb. 14) lässt sich der Einfluss der Schwerkraft gut ablesen.

Während zu Beginn der Wasseraufnahme der Einfluss der Schwerkraft bzw. der Sickerströmung keine Rolle spielt (bis ca. 2 ml), ist im weiteren Verlauf der Wasseraufnahme ein deutlicher Effekt erkennbar. So zeigt die Messung waagrecht zur Saugfläche (Abb. 14, gelber Graph) zum Zeitpunkt 360 sec eine höhere Wasseraufnahme als die Vergleichsmessung mit senkrechter Saugfläche (Abb. 14, blauer Graph) bzw. der Messung bei teilweisem Eintauchen (Abb. 14, grauer Graph). Am teilweise durchfeuchteten Bohrkern konnte man den feuchtetransport-hemmenden Einfluss der Gesteinsschichtung bei der Messung gegen die Schwerkraft sehr gut erkennen. Beim Erreichen einer, den gesamten Querschnitt durchreichenden, Bänderung stoppte der Feuchtehorizont. Dieser Einfluss lässt sich auch am Graphen ablesen (Abb. 15). Am markierten Punkt bei acht Minuten (480 sec) verlangsamt sich die Wasseraufnahme enorm.

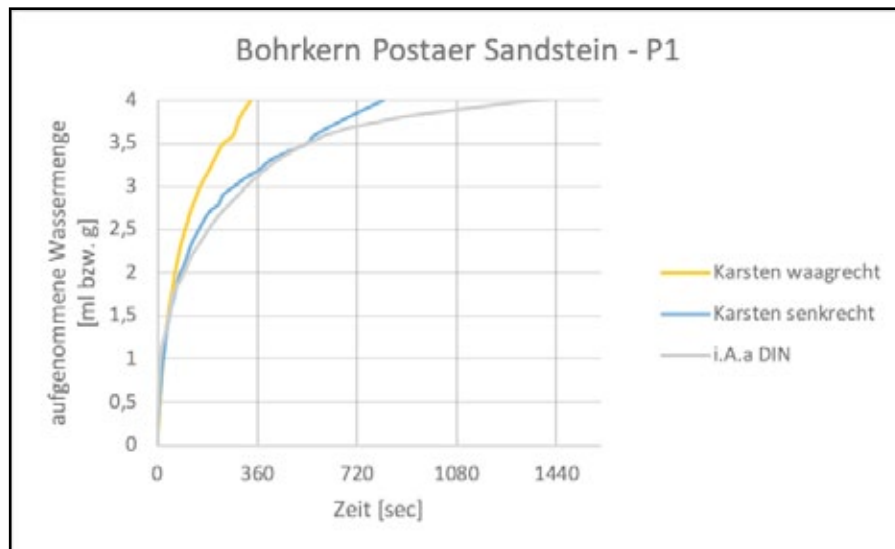


Abb. 14: Wasseraufnahme am Bohrkern P1 (Postaer Sandstein)

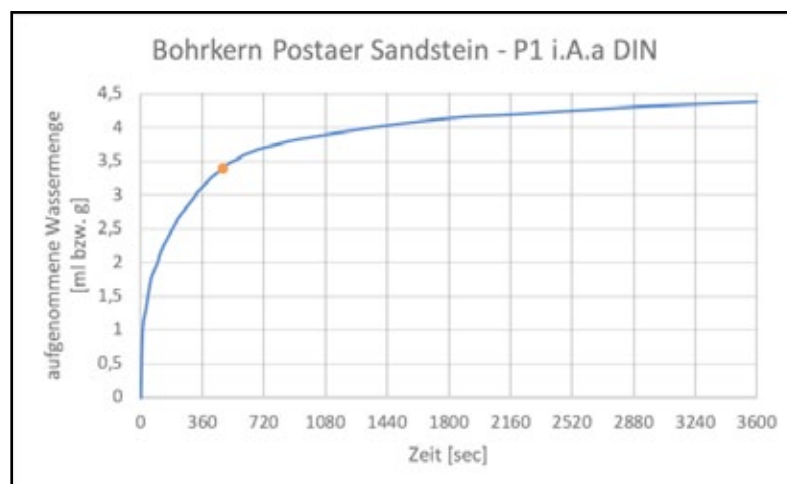


Abb. 15: Wasseraufnahme in Anlehnung an DIN EN ISO 15148 (Bohrkern P1)

Bei Bohrkern P3 wurde eine gleichmäßige Wasseraufnahme ebenso durch die Schichtung verhindert (siehe Anhang Abb. 47). Da der Feuchtehorizont seitlich weiter steigen konnte, ist dies nicht direkt am Graphen ablesbar (siehe Anhang Abb. 48).

4.5 Anfärbemittel

Um die Ausdehnung des Durchfeuchtungskörpers sichtbar machen zu können, wurden zwei verschiedene Lösungen mit färbendem Ionenkomplex als Farbstoff getestet (Kaliumpermanganat und Tetraamminkupfersulfat).

4.5.1 Kaliumpermanganat

Kaliumpermanganat (KMnO_4) ist ein Kaliumsalz der Permangansäure. Es bildet dunkelviolette Kristalle mit metallischem Glanz (siehe Anhang Abb. 49). Eine wässrige Lösung färbt sich schon bei geringer Konzentration pink bis violett ein. Für diese Färbung ist ausschließlich das Permanganat-Anion (MnO_4^-) verantwortlich. Kaliumpermanganat besitzt eine Löslichkeit von 64 g/L (bei 20 °C). Der kristalline Feststoff ist bei Raumtemperatur stabil, in wässrigen Lösungen zersetzt sich KMnO_4 mit der Zeit (KALIUMPERMANGANAT, CHEMIE.DE).

Die Auswahl des Färbemittels erfolgte aufgrund der geringen Größe des färbenden MnO_4^- -Ions, welches mit einem ungefähren Durchmesser von 0,5 nm relativ nahe der Molekülgröße von Wasser (H_2O Ø ca. 0,28 nm) ist (WENDLER 2016). Andere bekannte Anfärbemittel etwa aus der Histochemie oder der Medizin wurden im Voraus aufgrund deren Molekülgröße ausgeschlossen. Das 3 nm große Methyleneblau erreichte beispielsweise bei Versuchen an Tuff im Gegensatz zu Kaliumpermanganat nur ein geringes Eindringen, welches nicht dem Eindringvermögen von Wasser entspricht (WENDLER 2016).

Das als Feststoff vorliegende Kaliumpermanganat wurde in destilliertem Wasser gelöst. Für einen Vergleich der Stoffkonzentrationen wurde eine 0,02 molare und eine 0,04 molare Lösung hergestellt.

In einer Testreihe wurde an ca. 1 mm starken, 4 x 4 cm großen Gesteinsplättchen aus Postaer Sandstein das Verhalten der unterschiedlich starken Lösungen untersucht. Die Plättchen wurden mit ihrer Kante jeweils in die gleiche Menge (0,25 ml) Permanganatlösung gegeben. Die 0,02 M-Lösung zeigte ein gutes Anfärbeverhalten, jedoch erschienen Randbereiche manchmal nur blass pink. Bei der Lösung mit der Stoffmengenkonzentration von 0,04 M zeigten sich klar abgrenzbare Randbereiche

zwischen Anfärbung und trockenem Steingefüge (siehe Anhang Abb. 50). Daher wurde in weiteren Untersuchungen mit der 0,04 molaren Lösung gearbeitet.

An jeweils einer Probeplatte je Gestein (Maße 12 x 12 x 3 cm) wurden zwei Karstenröhrchen mit waagerechter Saugfläche gleichzeitig mit den unterschiedlich starken Konzentrationen der Kaliumpermanganatlösung befüllt. Dieser Versuchsaufbau wurde zu Dokumentationszwecken auf einer Glasscheibe mit darunter befindlicher Kamera durchgeführt¹.

Bei dem Versuch am Leistädter Sandstein zeigen beiden Stoffmengenkonzentrationen einen Durchfeuchtungshorizont an der Unterseite der Platte (siehe Anhang Abb. 51). Dabei ist zu beobachten, dass bei der geringeren konzentrierten Lösung die Durchfeuchtungszone keinerlei Färbung aufweist. Hier ist davon auszugehen, dass nicht ausreichend Permanganionen vorhanden sind um den gesamten Porenraum anzufärben. Des Weiteren sind bei diesem Versuch ebenfalls Schichtungseinflüsse zu erkennen, da sich der abzeichnende Wasserkörper einmal radial, und einmal als unregelmäßige Form an der Unterseite abbildet. Es ist nicht auszuschließen, dass dies ebenso Auswirkungen auf die Verteilung des Farbstoffes mit sich zieht.

Bei den Vergleichsmessungen der Stoffmengenkonzentration am Abtswinder Sandstein kam es zu Chromatografieeffekten der wässrigen Kaliumpermanganatlösung bei beiden Konzentrationen. Der das Karsten'sche Prüfröhrchen umgebende Feuchtehof zeigte zum äußeren Rand hin keine Anfärbung mehr auf (siehe Anhang Abb. 52).

Beim Anfärbeversuch des Krenzheimer Muschelkalks kamen Wasser und färbende Manganationen zeitversetzt an der Probeplattenunterseite an. Der Durchfeuchtungshorizont war zunächst nur feucht und verfärbte sich erst ca. 20 – 30 Minuten nach Abnahme der Karstenröhrchen schwach rosa (siehe Anhang Abb. 53). Außerdem erwies sich dieser bei weiterer Überlegung als zu heterogen um generelle Aussagen zum Wasserkörper tätigen zu können.

¹ Dieser Aufbau ist angelehnt an einen Versuch von Lea Mertens und Eberhard Wendler. Aufgrund der Stärke der vorhandenen Platten konnte hier nur bedingt das gewünschte Ergebnis, den Wasserkörper längere Zeit bei der Ausbreitung auf der Plattenunterseite zu beobachten, erzielt werden.

Überlegungen zur Reduzierung des Farbstoffes zu Braunstein

Das in Wasser gelöste Kaliumpermanganat zersetzt sich nach einiger Zeit zu wasserunlöslichem Braunstein (Mangan(IV)-oxid). Es stand die Idee im Raum, die eingebrachte Lösung zunächst trocknen zu lassen, um anschließend im Nassverfahren sägen zu können. Der Farbstoff scheint jedoch beim Trocknen wieder an die Oberfläche gezogen zu werden und den Porenraum nicht dauerhaft anzufärben. Es kommt zur Entfärbung im Gefüge des Probekörpers und somit zu keiner realistischen Abbildung des Wasserkörpers. Daher können die Probekörper für die Auswertung nicht nass, sondern im Trockensägeverfahren direkt nach der Trängung entsprechend formatiert werden. Vorversuche, die Schnitte durch trockenes Sägen zu erzeugen, erbrachten für die Darstellung des Wasserkörpers das erwünschte Ergebnis von klar ablesbar angefärbten Durchfeuchtungszonen (siehe Abb. 16). Aus Gründen der Sicherheit bzw. des Gesundheitsschutzes sowie der erfolgreichen Sägeversuche ohne Wasser, wurden Ansätze, das KMnO_4 durch gasförmige Reduktionsmittel noch im Porenraum zu Manganoxid umzuwandeln, nicht weiter verfolgt.

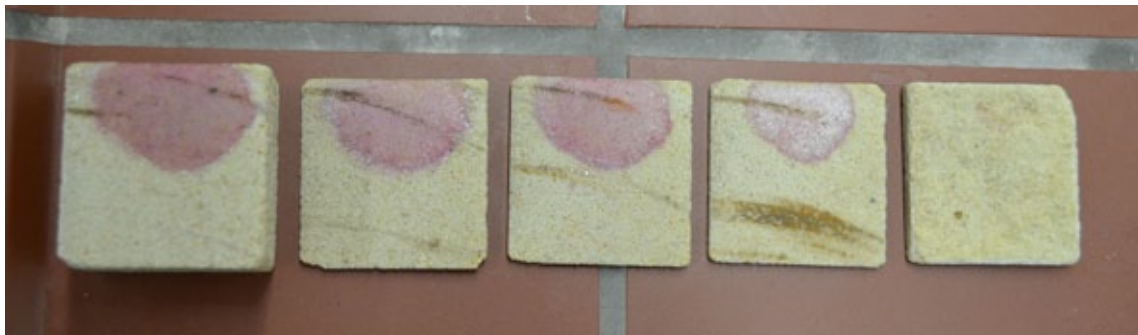


Abb. 16: Angefärbte Durchfeuchtungshorizonte aus den Vorversuchen (Postaer Sandstein)

4.5.2 Tetraamminkupfersulfat

Auf der Suche nach Farbstoffen, welche den Porenraum stabiler anfärben, wurde auf Anstoß von Prof. Dr. Helmut Cölfen (Universität Konstanz) eine Probenreihe mit Tetraamminkupfersulfatlösung durchgeführt. Eine Lösung von Tetraamminkupfer(II)-sulfat ($\text{Cu}(\text{NH}_3)_4\text{SO}_4$) in Wasser zeigt eine tiefblaue Farbe, welche durch den Tetraamminkomplex des Kupfers $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ verursacht wird. (TETRAAMMINKUPFERSULFAT, WIKIPEDIA)

Die Tetraamminkupfer(II)-sulfat-Lösung wurde aus einer 3%-igen Kupfersulfatlösung unter Zugabe von Ammoniakwasser (25 %-ige Lösung) im Überschuss erstellt. Zunächst wurde Kupfer-II-sulfat-5-hydrat in destilliertem Wasser gelöst². Dieser blassblauen Lösung wurde nach und nach Ammoniakwasser hinzugegeben, bis diese über milchig-blau in eine tiefblaue Lösung umschlug (siehe Anhang Abb. 54).

Weitere Anfärbeprobe an Gesteinsplättchen (4 x 4 cm) aus Postaer Sandstein wurden simultan zum Versuch mit Kaliumpermanganat durchgeführt. Den Plättchen wurde eine gleiche Menge Farblösung angeboten. Das Anfärben zeigte sich als ausreichend und gut ablesbar (siehe Anhang Abb. 55). Der angefärbte Wasserkörper ließ sich an den dünnen Plättchen auch nach dem Trocknen noch an beiden Seiten der Scheiben ablesen.

4.5.3 Vergleich der Eignung von Kaliumpermanganat und Tetraamminkupfersulfat

Da das blaue Tetraamminkupfersulfat die Probeplättchen durchgehend anfärbte und die färbenden Ionenkomplexe sich nicht an der Oberfläche anreicherten, wurden weitere Vergleichsversuche durchgeführt.

Aus einem nicht näher spezifizierbaren Werkstein aus Postaer Sandstein wurden vier Bohrkerne (\varnothing 30 mm, l ca. 100 mm) gezogen. An diesen wurde als Grundlage zum Vergleich beider Farbstoffe die Wasseraufnahme analog zum Hauptversuch mittels Wassereindringprüfer nach Karsten (waagerechte Saugfläche) und destilliertem Wasser geprüft. An zweien der Bohrkerne wurde dieser Versuchsaufbau mit den beiden farbigen Lösungen wiederholt.

An den aus den erhobenen Werten erstellten Graphen lässt sich ablesen, dass beide Lösungen einen Einfluss auf das Eindringverhalten haben, welcher eher vernachlässigbar scheint. Die Farblösungen dringen zwar langsamer als Wasser ein, zeigen jedoch einen sehr ähnlichen Kurvenverlauf (Abb. 17 + 18).

2 Bei der stöchiometrischen Rechnung wurde das Kristallwasser berücksichtigt.

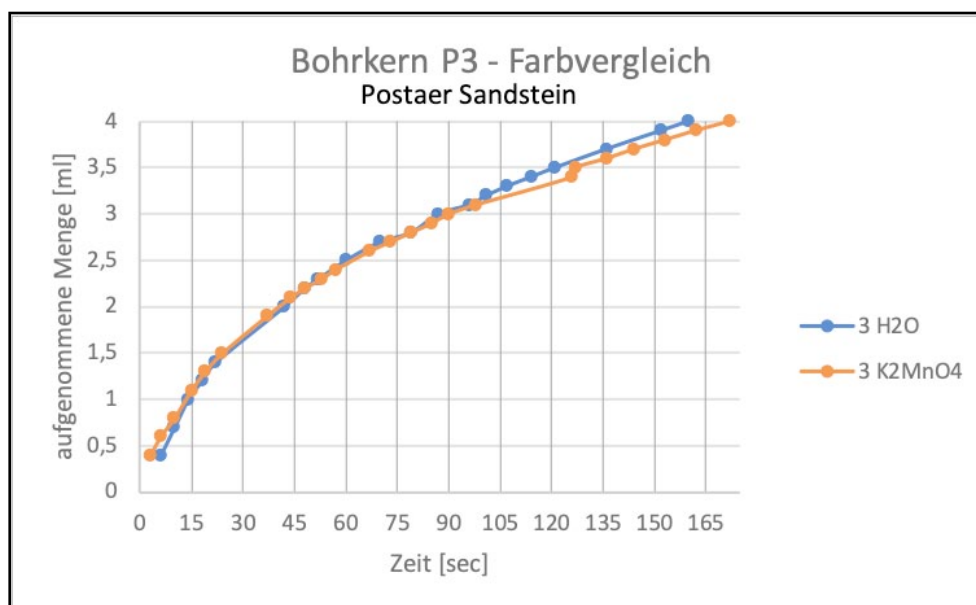


Abb. 17: Vergleich des Eindringverhaltens von Kaliumpermanganat und destilliertem Wasser in Abhängigkeit der Zeit (Postaer Sandstein)

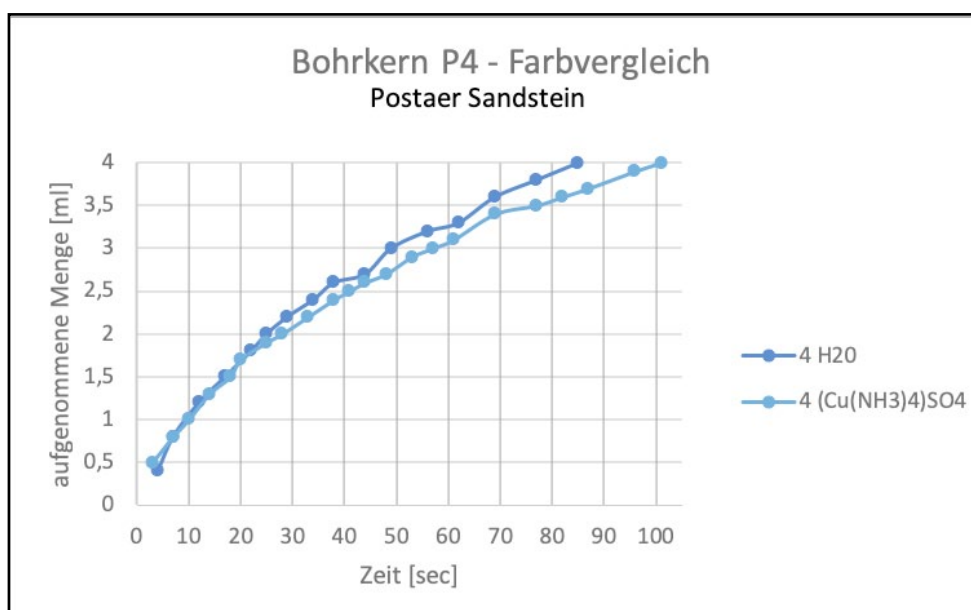


Abb. 18: Vergleich des Eindringverhaltens von Tetraamminkupfersulfat und destilliertem Wasser in Abhängigkeit der Zeit (Postaer Sandstein)

Der oben beschriebene Vergleichsversuch wurde daraufhin an zwei Bohrkernen aus Leistädter Sandstein (gezogen aus Probekörper LE1) wiederholt, um diesen Einfluss bei einem feineren Porengefüge zu überprüfen. Aufgrund der geringeren Höhe (7 cm) des Bohrkernes wurden nur zwei Milliliter anstelle von vier Millilitern Lösung angeboten.

Viel stärker als am Postaer Sandstein ist zu beobachten, dass beide Lösungen

eine langsamere Stoffmengenaufnahme als Wasser aufzeigen. Die bereits am Postaer Sandstein (siehe Abb. 17) abzulesende marginale Hemmung im Eindringverhalten der blauen Sulfat-Lösung bildet sich am Bohrkern des Leistädter Sandstein wesentlich stärker ab. Im Vergleich beider Gesteine ist die Abweichung der Kaliumpermanganatlösung jedoch zur Abweichung der Tetraamminkupfersulfatlösung gering (siehe Abb. 19 + 20).

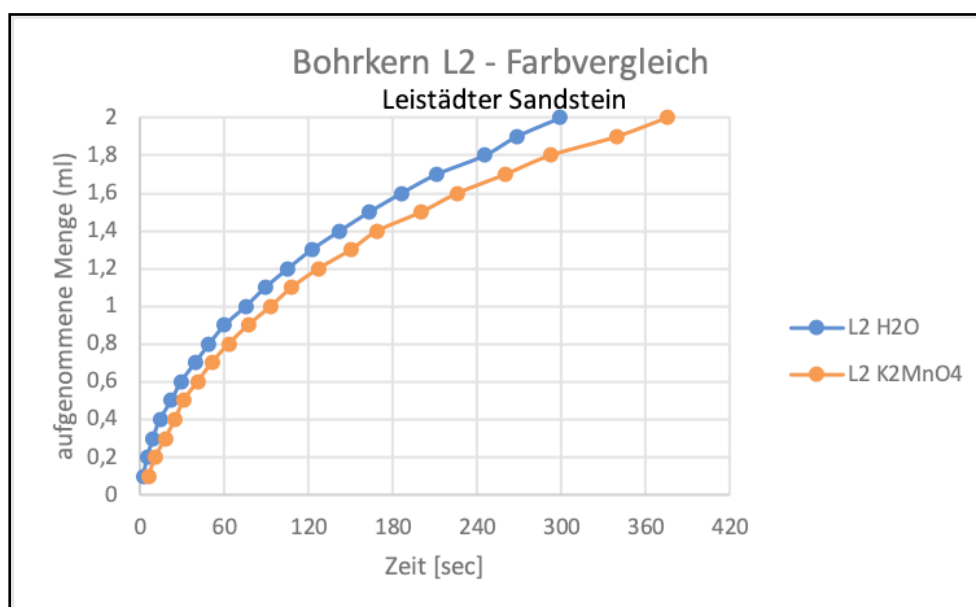


Abb. 19: Vergleich des Eindringverhaltens von Kaliumpermanganat und destilliertem Wasser in Abhängigkeit der Zeit (Leistädterer Sandstein)

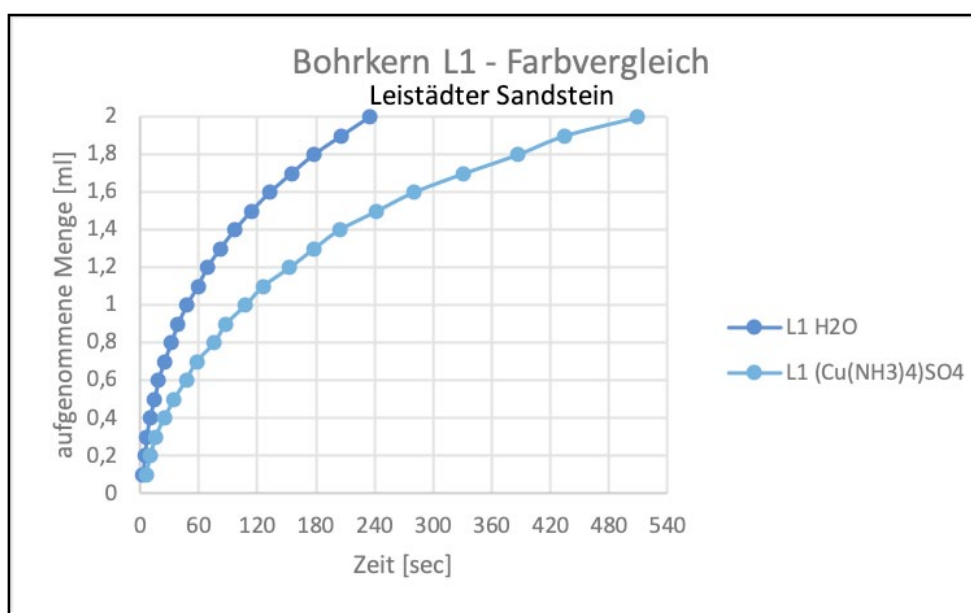


Abb. 20: Vergleich des Eindringverhaltens von Tetraamminkupfersulfat und destilliertem Wasser in Abhängigkeit der Zeit (Leistädterer Sandstein)

Außerdem kam es am blau eingefärbten Bohrkern des Leistädter Sandsteines zu

Chromatographieeffekten (siehe Anhang Abb. 56). An den mit Tetraamminkupfersulfat beprobten Bohrkernen zeigte sich nach der Trocknung ebenso eine Anreicherung des Farbstoffes an der Oberfläche wie an den mit Kaliumpermanganat angefärbten Bohrkernen (siehe Anhang Abb. 57). Das an den dünnen Probepfättchen zu beobachtende ganzheitliche Anfärben konnte nicht bestätigt werden.

Auf Grundlage dieses Ergebnisses wurde entschieden, Kaliumpermanganatlösung als Anfärbemittel für den Hauptversuch zur Visualisierung des Wasserkörpers zu verwenden. Um den hemmenden Einfluss für die beprobten Gesteine charakterisieren zu können, wurden die Karstenmessungen von Wasser und KMnO_4 -Lösung für den Hauptversuch stets graphisch gegenübergestellt (siehe Anhang Abb. 64 – 74).

4.5.4 Bestimmung der Dichte und Oberflächenspannung der Farblösung

Um die unterschiedlichen Eigenschaften von Kaliumpermanganatlösung und Wasser besser einordnen zu können, wurde die Dichte bestimmt. Darüber hinaus wurde die Oberflächenspannung der Lösung ansatzweise ermittelt. Beide Parameter beeinflussen maßgeblich den kapillaren Flüssigkeitstransport.

Dichtemessung der KMnO_4 -Lsg. (0,04 M)

Die Dichte der Lösung wurde durch Wägung im Pyknometer ermittelt. Das Ergebnis ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen Differenz der Masse des leeren und gefüllten Pyknometers sowie dem Volumen der Lösung.

Daraus ergibt sich eine Dichte der Kaliumpermanganatlösung von 1,0020614 g/ml (bei 19,5 °C). Die Dichte von destilliertem Wasser beträgt 0,998309 g/ml (bei 19,5 °C) (DICHTE TABELLE WASSER, INTERNETCHEMIE.INFO).

Die Dichte der Farblösung ist somit nur minimal höher als die Dichte von destilliertem Wasser. Somit übt die Dichte wahrscheinlich keinen großen Einfluss auf den Versuch aus.

Oberflächenspannung

Um die Oberflächenspannung zu ermitteln, wurde versucht, die Steighöhenmethode anzuwenden (VERSUCHSANLEITUNG, UNIVERSITÄT KARLSRUHE).

Hierzu wurden jeweils zwei Glaskapillaren (Innendurchmesser 1,4 mm, Länge 80 mm) senkrecht in destilliertes Wasser und Kaliumpermanganatlösung gehalten.

Durch die unterschiedliche Steighöhe kann theoretisch die Oberflächenspannung annähernd bestimmt werden.

$$\sigma = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot r \cdot h$$

ρ – Dichte der Flüssigkeit (s.o.)

g – Erdbeschleunigung (9,809 m/s²)

r – Radius der Kapillare (0,7 mm)

h – Steighöhe

Die ermittelte Oberflächenspannung der Lösung beträgt 61,92 mN/m bei 20 °C., die ermittelte Oberflächenspannung von Wasser 65,36 mN/m bei 20 °C.

Der Literaturwert ist hierfür 72,74 mN/m (OBERFLÄCHENSPIANNUNG, CHEMIE.DE).

Aufgrund der Ungenauigkeit der eigenen Messungen, kann der ermittelte Wert nur vergleichend gesehen werden. Die Steighöhe und somit die Oberflächenspannung der Farblösung ist geringer als die von Wasser. Daher ist davon auszugehen, dass die Oberflächenspannung mitunter das unterschiedliche Eindringverhalten beeinflusst.

4.6 Wahl der Trennmethode

Um die Ausbreitung des eingefärbten Wassers sichtbar zu machen, sollte der Probekörper tomographieartig aufgetrennt werden.

Bei der Wahl einer geeigneten Trennmethode standen folgende Auswahlkriterien fest:

- Arbeiten ohne Wasser, um den Farbstoff nicht wieder zu lösen
- geringer Temperaturanstieg, um die Lösung nicht verdampfen zu lassen
- möglichst schnelles Auftrennen, um ein genaues Abbild des Wasserkörpers zu erstellen
- möglichst viele „Schnitte“, um eine hohe Darstellungsauflösung des Wasserkörpers zu erreichen
- geringer Schneidverlust, um die Visualisierung so vollständig wie möglich wiederzugeben

4.6.1 Spalten als Trennmethode

Als eine schnelle Methode, ohne den störenden Einfluss von Wasser oder Hitze, scheint die Variante, den Probekörper zu spalten, als brauchbar. Zu den Nachteilen der Methode zählt die geringe Kontrollierbarkeit sowie die unterschiedliche Spaltbarkeit der verschiedenen Gesteinsarten. Der Mangel an Kontrolle hat zur Folge, dass relativ wenige Trenn-„schnitte“ entstehen und somit eine geringere Auflösung des Wasserkörpers erzielt werden kann. Die schnelle Durchführung dieser Trennmethode auch bei großen Probekörpern und der beinahe nicht vorhandene Materialverlust gaben Anlass, die im folgenden beschriebenen Versuche dennoch durchzuführen.

Die Oberfläche des Probekörpers wurde leicht mit einer Trennscheibe eingeschnitten um eine gerade Spaltung zu erzielen¹ und anschließend mit Schraubzwingen am Arbeitsbock vor Verrutschen gesichert. Beim Spalten wurde mit Spalteisen oder Sprengelisen gearbeitet. Verschiedene Einritz- bzw. Einschneidtiefen sowie

¹ Je nach Probekörpergröße wurde ein Winkelschleifer oder ein „Multitool“ mit kleiner Trennscheibe verwendet.

Arbeitsgeschwindigkeiten wurden getestet.

Das Spalten erwies sich jedoch bei schneller Arbeitsweise als zu unkontrollierbar und unsauber. Bei langsameren Arbeiten, bei dem der angeritzte Körper immer wieder gedreht, neu eingespannt und mit einem gezielten Schlag des Sprengseisens bearbeitet wurde, war die Trennfläche verhältnismäßig gerade. Der eigentliche Vorteil der Methode, die Durchführungsgeschwindigkeit, wird dabei jedoch aufgehoben.

Es wurden keine weiteren Versuche zur Optimierung dieser Methode vorgenommen, da sich die parallel dazu laufenden Sägeproben als vielversprechender erwiesen (siehe folgendes Kapitel).

Das Spalten wurde für die Formatierung der Probekörper ausgeschlossen.

4.6.2 Sägen als Trennmethode

Resultierend aus den Ergebnissen der Anfärbeversuche wurden die Sägeversuche im trockenen Schneidverfahren getestet. Für die trockene Trennmethode wurde mit einer Trennschleifmaschine WOCO 50P von Conrad (heute: UniPrec) gearbeitet. Als Zubehör standen ein Vorschubtisch, eine ‚Aufnahme mit Feineinstellung in 0,05 mm‘, mit darin befindlichem ‚Zweibacken-Schraubstock Vorderteil‘ zur Verfügung. Geschnitten wurde mit einer Trennscheibe mit glatter Diamantschneide (Durchmesser neu 200 mm). An der mit zwei Geschwindigkeiten ausgestatteten Säge wurde stets mit der langsameren Stufe (I) gesägt. Eine Staubabsaugung, die gleichzeitig als leichte Kühlung der Trennscheibe fungierte, wurde fest installiert (siehe Abb. 21 Hintergrund).

Durch diese, an der Fachhochschule Potsdam befindliche Trennschleifmaschine und deren begrenzten Aufnahmemöglichkeit resultierte die maximale Probengröße von 7 x 7 x 7 cm. Durch Höhenunterschiede des Vorschubtisches und des Arbeitstisches der Maschine, sowie der Begrenzung durch die Aufnahme (Abb. 21) musste der Sägevorgang in zwei Abschnitten durchgeführt werden. Hierbei wurden die Probekörper soweit wie in Abb. 21 eingeschnitten, die Gesteinsscheiben kontrolliert abgebrochen und der Probekörper neu in die Aufnahme eingespannt.



Abb. 21: Begrenzter Ausschub der Aufnahme aufgrund der Probekörperdimensionen

Nicht näher spezifizierbare Werksteine aus Cottaer und Postaer Sandstein ließen sich in vorhergehenden Sägeversuchen in relativ regelmäßige Scheiben von ca. 2 mm Dicke formatieren².

Durch das schon gebrauchte Sägeblatt war der Durchmesser der Trennscheibe etwas geringer als 200 mm, wodurch der 7 cm hohe Probekörper nicht komplett durchgeschnitten wurde und ein Steg, an dem die einzelnen Scheiben kontrolliert abgebrochen werden konnten, entstand. Durch diesen Steg waren die einzelnen Scheiben vor den Fliehkräften des Sägeblattes gesichert. Weiterhin erleichterte dies die Dokumentation der Schnitttiefen (siehe Abb. 22).

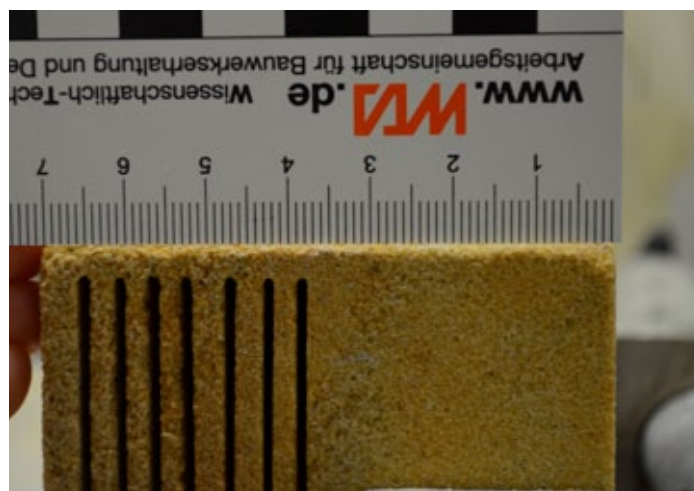


Abb. 22: Beispielfoto einer Bemaßung der Schnitttiefe

² Die Aufnahme der FHP entspricht nicht mehr der 0,05 mm Feineinstellung. Eine einheitliche Umrechnung der Umdrehungen auf Scheibendicke ergab sich nicht.

5. Analyse des visualisierten Durchfeuchtungskörpers

In allen Probesteinproben konnte der Wasserkörper erfolgreich mit Kaliumpermanganatlösung angefärbt werden.

Die Wasserkörper im Bucher Sandstein und Nürnberger Burgsandstein konnten tomographieartig abgebildet werden. Die Probekörper aus Leistädter und Sander Sandstein ließen sich mit der Trennschleifmaschine nicht bearbeiten, weswegen der Wasserkörper nur im Querschnitt abzulesen ist.

Das folgende Kapitel erläutert kurz die Durchführung der Trennmethode. Anschließend werden die erzeugten Abbilder des Durchfeuchtungskörpers zusammenfassend interpretiert und einzelne Beobachtungen näher beschrieben.

Abschluß dieses Kapitels bildet der Versuch, die erhaltenen Ergebnisse einer verallgemeinernden Geometrie zuzuschreiben.

5.1 Formatieren der Probekörper nach Eintrag des Kaliumpermanganats

Die Scheiben des *Bucher Sandstein* wurden bei dem Versuch, etwa 2 mm Dicke Scheiben zu schneiden, zu instabil und reagierten sensibler als die Körper aus den Vorversuchen auf das leicht schwingende Sägeblatt. Teilweise wurden die Scheiben beim Sägevorgang zerbrochen und durch die Fliehkräfte zerstört (siehe Anhang Abb. 193). Daher wurde die Scheibendicke erhöht. Diese liegt zwischen 2,5 - 3,5 mm.

Aufgrund der großen Korngrößen und der geringen Bindung des *Nürnberger Burgsandsteins* wurde direkt dickere Scheiben von 5 – 5,5 mm erstellt.

Bei den in der Versuchsreihe ausgewählten dichteren Gesteinen (*Leistädter Sandstein* und *Sander Sandstein*) wurde das Sägeblatt beim Sägevorgang z.T. blockiert und/oder zur Seite gedrückt. Ein kontrolliertes Sägen war daher nicht möglich. Auch ein Wechsel des Sägeblattes¹ brachte keinen Erfolg. Daraufhin wurde versucht, die Probekörper an einer baugleichen Säge im Fachlabor für Konservierungsfragen

¹ Die Reserveblätter waren von anderer Beschaffenheit und besaßen keine glatte, sondern eine geriffelte Schneide, die sich beim Sägen verkantete.

in der Denkmalpflege München, zu sägen, welche eine stufenlos einstellbare Geschwindigkeitsregelung und ein neueres Sägeblatt mit glatter Schneide besitzt. Auch diese Versuche waren nicht erfolgreich, weswegen im Fall dichter Gesteine von einer tomographieartigen Darstellung Abstand genommen werden musste. Die beiden Gesteinsarten wurden nur einmal mittig trocken mit einer Trenntischsäge geteilt. Auf diese Weise konnte die Ausbreitung des Durchfeuchtungskörper im Inneren ausgewertet werden.

Die Probekörper aus Bucher Sandstein und Burgsandstein wurden jeweils parallel zur Saugfläche (siehe Abb. 23), sowie zusätzlich orthogonal zu dieser (siehe Abb. 24) aufgeschnitten, um ein möglichst genaues Abbild zu gewinnen.

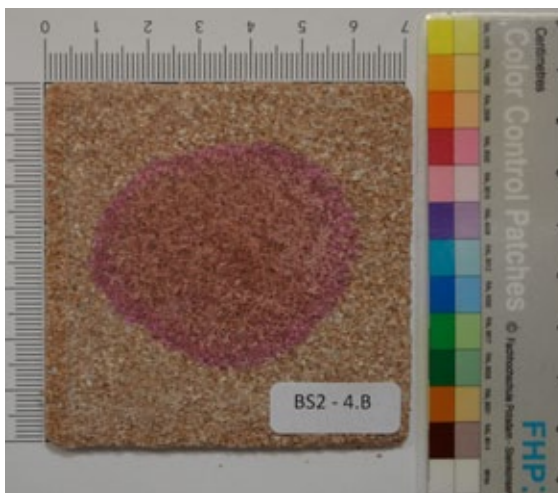


Abb. 23: Parallel zur Saugfläche (BS2 - 4.B)

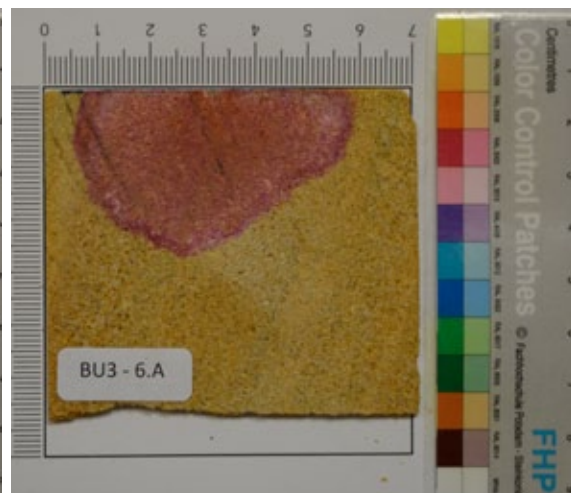


Abb. 24: Orthogonal zur Saugfläche (BU3 - 6.A)

Diese so erhaltenen Gesteinsscheiben wurden mit Klebeetiketten beschriftet und auf einer skalierten Foto-Unterlage dokumentiert. Diese Beschriftung erfolgte nach dem folgendem Schema: **XXn – q.Y**, wobei XXn dem Probekörper und q der fortlaufenden Nummerierung der Scheiben entspricht, während Y – die jeweilige Ansichtsseite A (Vorderseite) bzw. B (Rückseite) markiert.

Fehlende Scheibenummerierungen weisen auf den Verlust der Scheibe während des Sägevorgangs hin.

Nach Anfertigen des jeweiligen Fotos wurde die Form des Wasserkörpers mit Bleistift auf der Scheibe nachgezeichnet, um auch später trotz Verblässen des Farbstoffs die Informationen auf den Scheiben für spätere Betrachtungen zu erhalten.

Die ausgewerteten Fotos wurden entzerrt und teilweise bearbeitet, um den

Wasserkörper besser ablesen zu können (Sättigung, Kontrast, Helligkeit).

5.2 Auswertung

Zur besseren Vergleichbarkeit sollte in alle Probekörper vier Milliliter Lösung eingebracht werden. Jedoch durchbrach der Wasserkörper beim Bucher Sandstein die Seiten des Probekörpers (BU4), weshalb die Flüssigkeitsmenge bei den weiteren Probekörpern aus Bucher Sandstein auf zwei Milliliter halbiert wurde. In dem aus Leistädter Sandstein gefertigten Probekörper LE3 wurden vier Milliliter eingebracht. Aufgrund der oben beschriebenen Schwierigkeiten beim Auftrennen, konnte hier nur die Saugfläche an der Oberseite dokumentiert und in die Auswertung aufgenommen werden. Bei Probekörper LE4 wurde die Messung bei Aufnahme von drei Milliliter Lösung abgebrochen, da der Wasserkörper die Seiten zu durchbrechen drohte.

Den in Kapitel 4.5.3 aufgezeigten Unterschied des Eindringverhalten von Wasser und Kaliumpermanganatlösung, zeigte sich auch im Hauptversuch. Die Vergleichsgraphen hierzu finden sich im Anhang Abb. 64 bis 74.

Vergleich mit dem bisher angenommenen Ausbreitungsschema

Keiner der erhaltenen Wasserkörperquerschnitte entspricht der bisher angenommenen Ausbreitungsgeometrie aus Zylinder und Vierteltorus.

In den Fotos der Querschnitte wurde die, durch die Glasglocke des Karsten'schen Prüfrohrs begrenzte Saugfläche mit weißen Strichen in der oberen Skalierung markiert. Die oberen blauen Markierungen zeigen die Ausbreitung des Durchfeuchtungshofes an der Oberfläche. In der seitlichen Skalierung zeigt die blaue Markierung die Eindringtiefe an (siehe bspw. Abb. 25). Bei Annahme der messbaren Eindringtiefe als $x(t)$ hätten sich ausnahmslos alle Wasserkörper weiter lateral ausbreiten müssen.

Form des Durchfeuchtungskörpers im Querschnitt

Die Querschnitte entsprechen bei gleichmäßiger Ausbreitung der einer Halbellipse bzw. der Sonderform dieser, einem Halbkreis. Nahezu ideal ist dies an Probekörper SA3 (Abb. 25) zu erkennen.

Daher wurde zur vergleichenden Auswertung in allen Querschnitten zusätzlich eine weiße Markierung in Form eines Halbkreises eingefügt. Der Durchmesser wird durch die eingezeichnete Ausbreitung des Durchfeuchtungshofes bestimmt. Der graue Halbkreis, der in einigen Querschnitten eingefügt wurde, ist ein Duplikat des weißen Halbkreises. Jedoch ist der graue Halbkreis mittig zentriert und zeigt gegenüber dem weißen Halbkreis die Verschiebung des Wasserkörpers an.

Die eigentlich Durchfeuchtungszone wurde mit einer pinkfarbenen Kontur versehen. Die Differenz zwischen Halbkreis und Durchfeuchtungszone wurde schraffiert.

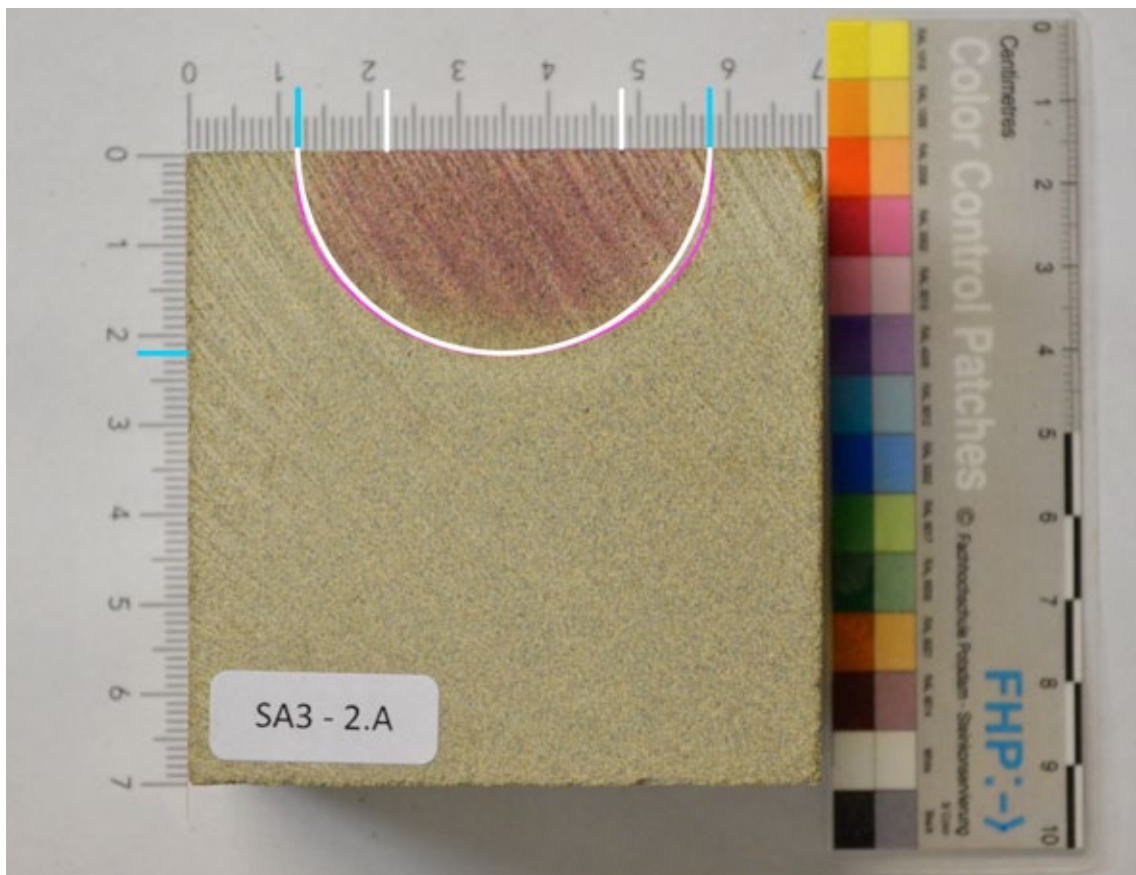


Abb. 25: SA3 - 2.A: Auswertung
blaue Markierung: Ausbreitung des Durchfeuchtungshofes bzw. Eindringtiefe;
weiße Markierung: Saugfläche Karsten

Diese Geometrie wird bei manchen Probekörpern durch Schichtungseinflüsse oder Effekte der Sickerströmung verzerrt. Beim Burgsandstein lässt sich eine Halbellipse mit senkrechter Ausbreitung (Abb. 26: BS5 – 6.A) ablesen. Ein ähnliches Bild zeigt sich am Querschnitt des Bucher Sandsteins (Probekörper BU2). Die hier entstandene Halbellipse ist durch eine schräg verlaufende Gesteinsschicht entsprechend verschoben (siehe Abb. 27: BU2 - 5.A).

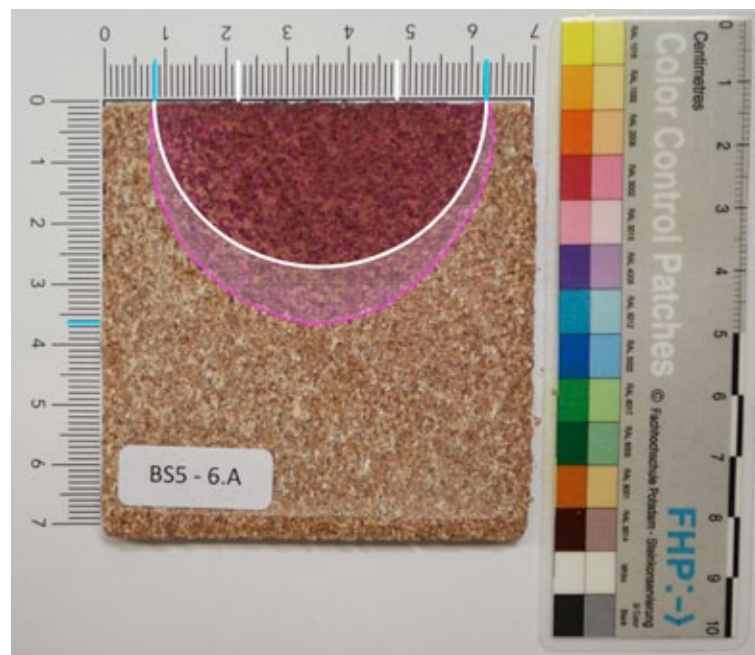


Abb. 26: BS5 - 6.A: Auswertung

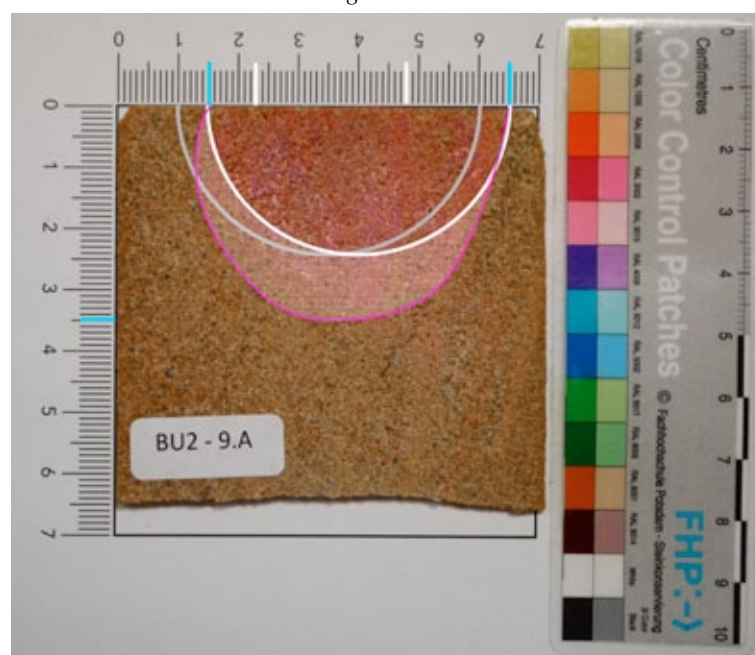


Abb. 27: BU2 - 5.A: Auswertung

Die Prüfkörper BU3 und BS1 breiten sich nahe der Saugfläche weitestgehend in Form eines Halbkreises aus, welcher in die gröbere Schichtung wie „auszulaufen“ scheint (Abb. 28 + 29). Die Flüssigkeit nimmt die leichtere Wegbarkeit durch den größeren Porenraum und bildet den Wasserkörper weiter in die Tiefe aus.

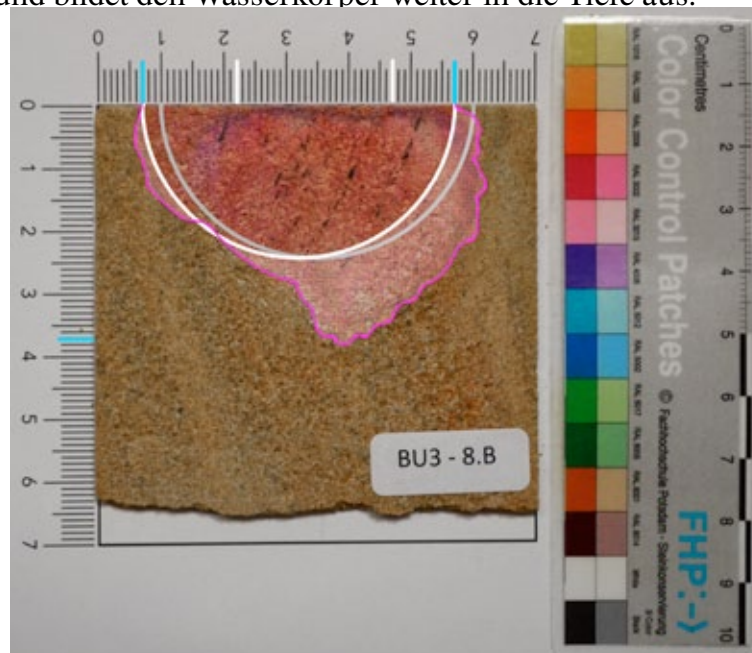


Abb. 28: BU3 - Auswertung

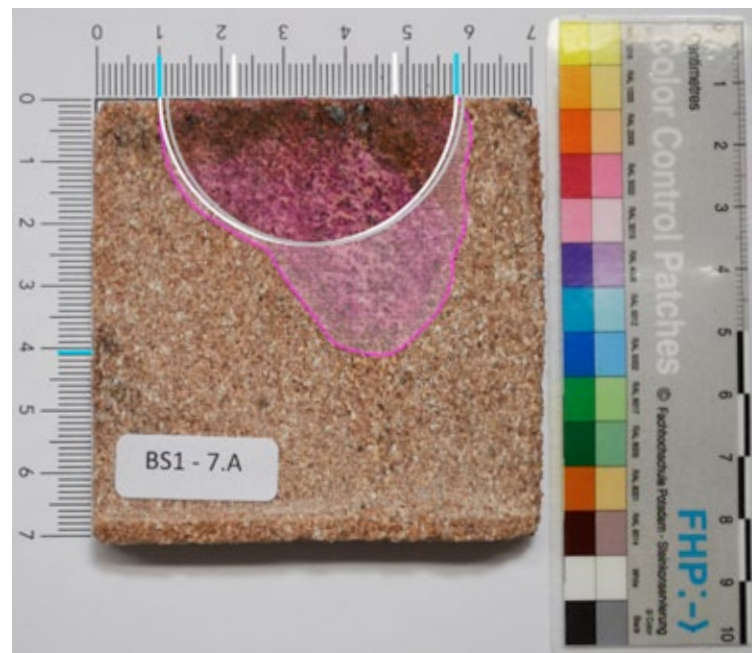


Abb. 29: BS1 - 7.A: Auswertung

Der Querschnitt des Wasserkörpers beim Leistädter Sandstein (LE5) lässt sich als pilzförmig beschreiben. Die Ausbreitung verläuft im Gegensatz zu den oben beschriebenen Gesteinen weniger in die Tiefe, sondern zeigt Ausbauchungen zur Seite auf (Abb. 30: LE4 – 1.B).

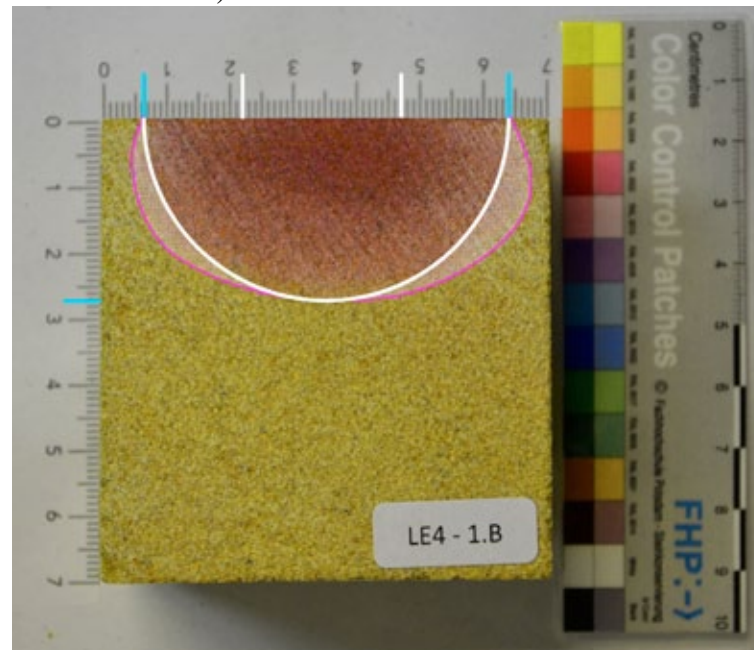


Abb. 30: LE4 - 1.B: Auswertung

Schichtungseinflüsse

Die im vorherigen Abschnitt schon erwähnten Einflüsse der Schichtung auf die Ausbreitung des Wasserkörpers lassen sich nicht nur innerhalb des Wasserkörpers, sondern auch bereits an der Probekörperoberfläche ablesen.

Die stärksten Schichtungseinflüsse zeigen sich beim Bucher Sandstein und beim Nürnberger Burgsandstein. Bei Probekörper BS1 breitet sich der Wasserkörper, wie schon im Querschnitt zu erkennen, in einer Hälfte gleichmäßig als Halbkreis aus (siehe Abb. 31, S. 44). Aber auf der gegenüberliegenden Hälfte breitet er sich wesentlich mehr in die Breite aus. Durch diesen Effekt überschreitet der Wasserkörper, trotz gleicher Flüssigkeitsmenge wie bei den anderen Probekörpern aus Burgsandstein, die Probekörpergeometrie.

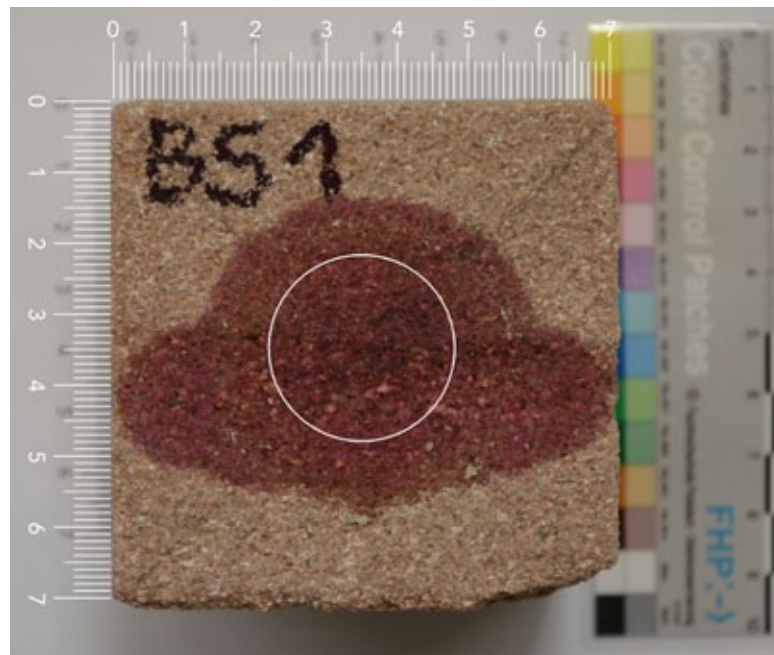


Abb. 31: BS1 - Oberfläche mit markierter Saugfläche

An der Oberfläche des Probekörpers BU1 zeigt sich eine ähnliche, schichtungsbedingte Abweichung eines Halbkreises (siehe Abb. 32). Man sieht eine deutlich stärkere Ausbreitung der Lösung innerhalb der schräg verlaufenden Schichtung. In Folge der oberflächennahen Vergrößerung des Durchfeuchtungskörpers innerhalb der Schichtung bildet sich im unteren Bereich ein kleines Kreissegment ab. Die Lösung nutzt den schnelleren Weg in das Gefüge über die zugänglichere Schicht, weshalb sich der Wasserkörper im Probekörper sehr unterschiedlich ausbreitet.

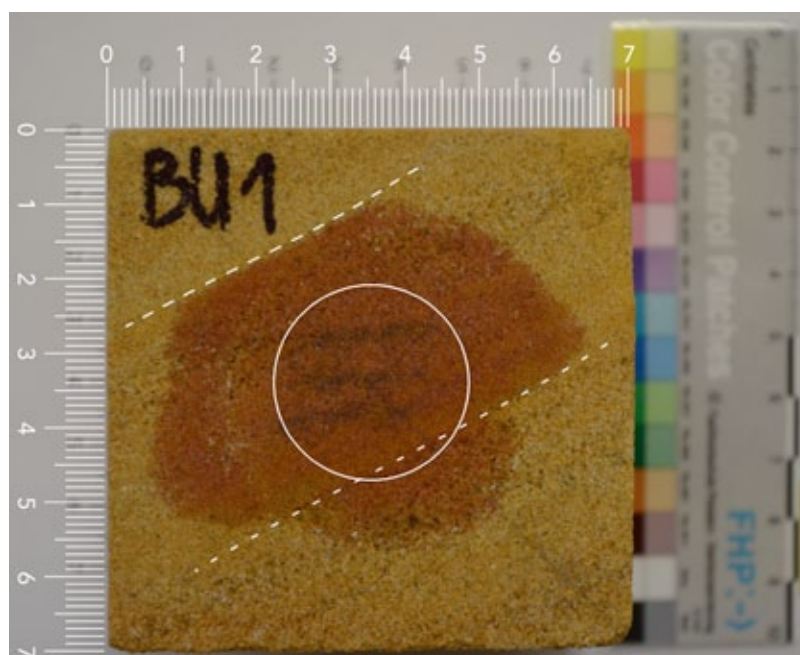


Abb. 32: BU1 - Oberfläche mit markierter Saugfläche und Schichtungsverlauf

Diese Beobachtung bestätigen die tiefer liegenden Parallelschnitte. In etwa 10 mm Tiefe ist das Kreissegment noch zu erkennen (Abb. 33), während bei weiterer Eindringtiefe das Kaliumpermanganat nur noch in der offenbar wegsameren Schichtung verteilt ist (Abb. 34).

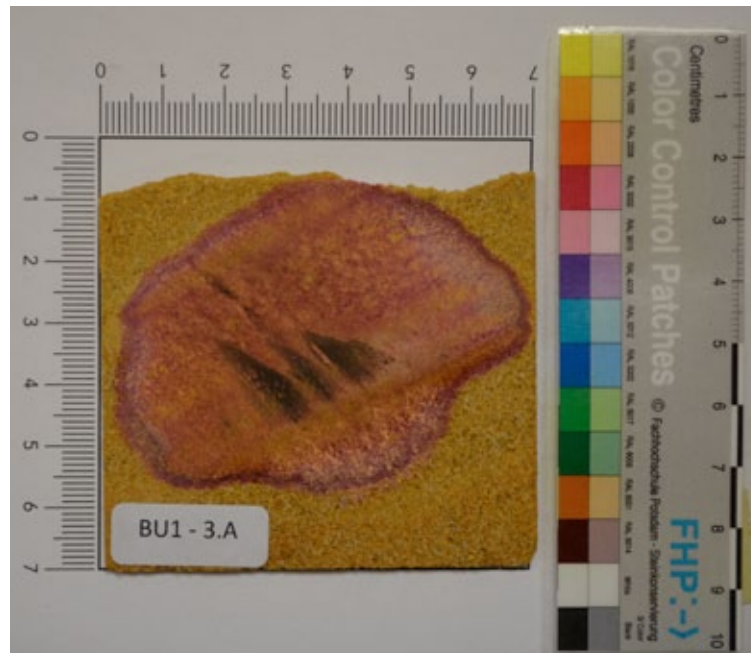


Abb. 33: Scheibe BU1 – 3.A (Tiefe ca. 10 mm)



Abb. 34: Scheibe BU1 – 5.A (Tiefe ca. 20 mm)

Die beim Querschnitt des Probekörpers BU2 beschriebene schräge Verschiebung (Abb. 27, S. 41) stellt sich ebenso an der Oberfläche dar (Abb. 35). Im Gegensatz zum Probekörper BU1 sind die Ränder nicht klar durch die Schichtung begrenzt. Der Wasserkörper wird aber mit der Schichtung gehend leicht verzerrt und bildet sich in Diagonalrichtung stärker aus.

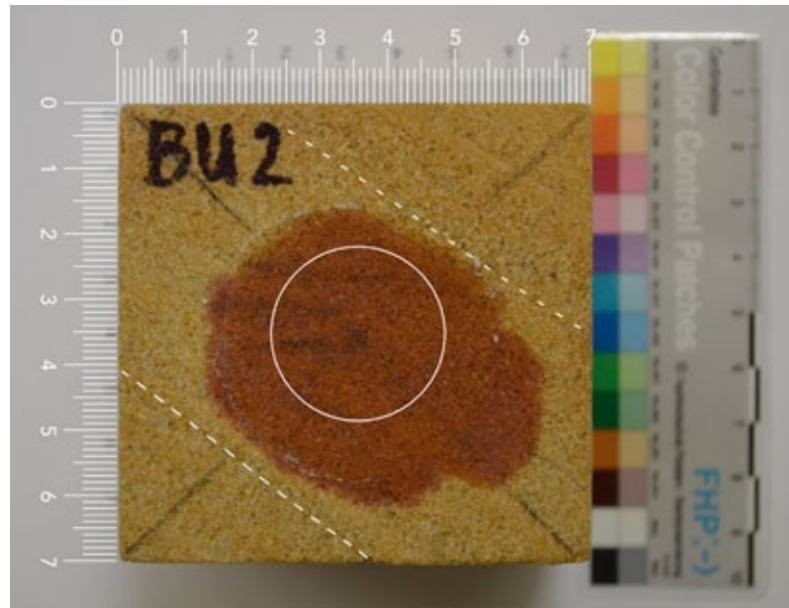


Abb. 35: Angefärbte Oberfläche des Probekörpers BU2 mit markierter Saugfläche und Schichtungsverlauf

Eine weitere mit der Schichtung verlaufende Ausbreitung des Durchfeuchtungskörpers zeigt sich an Probekörper BS5 (Abb. 36). Der Wasserkörper wird durch die Schichtung recht gleichmäßig in die Länge gezogen.

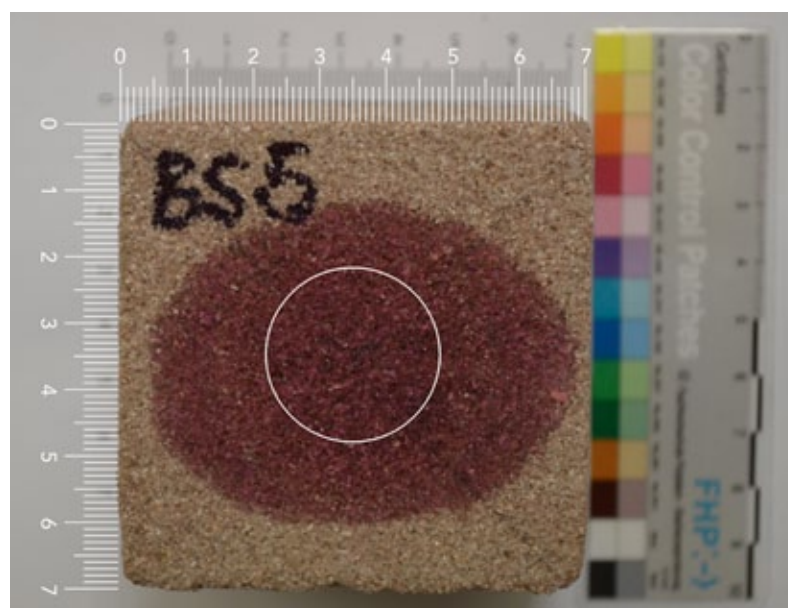


Abb. 36: Angefärbte Oberfläche des Probekörpers BS5 mit markierter Saugfläche

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei Leistädter Sandstein an Probekörper LE3. Auch hier zeigt die Durchfeuchtung eine breitere Ausdehnung parallel zur Schichtung (siehe Abb. 37).

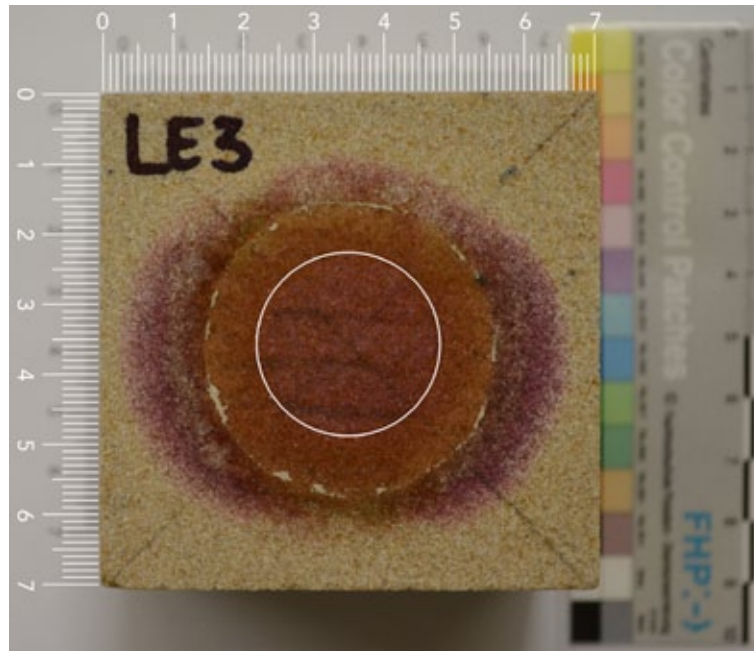


Abb. 37: Angefärbte Oberfläche des Probekörpers LE3 mit markierter Saugfläche

Der Durchfeuchtungshof bei Prüfkörper LE4 ist in die obere rechte Ecke verzerrt. Man sieht vereinzelt unter der Oberfläche angefärbte Porenräume (siehe Abb. 38), was sich mit der pilzförmigen Beobachtung im Querschnitt deckt.

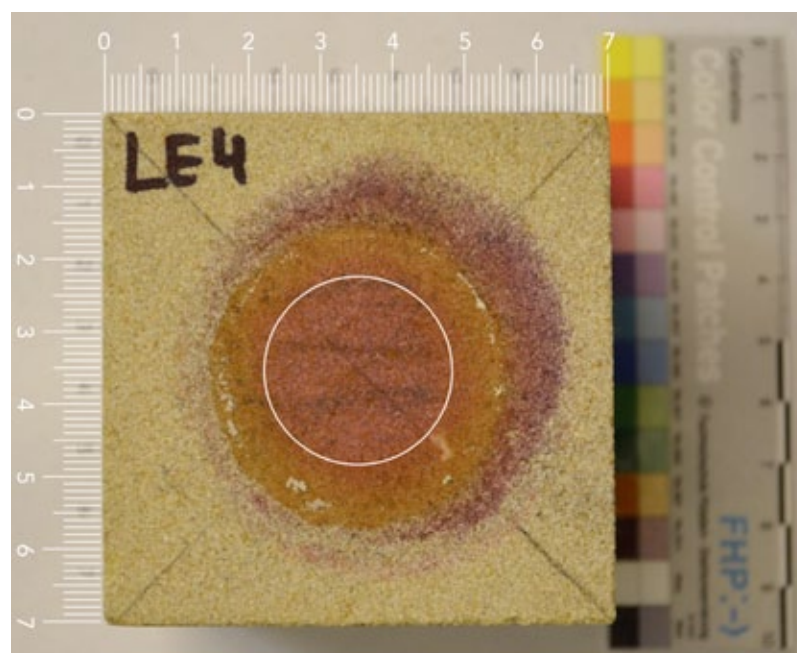


Abb. 38: Angefärbte Oberfläche des Probekörpers LE4 mit markierter Saugfläche

Der Sander Sandstein zeigt an beiden angefärbten Probekörpern einen eher geringen Einfluss der Schichtung. Der Durchfeuchtungskörper ist nur wenige Millimeter mit der Schichtung gehend verbreitert (siehe Abb. 39 + 40).

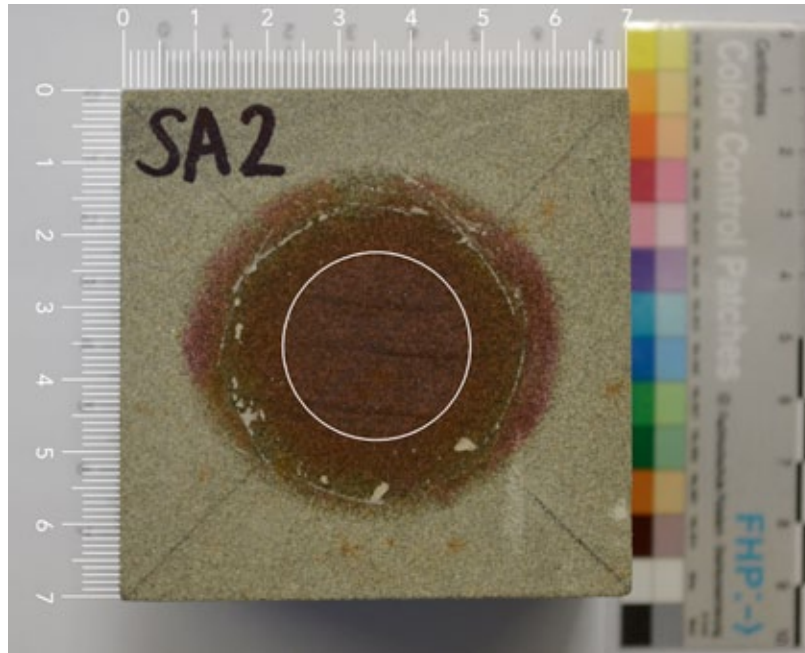


Abb. 39: Angefärbte Oberfläche des Probekörpers SA2 mit markierter Saugfläche

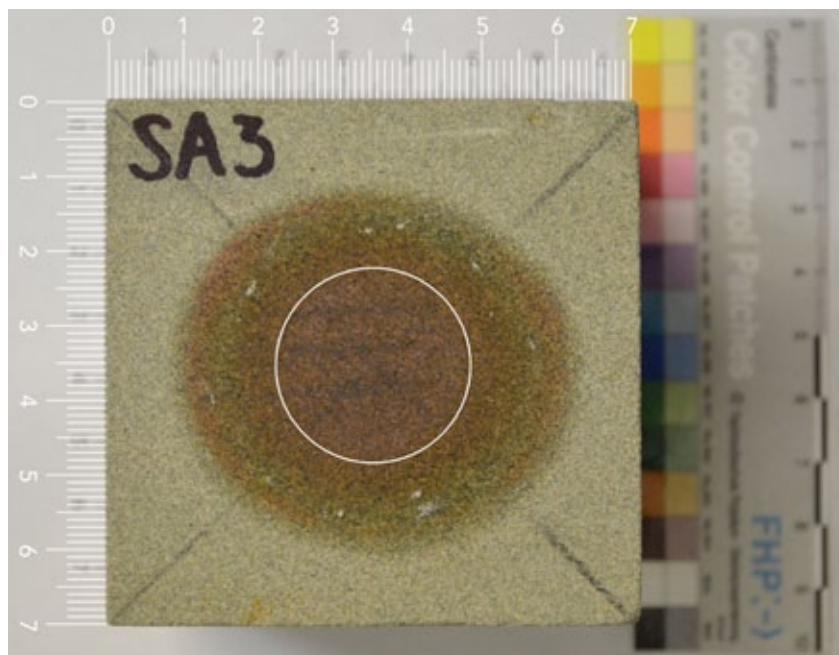


Abb. 40: Angefärbte Oberfläche des Probekörpers SA3 mit markierter Saugfläche

Nachsaugen

An den beiden schneller saugenden Gesteinen Bucher Sandstein und Nürnberger Burgsandstein konnten Nachsaugeneffekte beobachtet werden. Dieser Effekt beschreibt den weiteren Flüssigkeitstransport im Porengefüge, nachdem die Flüssigkeitszufuhr bereits unterbrochen wurde.

Die weitere Ausbreitung des Feuchtehorizonts lässt sich beispielsweise am Vergleich der Probekörperoberflächen direkt nach Abnahme des Karsten'schen Prüfröhrchen und nach dem ersten Sägen aufzeigen. Zur besseren Sichtbarkeit wurde die Ausbreitung des Durchfeuchtungshof vor dem Sägen mit einer pinkfarbenen Kontur markiert (siehe Abb. 41).

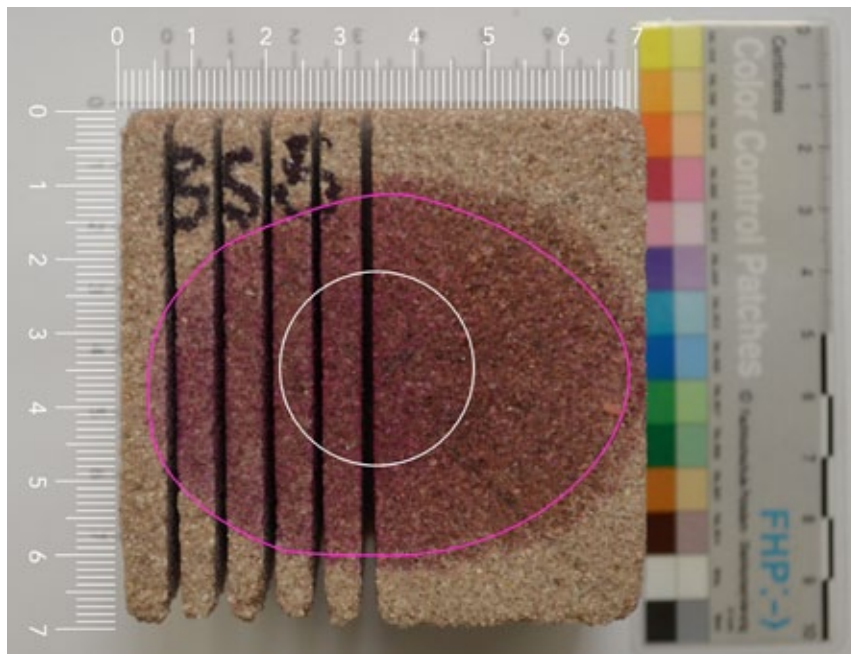


Abb. 41: Oberfläche des Probekörpers BS5 nach dem Sägen mit sichtbarem Nachsaugeneffekt

Man sieht gut, dass sich der angefärbte Bereich im schon gesägten Teil des Probekörpers in geringerem Maße weiter ausbreitet, da dieser bereits vom restlichen Wasserkörper getrennt wurde. Ein ähnliches Bild zeigt die eingeschnittene Oberfläche von Probekörper BU3 (siehe Anhang Abb. 130 + 131).

Auch an den formatierten Gesteinsscheiben konnte man den Effekt des Nachsaugens beobachten. Die Farblösung hatte sich nach etwa 20 bis 30 Minuten um mehrere Millimeter weiter von der Bleistiftmarkierung entfernt (siehe Anhang Abb. 58).

5.3 Berechnung eines idealen Grundkörpers auf der Basis eines Ellipsoids

Es konnte beobachtet werden, dass die sich bildenden Querschnittformen der Wasserausdehnung übergreifend als Halbellipsen beschrieben werden können. Durch unterschiedliche Einflüsse der Schichtung und des Porenraum wurde diese Grundform verändert bzw. verzerrt.

Um die Beobachtung der Halbellipse, beziehungsweise der Sonderform dieser, des Halbkreises, geometrisch fassen zu können, wurden verschiedene Ansätze verfolgt.

Zunächst zur Grundform eines Ellipsoids:

Die Volumenformel lautet $V_{\text{Ellipsoid}} = \frac{4}{3} \cdot \pi abc$

daraus folgt: $V_{\text{Halbellipsoid}} = \frac{2}{3} \cdot \pi abc$

wobei a, b und c der Ausdehnung der Halbachsen (x, y, z) entspricht.

Eine (Halb-)Kugel bildet sich, wenn alle Achsen gleich sind: $a=b=c$

Wenn zwei Halbachsen übereinstimmen, spricht man von einem (Halb-)Rotationsellipsoid: $a=b$ bzw. $b=c$ bzw. $a=c$

Für den Wasserkörper der Karsten-Messung gilt:

$a \geq$ Radius der Saugfläche

a - Ausdehnung in Richtung x (hier: $\frac{1}{2}$ Querschnittbreite an der Saugfläche)

b - Ausdehnung in Richtung y (hier: Eindringtiefe)

c - Ausdehnung in Richtung z (hier: $\frac{1}{2}$ Ausdehnung mit der Schichtung)

Im folgenden Abschnitt wurden die, an den Gesteinsscheiben messbaren, Ausdehnungsrichtungen in die Volumenformel eingesetzt. Mithilfe der in Kapitel 4.4.3 ermittelten Wasseraufnahmekapazität wurde ein theoretisch durchfeuchtetes Körpervolumen durch die eingebrachte Menge Lösung berechnet.

Die Wasseraufnahmekapazität des Sander Sandsteins entspricht 12,0 %.

Daraus folgt durch eine Dreisatzrechnung¹, dass 4 ml destilliertes Wasser 33,3 cm³ Stein durchfeuchten.

Am Probekörper gemessene Längen für a, b, c:

a - ca. 2,4 cm Radius Querschnitt

b - ca. 2,4 cm Eindringtiefe

c - ca. 2,65 cm Radius mit der Schichtung

$$V_{SA3} = 2/3 \cdot \pi abc \approx 32,0 \text{ cm}^3$$

Das am Probekörper SA3 messbare Durchfeuchtungsvolumen beträgt also 32,0 cm³, was sich beinahe mit dem, aus der WAK berechneten, Durchfeuchtungsvolumen von 33,3 cm³ deckt.

Da der Wasserkörper beim Prüfkörper BS5 eine gleichmäßige Form ausbildete wurde diese Rechnung wiederholt. Am Probekörper LE5, dessen Wasserkörper im Querschnitt eine Art Pilzform ausbildete, wurde eine Ellipse visuell an den Wasserkörper angenähert, um eine Rechengrundlage zu schaffen (siehe Anhang Abb. 59).

Bei beiden Probekörper decken sich das mithilfe der WAK ausgerechnete Durchfeuchtungsvolumen und das am Probekörper ermittelte Durchfeuchtungsvolumen nicht. Das Volumen ist beinahe doppelt so groß wie das zu erwartende Volumen.

$$V_{WAKBS} = 31,01 \text{ cm}^3$$

$$V_{BS5} = 59,9 \text{ cm}^3$$

$$V_{WAKLE} = 34,48 \text{ cm}^3$$

$$V_{LE5} = 52,8 \text{ cm}^3$$

1 12 ml H₂O durchfeuchten 100 cm³ Stein
1 ml H₂O durchfeuchtet 8,3 cm³ Stein
4 ml H₂O durchfeuchten 33,3 cm³ Stein

Über den Vergleich des theoretischen Wasserkörpervolumen und dem Volumen des sichtbaren Wasserkörpers hinaus wurden weitere Berechnungsversuche unternommen.

Es wurde versucht, eine Idealellipsoid festzulegen und dieses mathematisch auf den orthogonal geschnittenen Probekörper BS2 zu übertragen, um anschließend die entsprechenden Teilsegmente in ihrer Fläche zu berechnen.

Der Vergleich der berechneten Flächen zu den in der Realität dokumentierten Kreisflächen zeigt gewisse Übereinstimmungen. Dieser Versuch kann lediglich als ein erster Ansatz betrachtet werden, welcher noch genauer ausgearbeitet und verifiziert werden muss.

6. Zusätzliche Versuche und Beobachtungen

6.1 „Halbes Karsten“ nach Pfefferkorn

Nach der Idee von Prof. Dr.-Ing. Stephan Pfefferkorn (HTW Dresden, Mitglied der WTA-Arbeitsgruppe „Kapillare Wasseraufnahme“) wurde ein weiterer Versuchsaufbau entwickelt. In diesem wird einem Probekörper Wasser über die halbe Saugfläche eines Karsten’schen Prüfröhrchens an einer rechteckigen Kante angeboten. Somit soll der Querschnitt des Wasserkörpers zeitgleich mit dessen Bildung an der Seitenfläche des Probekörpers dokumentierbar sein. Ziel dieser Versuchsdurchführung ist es zu verifizieren, ob dieses Abbild dem Wasserkörper mit kreisrunder Saugfläche und vollständig umgebendem Material entspricht. Dazu werden die so erzeugten Ergebnisse mit dem aus dem Hauptversuch geschaffenen Abbild des Wasserkörperquerschnitts verglichen.

Versuchsaufbau

Nach ersten, oft instabilen oder undichten Versuchsaufbauten wurde eine Schablone aus Kunststoff (modulor® Acrylglas XT Platte transparent, farblos; Stärke 1,5 mm) hergestellt, die das Prüfröhrchen auf der Kante stabilisiert (Abb. 42).

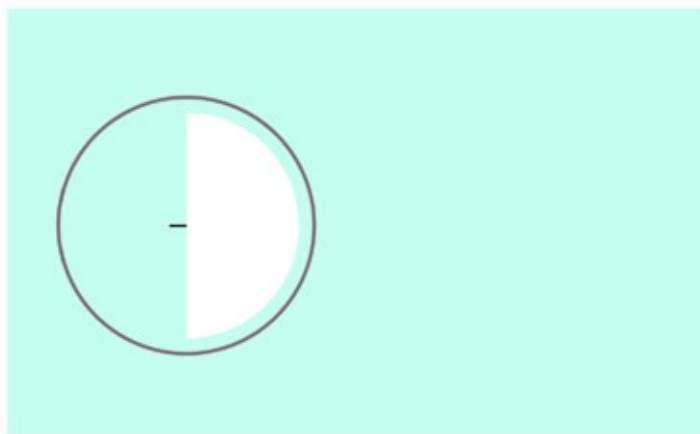


Abb. 42: Grundform der Schablone. Der eingezeichnete Kreis entspricht dem Aussendurchmesser der Glasglocke des Karsten-Röhrchens. Der Strich markiert den Mittelpunkt an der Schablonekante.

Die Schablone wird zunächst dünn (1-2 mm) mit einer möglichst gleichmäßigen Schicht plastic fermit® belegt und fest auf der Probekörperfläche angedrückt. Der

Ausschnitt der Schablone soll mittig und bündig zu der Probekörperkante ausgerichtet sein. Ein gleichmäßiges Andrücken lässt sich gut durch Wenden des Probekörpers auf die Schablonenfläche erzielen. Überstehende Ränder und der Überschuss in der Saugflächenaussparung werden mit einem Skalpell abgenommen und die Kittmasse mit einem kleinen Spatel angedrückt. An dem zwischen Seitenfläche und Schablone entstehenden Winkel wird zusätzlich abgedichtet. Um den Wasserkörper möglichst früh beobachten zu können, sollte dieser Bereich mit möglichst wenig Kitt verdeckt werden. Anschließend wird das Karsten'sche Prüfröhrchen wie gewohnt auf der Schablonenoberfläche angebracht. Durch Anpeilen der Mittelpunktmarkierung durch das Steigrohr ist ein mittiges Ausrichten möglich.

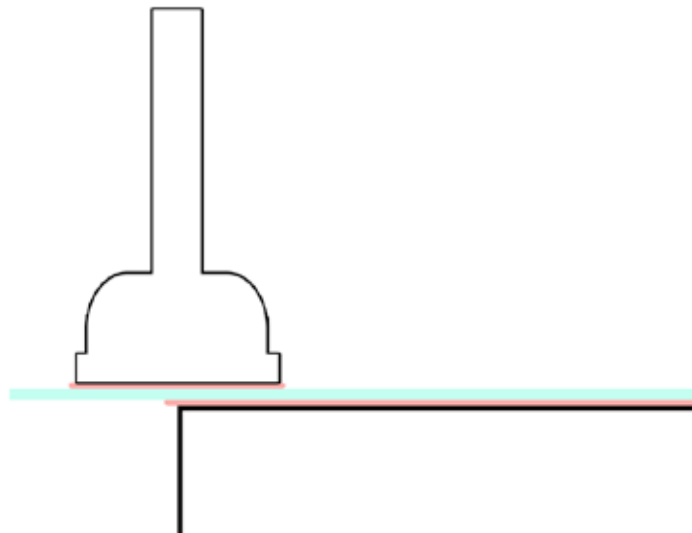


Abb. 43: Schema des Versuchsaufbaus.

Versuchsdurchführung

Das Prüfröhrchen wird zügig mit destilliertem Wasser gefüllt und die Seitenfläche des Probekörpers regelmäßig mit einer Kamera dokumentiert.

Je nach Saugeschwindigkeit wurden Intervallaufnahmen von 1 Sekunde (bspw. Postaer Sandstein) bis zu 5 Minuten (bspw. Sander Sandstein) gewählt. Da das Steigröhrchen hierbei mit aufgenommen wird, ist ein zusätzliches Dokumentieren der Wassermenge nicht nötig.

Auswertung

Die Fotos wurden mit den aus dem Hauptversuch erlangten Ergebnissen verglichen. Beim Sander Sandstein bildete sich im Laufe der Aufnahmen eine abgeflachte Halbellipse aus. Es wurde der Querschnitt des mit 4 ml Kaliumpermanganat angefärbten Durchfeuchtungskörper mit dem Durchfeuchtungskörper bei 2 ml mit halber Saugfläche verglichen. Während der Querschnitt aus dem Hauptversuch beinahe genau einen Halbkreis zeigt, bildet sich beim „halben Karsten“ exakt eine flache Halbellipse (siehe Abb. 44). Hier ist der Querschnitt aus dem Hauptversuch mit einer pinkfarbenen Linie eingezeichnet.

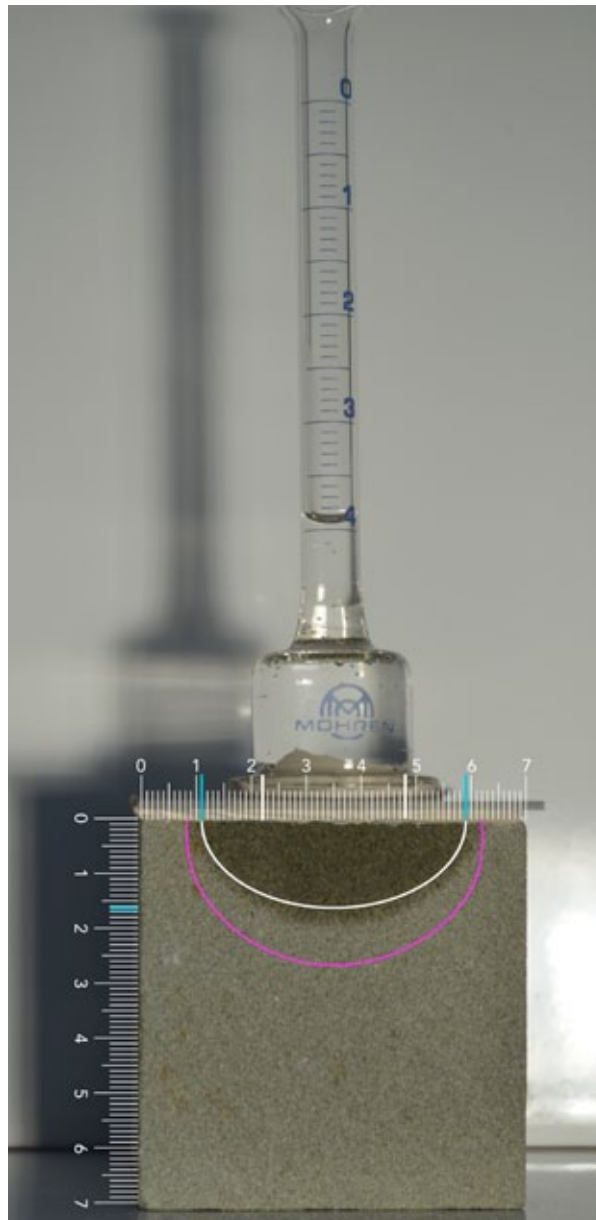


Abb. 44: Vergleich der Wasserkörper am Sander Sandstein

Für den Leistädter Sandstein wurde der Querschnitt des mit 3 ml Kaliumpermanganat angefärbten Durchfeuchtkörpers mit dem Durchfeuchtkörper bei 1,5 ml mit halber Saugfläche verglichen. Der „halbe“ Wasserkörper breitete sich, wie beim Sander Sandstein, kleiner als im Hauptversuch mit voller Saugfläche aus. Die Form entspricht einer recht exakten Halbellipse (Abb. 45).

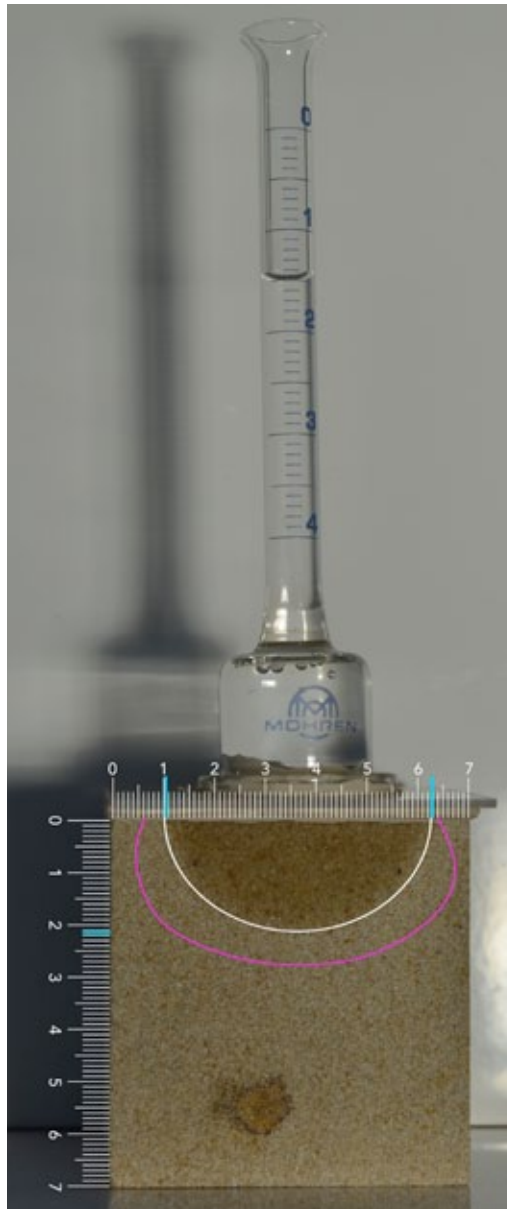


Abb. 45: Vergleich der Wasserkörper am Leistädter Sandstein

Aufgrund der unterschiedlichen Eindringgeschwindigkeit von Kaliumpermanganat und Wasser wurde die zeitliche Komponente vorerst nicht einbezogen.

Die mit diesem Versuch ermittelten Wasserkörperquerschnitte entsprechen nicht den Wasserkörpern bei voller Saugfläche und geschlossenem Probekörper.

Beide Abbilder zeigen aber, dass sich Form einer Halbellipse auch bei diesem Versuchsaufbau wiederholt ausbildet.

Da diese Methode nur als Nebenversuch angedacht war, bedarf es diverse Veränderungen, damit eine gesicherte Auswertung der Ergebnisse erfolgen kann.

Der größte Vorteil des Versuchs ist, dass er zerstörungsfrei und beliebig oft wiederholbar ist. Der Wasserkörper ist ohne Verzögerung abzulesen.

Diese Methode eignet sich jedoch bisher nicht für Gesteine mit größeren Poren. Versuche mit Burgsandstein waren trotz richtiger Abdichtung der Platte „undicht“, da das eingebrachte Wasser aus der grobporigen Seitenfläche austrat und die Seitenfläche hinabließ. Probekörper aus Postaer Sandstein zeigten dieses Problem teilweise auch. Die entstehenden Tröpfchen wurden hier wieder vom Stein durch dessen Kapillarkräfte aufgesogen, bevor sie herunterlaufen konnten. Das entstandene Abbild wird dadurch wahrscheinlich verfälscht.

Die Dichtigkeit des Versuchsaufbaus hat bei der Durchführung des Versuchs immer wieder zu Abbrüchen geführt. Der Winkel zwischen Schablone und Stein muss akribisch abgedichtet werden. Hier kam es wiederholt zu Lecks. Je dicker die Kittschicht zwischen Schablone und Probekörper, desto schwieriger war es, diese Stelle abzudichten. Dies liegt teilweise auch an der Flexibilität der Schablone und der Kittmasse. Diese Problemstelle könnte eventuell durch weniger flexibles Schablonenmaterial bspw. eine dünne Metallplatte und/oder eine andere Abdichtmasse gelöst werden. Das vollständige Bekleben der Schablonenfläche hat zwar zu einer erhöhten Stabilität und Dichtigkeit geführt, aber auch in einigen Fällen eine Kriechfläche für den Wassertransport gebildet. Hier bedarf es einer Änderung des Aufbringens des Karstenröhrchens.

Die verwendeten Leuchten erwärmten den Versuchsaufbau um mehrere Grad, wodurch es zumindest theoretisch zu erhöhter Verdunstung an der Seitenfläche kommen konnte.

6.2 Einfrieren des Wasserkörpers mittels Flüssigstickstoff

Bei der Ideenfindung für einen für diese Arbeit möglichen Versuchsaufbau kam die Idee, den Wasserkörper punktgenau zu einer bestimmten Zeit der Wasseraufnahme mit flüssigem Stickstoff einzufrieren.

Da dies in einem normalen Werkstein wenig Sinn ergibt, gab es die Überlegung, den Wasserkörper in einer verdichteten Sandschüttung mit Porensystem einzufrieren und diesen Eiskörper dann mit Einbezug der Ausdehnung von Wasser beim Gefrieren auszuwerten.

In einem kleinen Versuch wurde mit einem fett- und silikonfreiem Kältespray (Presto® Kälteschockspray) überprüft, ob ein schnelles Einfrieren eines Wasserkörpers grundsätzlich ohne Verlust aufgrund der Ausdehnung des Wassers möglich ist. Hierzu wurde einer leicht verdichteten Sandschüttung Wasser über eine runde Fläche angeboten und das Kältespray aufgesprüht. Der Sand-/Eiskörper ließ sich problemlos aus dem Sand nehmen und über einen relativ langen Zeitraum handhaben. Da diese Sandschüttung jedoch nicht mit einem Porensystem vergleichbar ist, stellte sich die Frage, wie man ein semistabiles Porensystem erstellt. Von Dipl.-Rest. Katja Schmeikal (FH Potsdam) kam der Vorschlag, einen Probekörper aus Steinersatzmörtel auf Kieselbasis mit verdünntem Bindemittelanteil herzustellen. Dieser Mörtel soll dabei zum einen ein mit Natursteinen vergleichbares Porensystem aufweisen. Zum anderen muss die Festigkeit so gewählt sein, dass eine Wasseraufnahme über eine kreisrunde Saugfläche möglich ist (stabile Oberfläche), aber der gefrorene Wasserkörper anschließend ohne großen Kraftaufwand und damit eventuell verbundenen Verluste des Abbilds aus dem Probekörper entnommen werden kann. Inwiefern dies möglich und sinnvoll ist, wurde im Rahmen dieser Bachelorthesis aus Zeitgründen nicht verfolgt.

7. Schlussbetrachtung

Vergleich zur Zielsetzung

Das Ziel, neue Aussagen zur Form des Wasserkörpers tätigen zu können, konnte im Ansatz erreicht werden.

Die bisher angenommene Wasserkörpergeometrie konnte bei keinem der untersuchten Stein nachgewiesen werden. Vielmehr bewegt sich diese zwischen gestauchter Halbkugel (Pilzform) über Halbkugel hin zum halben Ellipsoid.

Die Schichtung der untersuchten Gesteine beeinflusst den Feuchtetransport teilweise sehr stark. Die Angabe eines Wassereindringkoeffizienten kann hier nur abschätzungsweise Sinn ergeben.

Grundsätzlich gibt die Tomographiemethode verwertbare Ergebnisse aus. Bei homogenen Gesteinen reicht wahrscheinlich mittiges bzw. kreuzweises Aufsägen, da sich der Wasserkörper in diesen recht regelmäßig ausbildet. Bei Gesteinsarten, die genesebedingt eine inhomogene Schichtung aufweisen, kann durch den Tomographieschnitt der Einfluss dieser besser nachvollzogen werden. Allerdings sind diese Schnitte aufgrund der technischen Grenzen der vorgestellten Trenntechnik nicht immer möglich.

An dieser Grenze setzt das „Halbe Karsten“ an. Wenn diese Methode weiter verfolgt wird und verlässliche Ergebnisse liefern kann, könnten dichte bzw. härtere Gesteine einfach ohne Einsatz einer Säge untersucht werden.

Ausblick

Um die ideale Form des Wasserkörpers genauer fassen und verallgemeinern zu können, sind weitere Versuche an homogenen Gesteinen geplant. Die bisher empirisch erlangten Aussagen müssen durch eine weit gefasste Probenreihe statistisch abgesichert werden. Nur so ist es möglich, eine allgemeingültige Form der Ausbreitungsgeometrie zu finden, die im Idealfall Gesteinsklassen übergreifend angewandt werden kann.

Theoretisch wären auch größere Probekörper mit mehr Flüssigkeitsvolumen und/oder Karstenröhrchen mit größerer Saugfläche möglich.

Um den erwähnten Einfluss der Sickerströmung in Bezug zur Wasserkörperausdehnung insbesondere bei grobporigen Gesteinen zu untersuchen, sollte diese in einem entsprechenden Versuchsaufbau weitestgehend minimiert werden. Dies könnte beispielsweise durch Wasseraufnahme entgegen der Schwerkraft über eine runde Saugfläche geschehen.

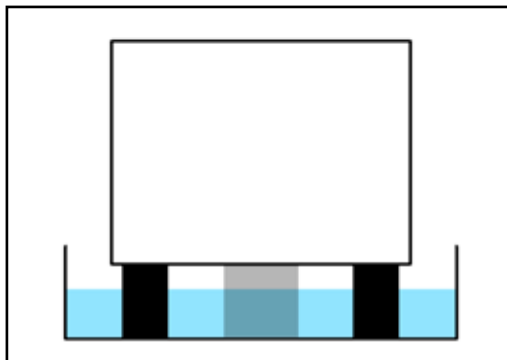


Abb. 46: Vorschlag Versuchsaufbau: Probekörper (weiß) auf Abstandshaltern (schwarz) mit kapillaraktivem Schwämmchen (grau) in mit Wasser (blau) gefüllter Wanne.

Der an Bucher Sandstein und Burgsandstein zu beobachtende Nachsaugeffekt muss besser eingeordnet werden. Hierzu soll eine geeignete Untersuchungsmethode gefunden werden, mit der dieser Effekt statistisch erfasst und abgeschätzt werden kann.

Fehlerbesprechung

Das Nachsaugen der Gesteine ist zwar dokumentiert, jedoch noch nicht eingeordnet. Die zeitliche Komponente der Karsten-Messung ist bisher noch zu einem großen Teil unbeachtet geblieben. Dies sollte ursprünglich in einem leicht abgewandelten Versuchsaufbau intensiver berücksichtigt werden. Die Verwendung eines Karstenröhrchen mit waagrechter Saugfläche wurde für diese Version des Hauptversuchs benötigt.

Im derzeitigen Versuchsaufbau hätte auch ein Prüfröhrchen mit senkrechter Saugfläche Verwendung finden können. Dies hätte einen engeren Bezug zur Praxis gehabt, da die Messung an senkrechten Flächen häufiger durchgeführt wird als an waagerechten Flächen und der Einfluss der Sickerströmung geringer ausgefallen

wäre. Aufgrund der zeitlichen Begrenzung der Arbeit und der späten Änderung des Hauptversuches, konnten die Messungen, die analog zum Hauptversuch mit waagerechter Saugfläche durchgeführt wurden, nicht wiederholt werden.

Das frühzeitiges Erproben der Sägeeigenschaften aller Probegesteine hätte einen großen Zeitvorteil bedeutet. Eventuell hätten Alternativen zu Sander Sandstein und Leistädter Sandstein gefunden werden können, bei denen eine tomographieartige Auswertung durchgeführt werden könnte. Oder man hätte frühzeitig auf eine andere Trenntechnik gesetzt und alle Probekörper auswerten können, was aus Zeitgründen nicht mehr möglich war.

Die zum seitlichen Abdichten verwendete Folie Parafilm M® zeigt unterschiedlich gut Anbindung an den Probekörper und bildet dadurch eine weitere Fläche für den Wassertransport. Inwiefern dies die ermittelten Werte beeinflusst, bleibt unklar.

Literaturverzeichnis

D'HAM, G.; MEINHARDT, J.; NIEMEYER, R. (2010): Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme mit Messröhrchen nach Karsten und Mirowski; in: Auras, M.; Meinhardt, J.; Snethlage, R. (Hrsg.): Leitfaden Naturstein-Monitoring; Stuttgart, S. 82 – 92.

DIN EN ISO 15148:2016-12, Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen, (ISO 15148:2002 + Amd 1:2016).

GERTIS, K.; WERNER, H. (1976): Die Problematik der Porenanalyse von Baustoffen – Kritische Ansätze zur hygrischen Interpretation des Porengefüges; in: Gertis, K.; Kießl, K.; Werner, H.; Wolfseher, U.: Hygrische Transportphänomene in Baustoffen, Berlin.

GRIMM, W.-D. (2018): Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland, Ulm.

HAINDL, K.; SCHÖNER, T.; ZIRKELBACH, D.; FITZ, C. (2016): Was ist bei Karsten & Co. zu beachten?; in: Bautenschutz + Bausanierung 3/2016, S. 33 – 37.

HALL C.; HOFF W.D. (2002): Water Transport in Brick Stone and Concrete, London.

HOMANN, M. (2012): II Feuchteschutz; in: Willems, W.M. (Hrsg.): Lehrbuch der Bauphysik, Wiesbaden, S. 155 – 304.

LEGRUM, J. (1991): Der Einfluss wasserlöslicher Salze auf die physikalischen Eigenschaften von Sandsteinen und ihre Verwitterungserscheinungen an Bauwerken, Dissertation der Universität des Saarlandes, Saarbrücken.

MENG, B. (1993): Charakterisierung der Porenstruktur im Hinblick auf die Interpretation von Feuchtetransportvorgängen: Analyse der Zusammenhänge zwischen Porenstruktur und Feuchtehaushalt am Beispiel von Sandstein, Aachen.

NIEMEYER, R. (2013): Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme mit dem Prüfröhrchen nach Karsten, Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege, unveröffentlicht.

RÖTGER, K. (2007): Salzreduktion in Situ - vergleichende Untersuchung Kompressenmethode/ Salzreduktion mit Hilfe eines angelegten Unterdruckes am Beispiel des Nürnberger Burgsandsteins, Diplomarbeit FH Potsdam.

SCHUBERT, H. (1982): Kapillarität in porösen Feststoffsystemen, Berlin, Heidelberg, New York.

SCHWARZ, B. (1972): Die kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen; in: Gesundheits-Ingenieur, 93. Jahrgang 1972, Heft 7, S. 206 – 211.

SNETHLAGE, R.; PFANNER, M. (2013): Leitfaden Steinkonservierung, Stuttgart.

STELZMANN, M.; MÖLLER, U. (2016): Beregnen bringen Segen - Beregnungsverfahren zur Beurteilung der Wasseraufnahme von Fassaden; in: Bauen im Bestand 39, S. 38 – 41.

STELZMANN, M. (2019): Praxisleitfaden Schlagregenschutz von Fassaden, 10.13140/RG.2.2.28116.45441/1.

TERHEIDEN, K. (2007): Feuchte- und Salztransport - Charakterisierung der Interaktion zwischen Porenfluid und porösem Baustoff, Dissertation der Bauhaus-Universität Weimar, Göttingen.

VANDEVOORDE, D.; CNUUDE, V.; DEWANCKELE, J.; BRABANT, L.; DE BOUW, M.; MEYNEN, V.; VERHAEVEN, E. (2012): Validation of in situ applicable measuring techniques for analysis of the water adsorption by stone; in: Procedia Chemistry 8 (2013), S. 317 – 327.

WEHLE, B.; GARGIGLIO, F. (2015): Wasseraufnahmekoeffizienten historischer Aussenputze – Wasseraufnahmekoeffizienten der Aussenputze historischer Gebäude der Bauperiode 1850-1920, Forschungsbericht, Berner Fachhochschule, Bern.

WENDLER, E.; SNETHLAGE, R. (1989): Der Wassereindringprüfer nach Karsten - Anwendung und Interpretation der Messwerte; in: Bautenschutz + Bausanierung 12/1989, S. 110 – 115.

WENDLER, E. (2016): Physikalische Eigenschaften vulkanischer Tuffe im Hinblick auf deren Konservierbarkeit, Poster zur 11. Arbeitstagung „Steine in der Stadt“. Mendig/Eifel, 7.–10. April 2016.

Internetquellen

BAMBERGER NATURSTEINWERK (2017): Leistädter Sandstein - Beschreibung des Natursteins.

https://www.bamberger-natursteinwerk.de/fileadmin/user_upload/Steine/LeistaedterSandsteingelb/LeistaLeis_Sandstein_Beschreibung.pdf

zuletzt abgerufen am: 05.01.2019 – 13:05.

KALIUMPERMANGANAT, CHEMIE.DE

<http://www.chemie.de/lexikon/Kaliumpermanganat.html>

zuletzt abgerufen am: 19.11.2018 – 18:38.

TETRAAMMINKUPFERSULFAT, WIKIPEDIA.ORG

<https://de.wikipedia.org/wiki/Tetraamminkupfersulfat>

zuletzt abgerufen am: 19.01.2019 – 17:31.

DICHTETABELLE WASSER, INTERNETCHEMIE.INFO

<https://www.internetchemie.info/chemie-lexikon/daten/w/wasser-dichtetabelle.php>

zuletzt abgerufen am: 12.01.2019 - 13:35.

VERSUCHSANLEITUNG, UNIVERSITÄT KARLSRUHE

<http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~simonis/praktikum/p-nebenfach/versuchsanleitungen/v11-Oberflaechenspannung.pdf>

zuletzt abgerufen am: 12.01.2019 - 13:34.

OBERFLÄCHENSPANNUNG, CHEMIE.DE

<http://www.chemie.de/lexikon/Oberfl%C3%A4chenspannung.html>

zuletzt abgerufen am: 20.01.2019 - 20:26.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Kräftegleichgewicht an der gemeinsamen Kante von Feststoff, Flüssigkeit und Gas .4	
Abb. 2: Größenbereiche der für die verschiedenen Transportphänomene relevante Porengrößen.....6	6
Abb. 3: Ein in den Versuchen verwendetes Prüfröhrchen der Firma Mohren..... 9	9
Abb. 4: Ausschnitt des Auswerteprogramms Calkarow 3.22..... 10	10
Abb. 5: Schematische Darstellung des beim Karsten-Röhrchen durchfeuchteten Gesteinsvolumens, $x(t)$: zeitabhängige Eindringtiefe bei kapillarem Wassertransport, r : Radius des zylindrischen Zentralteils der Durchfeuchtungszone. 11	11
Abb. 6: Mit Plastic-fermit® befestigtes Kunststoffröhrchen auf Cottaer Sandstein, darin KMnO ₄ -Lösung..... 14	14
Abb. 7: Beispiel für einen Probekörper (SA1) 15	15
Abb. 8: Graphen der Wasseraufnahme mittels Karsten'schem Prüfröhrchen an Bucher Sandstein 18	18
Abb. 9: Graphen der Wasseraufnahme mittels Karsten'schem Prüfröhrchen an Nürnberger Burgsandstein 19	19
Abb. 10: Graphen der Wasseraufnahme mittels Karsten'schem Prüfröhrchen an Leistädter Sandstein 20	20
Abb. 11: Wasseraufnahme mittels Karsten'schem Prüfröhrchen an Leistädter Sandstein, Verlauf LE4 20	20
Abb. 12: Graphen der Wasseraufnahme mittels Karsten'schem Prüfröhrchen an Sander Sandstein 21	21
Abb. 13: Karstenröhrchen mit senkrechter Saugfläche an eingespanntem Bohrkern..... 24	24
Abb. 14: Wasseraufnahme am Bohrkern P1 (Postaer Sandstein)..... 25	25
Abb. 15: Wasseraufnahme in Anlehnung an DIN EN ISO 15148 (Bohrkern P1)..... 25	25
Abb. 16: Angefärbte Durchfeuchtungshorizonte aus den Vorversuchen (Postaer Sandstein). 28	28
Abb. 17: Vergleich des Eindringverhaltens von Kaliumpermanganat und destilliertem Wasser in Abhängigkeit der Zeit (Postaer Sandstein) 30	30
Abb. 18: Vergleich des Eindringverhaltens von Tetraamminkupfersulfat und destilliertem Wasser in Abhängigkeit der Zeit (Postaer Sandstein) 30	30
Abb. 19: Vergleich des Eindringverhaltens von Kaliumpermanganat und destilliertem Wasser in Abhängigkeit der Zeit (Leistädterer Sandstein) 31	31
Abb. 20: Vergleich des Eindringverhaltens von Tetraamminkupfersulfat und destilliertem Wasser in Abhängigkeit der Zeit (Leistädterer Sandstein) 31	31
Abb. 21: Begrenzter Ausschub der Aufnahme aufgrund der Probekörperdimensionen ... 36	36
Abb. 22: Beispielfoto einer Bemessung der Schnitttiefe..... 36	36
Abb. 23: Parallel zur Saugfläche (BS2 - 4.B) 38	38
Abb. 24: Orthogonal zur Saugfläche (BU3 - 6.A) 38	38
Abb. 25: SA3 - 2.A: Auswertung 40	40
Abb. 26: BS5 - 6.A: Auswertung..... 41	41
Abb. 27: BU2 - 5.A: Auswertung..... 41	41
Abb. 28: BU3 - Auswertung 42	42
Abb. 29: BS1 - 7.A: Auswertung..... 42	42
Abb. 30: LE4 - 1.B: Auswertung..... 43	43
Abb. 31: BS1 - Oberfläche mit markierter Saugfläche 44	44
Abb. 32: BU1 - Oberfläche mit markierter Saugfläche und Schichtungsverlauf 44	44
Abb. 33: Scheibe BU1 – 3.A (Tiefe ca. 10 mm) 45	45
Abb. 34: Scheibe BU1 – 5.A (Tiefe ca. 20 mm) 45	45
Abb. 35: Angefärbte Oberfläche des Probekörpers BU2 mit markierter Saugfläche und Schichtungsverlauf 46	46

Abb. 36: Angefärbte Oberfläche des Probekörpers BS5 mit markierter Saugfläche.....	46
Abb. 37: Angefärbte Oberfläche des Probekörpers LE3 mit markierter Saugfläche.....	47
Abb. 38: Angefärbte Oberfläche des Probekörpers LE4 mit markierter Saugfläche.....	47
Abb. 39: Angefärbte Oberfläche des Probekörpers SA2 mit markierter Saugfläche.....	48
Abb. 40: Angefärbte Oberfläche des Probekörpers SA2 mit markierter Saugfläche.....	48
Abb. 41: Oberfläche des Probekörpers BS5 nach dem Sägen mit sichtbarem Nachsaugeffekt	49
Abb. 42: Grundform der Schablone. Der eingezeichnete Kreis entspricht dem Aussendurchmesser der Glasglocke des Karsten-Röhrchens. der Strich markiert den Mittelpunkt.....	53
Abb. 43: Schema des Versuchsaufbaus.....	54
Abb. 44: Vergleich der Wasserkörper am Sander Sandsein.....	55
Abb. 45: Vergleich der Wasserkörper am Leistädter Sandsein.....	56
Abb. 46: Vorschlag Versuchsaufbau: Probekörper (weiß) auf Abstandshaltern (schwarz) mit kapillaraktivem Schwämmchen (grau) in mit Wasser (blau) gefüllter Wanne.....	60
Abb. 47: Durch Schichtung abgegrenzter trockener Teilbereich an Bohrkern P3	III-2
Abb. 48: Wasseraufnahme an Bohrkern P3	III-2
Abb. 49: Kaliumpermanganat als Feststoff.....	III-3
Abb. 50: Vergleichstest KMnO_4 an Gesteinsplättchen	III-3
Abb. 51: Platte aus Leistädter Sandstein am Ende des Versuchs	III-4
Abb. 52: Chromatographieeffekte an Abtswinder Sandstein	III-4
Abb. 53: Nachsaugen an Krenzheimer Muschelkalk.....	III-5
Abb. 54: Kupfersulfatlösung durch Zugabe von Ammoniakwasser zu Tetraamminkupfersulfatlösung.....	III-5
Abb. 55: Vergleichstest Tetraamminkupfersulfat an Gesteinsplättchen.....	III-6
Abb. 56: Chromatographieeffekt an Leistädter Sandstein	III-6
Abb. 57: Anreicherung von Tetraamminkupfersulfat an der Bohrkernoberfläche	III-7
Abb. 58: Nachsaugeffekt an Nürnberger Burgsandstein (Scheibe BS5 - 5.A).....	III-7
Abb. 59: LE4 - Rechnungsgrundlage.....	III-8
Abb. 60: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme i.A.a DIN (BS4)	III-9
Abb. 61: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme i.A.a DIN (BU2).....	III-9
Abb. 62: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme i.A.a DIN (SA5)	III-10
Abb. 63: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme i.A.a DIN (LE5)	III-10
Abb. 64: Vergleich Eindringverhalten KMnO_4 und H_2O (BU1).....	III-11
Abb. 65: Vergleich Eindringverhalten KMnO_4 und H_2O (BU2).....	III-11
Abb. 66: Vergleich Eindringverhalten KMnO_4 und H_2O (BU3).....	III-11
Abb. 67: Vergleich Eindringverhalten KMnO_4 und H_2O (BU4).....	III-12
Abb. 68: Vergleich Eindringverhalten KMnO_4 und H_2O (BS1).....	III-12
Abb. 69: Vergleich Eindringverhalten KMnO_4 und H_2O (BS2).....	III-12
Abb. 70: Vergleich Eindringverhalten KMnO_4 und H_2O (BS5).....	III-13
Abb. 71: Vergleich Eindringverhalten KMnO_4 und H_2O (LE3).....	III-13
Abb. 72: Vergleich Eindringverhalten KMnO_4 und H_2O (LE4).....	III-13
Abb. 73: Vergleich Eindringverhalten KMnO_4 und H_2O (SA2)	III-14
Abb. 74: Vergleich Eindringverhalten KMnO_4 und H_2O (SA3)	III-14
Abb. 75: BU1 - Oberfläche	III-15
Abb. 76: BU1 - Oberfläche angefärbt	III-15
Abb. 77: BU1 - 1.A.....	III-15
Abb. 78: BU1 - 1.B.....	III-15
Abb. 79: BU1 - 2.A.....	III-15
Abb. 80: BU1 - 2.B.....	III-15
Abb. 81: BU1 - 3.A.....	III-16
Abb. 82: BU1 - 3.B.....	III-16

Abb. 83: BU1 - 4.A.....	III-16
Abb. 84: BU1 - 4.B.....	III-16
Abb. 85: BU1 - 5.A.....	III-16
Abb. 86: BU1 - 5.B.....	III-16
Abb. 87: BU1 - 6.A.....	III-17
Abb. 88: BU1 - 6.B.....	III-17
Abb. 89: BU1 - 7.A.....	III-17
Abb. 90: BU1 - 7.B.....	III-17
Abb. 91: BU1 - 8.A.....	III-17
Abb. 92: BU1 - 8.B.....	III-17
Abb. 93: BU1 - 9.A.....	III-18
Abb. 94: BU1 - 9.B.....	III-18
Abb. 95: BU1 - 10.A.....	III-18
Abb. 96: BU1 - 10.B.....	III-18
Abb. 97: BU1 - Sägeschnitte seitlich 1.....	III-18
Abb. 98: BU1 - Sägeschnitte seitlich 2.....	III-18
Abb. 99: BU2 - Oberfläche.....	III-19
Abb. 100: BU2 - Oberfläche angefärbt.....	III-19
Abb. 101: BU2 - Oberfläche eingeschnitten.....	III-19
Abb. 102: BU2 - 1.A.....	III-19
Abb. 103: BU2 - 1.B.....	III-19
Abb. 104: BU2 - 2.A.....	III-19
Abb. 105: BU2 - 2.B.....	III-20
Abb. 106: BU2 - 3.A.....	III-20
Abb. 107: BU2 - 3.B.....	III-20
Abb. 108: BU2 - 4.A.....	III-20
Abb. 109: BU2 - 4.B.....	III-20
Abb. 110: BU2 - 5.A.....	III-20
Abb. 111: BU2 - 5.B.....	III-21
Abb. 112: BU2 - 6.A.....	III-21
Abb. 113: BU2 - 6.B.....	III-21
Abb. 114: BU2 - 7.A.....	III-21
Abb. 115: BU2 - 7.B.....	III-21
Abb. 116: BU2 - 8.A.....	III-21
Abb. 117: BU2 - 8.B.....	III-22
Abb. 118: BU2 - 9.A (Mitte).....	III-22
Abb. 119: BU2 - 9.B.....	III-22
Abb. 120: BU2 - 10.A.....	III-22
Abb. 121: BU2 - 10.B.....	III-22
Abb. 122: BU2 - 11.A.....	III-22
Abb. 123: BU2 - 11.B.....	III-23
Abb. 124: BU2 - 12.A.....	III-23
Abb. 125: BU2 - 12.B.....	III-23
Abb. 126: BU2 - 13.A.....	III-23
Abb. 127: BU2 - 13.B.....	III-23
Abb. 128: BU2 - Sägeschnitte seitlich 1.....	III-23
Abb. 129: BU2 - Sägeschnitte seitlich 2.....	III-24
Abb. 130: BU3 - Oberfläche angefärbt.....	III-24
Abb. 131: BU3 - Oberfläche eingeschnitten.....	III-24
Abb. 132: BU3 - 1.A.....	III-24
Abb. 133: BU3 - 1.B.....	III-24

Abb. 134: BU3 - 2.A.....	III-25
Abb. 135: BU3 - 2.B.....	III-25
Abb. 136: BU3 - 3.A.....	III-25
Abb. 137: BU3 - 3.B.....	III-25
Abb. 138: BU3 - 4.A.....	III-25
Abb. 139: BU3 - 4.B.....	III-25
Abb. 140: BU3 - 5.A.....	III-26
Abb. 141: BU3 - 5.B.....	III-26
Abb. 142: BU3 - 6.A.....	III-26
Abb. 143: BU3 - 6.B.....	III-26
Abb. 144: BU3 - 7.A.....	III-26
Abb. 145: BU3 - 7.B.....	III-26
Abb. 146: BU3 - 8.A (Mitte).....	III-27
Abb. 147: BU3 - 8.A.....	III-27
Abb. 148: BU3 - 9.A.....	III-27
Abb. 149: BU3 - 9.B.....	III-27
Abb. 150: BU3 - 10.A.....	III-27
Abb. 151: BU3 - 10.B.....	III-27
Abb. 152: BU3 - 11.A.....	III-28
Abb. 153: BU3 - 11.B.....	III-28
Abb. 154: BU3 - 12.A.....	III-28
Abb. 155: BU3 - 12.B.....	III-28
Abb. 156: BU3 - 13.A.....	III-28
Abb. 157: BU3 - 13.B.....	III-28
Abb. 158: BU3 - Sägeschnitte seitlich 1.....	III-29
Abb. 159: BU3 - Sägeschnitte seitlich 2.....	III-29
Abb. 160: BU4 - Oberfläche angefärbt.....	III-29
Abb. 161: BU4 - 1.A.....	III-29
Abb. 162: BU4 - 1.B.....	III-29
Abb. 163: BU4 - 2.A.....	III-29
Abb. 164: BU4 - 2.B.....	III-30
Abb. 165: BU4 - 3.A.....	III-30
Abb. 166: BU4 - 3.B.....	III-30
Abb. 167: BU4 - 4.A.....	III-30
Abb. 168: BU4 - 4.B.....	III-30
Abb. 169: BU4 - 5.A.....	III-30
Abb. 170: BU4 - 5.B.....	III-31
Abb. 171: BU4 - 6.A.....	III-31
Abb. 172: BU4 - 6.B.....	III-31
Abb. 173: BU4 - 7.A.....	III-31
Abb. 174: BU4 - 7.B.....	III-31
Abb. 175: BU4 - 8.A.....	III-31
Abb. 176: BU4 - 8.B.....	III-32
Abb. 177: BU4 - 9.A.....	III-32
Abb. 178: BU4 - 9.B.....	III-32
Abb. 179: BU4 - 10.A.....	III-32
Abb. 180: BU4 - 10.B.....	III-32
Abb. 181: BU4 - 11.A.....	III-32
Abb. 182: BU4 - 11.B.....	III-33
Abb. 183: BU4 - 12.A.....	III-33
Abb. 184: BU4 - 12.B.....	III-33

Abb. 185: BU4 - 13.A.....	III-33
Abb. 186: BU4 - 13.B.....	III-33
Abb. 187: BU4 - 14.A.....	III-33
Abb. 188: BU4 - 14.B.....	III-34
Abb. 189: BU4 - 15.A.....	III-34
Abb. 190: BU4 - 15.B.....	III-34
Abb. 191: BU4 - 16.A.....	III-34
Abb. 192: BU4 - 16.B.....	III-34
Abb. 193: BU4 - Sägeschnitte seitlich.....	III-34
Abb. 194: BS1 - Oberfläche angefärbt.....	III-35
Abb. 195: BS1 - 2.A.....	III-35
Abb. 196: BS1 - 2.B.....	III-35
Abb. 197: BS1 - 3.A.....	III-35
Abb. 198: BS1 - 3.B.....	III-35
Abb. 199: BS1 - 4.A.....	III-35
Abb. 200: BS1 - 4.B.....	III-36
Abb. 201: BS1 - 5.A.....	III-36
Abb. 202: BS1 - 5.B.....	III-36
Abb. 203: BS1 - 7.A.....	III-36
Abb. 204: BS1 - 7.B.....	III-36
Abb. 205: BS1 - 8.A.....	III-36
Abb. 206: BS1 - 8.B.....	III-37
Abb. 207: BS1 - 9.A.....	III-37
Abb. 208: BS1 - 9.B.....	III-37
Abb. 209: BS1 - Sägeschnitte seitlich 1.....	III-37
Abb. 210: BS1 - Sägeschnitte seitlich 2.....	III-37
Abb. 211: BS2 - Oberfläche angefärbt.....	III-38
Abb. 212: BS2 - 1.A.....	III-38
Abb. 213: BS2 - 1.B.....	III-38
Abb. 214: BS2 - 2.A.....	III-38
Abb. 215: BS2 - 2.B.....	III-38
Abb. 216: BS2 - 3.A.....	III-38
Abb. 217: BS2 - 3.B.....	III-39
Abb. 218: BS2 - 4.A.....	III-39
Abb. 219: BS2 - 4.B.....	III-39
Abb. 220: BS2 - 5.A.....	III-39
Abb. 221: BS2 - 5.B.....	III-39
Abb. 222: BS2 - 6.A.....	III-39
Abb. 223: BS2 - 6.B.....	III-40
Abb. 224: BS2 - 7.A.....	III-40
Abb. 225: BS2 - 7.B.....	III-40
Abb. 226: BS2 - Sägeschnitte seitlich 1.....	III-40
Abb. 227: BS2 - Sägeschnitte seitlich 2.....	III-40
Abb. 228: BS5 - Oberfläche angefärbt.....	III-41
Abb. 229: BS5 - Oberfläche eingeschnitten.....	III-41
Abb. 230: BS5 - 1.A.....	III-41
Abb. 231: BS5 - 1.B.....	III-41
Abb. 232: BS5 - 2.A.....	III-41
Abb. 233: BS5 - 2.B.....	III-41
Abb. 234: BS5 - 3.A.....	III-42
Abb. 235: BS5 - 3.B.....	III-42

Abb. 236: BS5 - 4.A	III-42
Abb. 237: BS5 - 4.B.....	III-42
Abb. 238: BS5 - 5.A	III-42
Abb. 239: BS5 - 5.B.....	III-42
Abb. 240: BS5 - 6.A (Mitte).....	III-43
Abb. 241: BS5 - 6.B.....	III-43
Abb. 242: BS5 - 7.A	III-43
Abb. 243: BS5 - 7.B.....	III-43
Abb. 244: BS5 - 8.A	III-43
Abb. 245: BS5 - 8.B.....	III-43
Abb. 246: BS5 - 9.A	III-44
Abb. 247: BS5 - 9.B.....	III-44
Abb. 248: BS5 - Sägeschnitte seitlich 1	III-44
Abb. 249: BS5 - Sägeschnitte seitlich 2	III-44
Abb. 250: LE3 - Oberfläche angefärbt	III-45
Abb. 251: LE3 - 1.A	III-45
Abb. 252: LE3 - 1.B.....	III-45
Abb. 253: LE3 - 2.A	III-45
Abb. 254: LE3 - 2.B.....	III-45
Abb. 255: LE3 - 3.A	III-45
Abb. 256: LE3 - 3.B.....	III-46
Abb. 257: LE3 - 4.A	III-46
Abb. 258: LE3 - Oberfläche nach Sägeversuchen.....	III-46
Abb. 259: LE4 - Oberfläche angefärbt.....	III-47
Abb. 260: LE4 - 1.A	III-47
Abb. 261: LE4 - 1.B (Mitte).....	III-47
Abb. 262: LE4 - 2.A	III-47
Abb. 263: LE4 - 2.B.....	III-47
Abb. 264: SA2 - Oberfläche angefärbt.....	III-47
Abb. 265: SA2 - Oberfläche nach Sägeversuchen.....	III-48
Abb. 266: SA3 - Oberfläche angefärbt.....	III-48
Abb. 267: SA3 - 1.A	III-48
Abb. 268: SA3 - 2.A (Mitte).....	III-48
Abb. 269: SA3 - 1.B.....	III-48
Abb. 270: SA3 - 2.B.....	III-48
Abb. 271: Porenradienverteilung Bucher Sandstein (rote Kurve).....	III-101
Abb. 272: Porenradienverteilung feine Varietät	III-102
Abb. 273: Porenradienverteilung grobe Varietät.....	III-102
Abb. 274: Porenradienverteilung Leistädter Sandstein.....	III-103
Abb. 275: Porenhals-Durchmesser-Verteilung Sander Sandstein.....	III-104
Abb. 276: Porenhals-Durchmesser-Verteilung Postaer Sandstein	III-105
Abb. 277: Beispiel der Prüfanordnung DIN EN ISO 15148. 1: Gitter mit Auflast gegen Probenauftrieb (falls erforderlich), 2: Probekörper, 3: Wasserspiegel	III-106
Abb. 278: Kurve Typ A - Wasser an der Oberfläche	III-107
Abb. 279: Kurve Typ A - kein Wasser an der Oberfläche.....	III-107
Abb. 280: Kurve Typ B.....	III-108

Abbildungsnachweis

Abbildung	Quelle/ Urheber
Abb. 1	HOHMANN (2012), S. 206, Bild 3.7
Abb. 2	nach: Lutz, P., Jenisch, R., Klopfer, H., Freymuth, H., Krampf, L. (1985): Lehrbuch der Bauphysik. Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand; Verl. B.G., Teubner, Stuttgart.
Abb. 3	J.M. Quadrizius
Abb. 4	Auswerteprogramm Calkarow v3.22 (PFEFFERKORN, WENDLER)
Abb. 5	WENDLER, SNETHLAGE (1989), S. 111, Abb. 3
Abb. 6 - 270	J.M. Quadrizius
Abb. 271	TERHEIDEN (2007), S.66, Abb. 6-9
Abb. 272 + 273	RÖTTGER (2007), Anhang
Abb. 274	LEGRUM (1991), S. 71, Bild 7f
Abb. 275	GRIMM (2018), S. 254
Abb. 276	GRIMM (2018), S. 330
Abb. 277	DIN EN ISO 15148:2016-12, S. 8, Bild 1
Abb. 278	DIN EN ISO 15148:2016-12, S. 10, Bild 2
Abb. 279	DIN EN ISO 15148:2016-12, S. 10, Bild 3
Abb. 280	DIN EN ISO 15148:2016-12, S. 11, Bild 4

Abkürzungsverzeichnis

i.A.a - in Anlehnung an

BU - Bucher Sandstein

BS - Nürnberger Burgsandstein

LE - Leistädter Sandstein

SA - Sander Sandstein

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Zusammenfassung aller ermittelten w-Werte.....	22
Tab. 2: Ermittelte Wasseraufnahmekapazitäten der Probekörper	23
Tab. 3: Zusammenfsg der petrophysikalische Kennwerte der Probegesteine	III-48
Tab. 4: Bemassung der einzelnen Probekörper, daraus ermittelt: Volumen und Rohdichte (in Annäherung).....	III-49
Tab. 5: Wasseraufnahme am Prisma (BU2)	III-50
Tab. 6: Wasseraufnahme am Prisma (BS4)	III-51
Tab. 7: Wasseraufnahme am Prisma (LE5)	III-52
Tab. 8: Wasseraufnahme am Prisma (SA5).....	III-53
Tab. 9: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr BU1 - destilliertes Wasser.....	III-54
Tab. 10: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr BU2 - destilliertes Wasser.....	III-54
Tab. 11: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr BU3 - destilliertes Wasser.....	III-55
Tab. 12: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr BU4 - destilliertes Wasser.....	III-55
Tab. 13: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr BU5 - destilliertes Wasser.....	III-56
Tab. 14: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr BS1 - destilliertes Wasser.....	III-57
Tab. 15: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr BS2 - destilliertes Wasser.....	III-58
Tab. 16: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr BS3 - destilliertes Wasser.....	III-59
Tab. 17: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr BS4 - destilliertes Wasser.....	III-60
Tab. 18: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr BS5 - destilliertes Wasser.....	III-61
Tab. 19: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr LE1 - destilliertes Wasser.....	III-62
Tab. 20: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr LE2 - destilliertes Wasser.....	III-63
Tab. 21: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr LE3 - destilliertes Wasser.....	III-64
Tab. 22: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr LE4 - destilliertes Wasser.....	III-65
Tab. 23: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr LE5 - destilliertes Wasser.....	III-66
Tab. 24: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr SA1 - destilliertes Wasser.....	III-67
Tab. 25: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr SA2 - destilliertes Wasser.....	III-68
Tab. 26: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr SA3 - destilliertes Wasser.....	III-69
Tab. 27: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr SA4 - destilliertes Wasser.....	III-70
Tab. 28: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr SA5 - destilliertes Wasser.....	III-70
Tab. 29: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr BU1 - KMnO_4 -Lösung.....	III-71
Tab. 30: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr BU3 - KMnO_4 -Lösung.....	III-71
Tab. 31: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr BU2 - KMnO_4 -Lösung.....	III-72
Tab. 32: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr BU4 - KMnO_4 -Lösung.....	III-73
Tab. 33: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr BS1 - KMnO_4 -Lösung.....	III-74
Tab. 34: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr BS2 - KMnO_4 -Lösung.....	III-75
Tab. 35: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr BS5 - KMnO_4 -Lösung.....	III-76
Tab. 36: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr LE3 - KMnO_4 -Lösung.....	III-77
Tab. 37: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr SA2 - KMnO_4 -Lösung	III-77
Tab. 38: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr LE4 - KMnO_4 -Lösung.....	III-78
Tab. 39: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr SA3 - KMnO_4 -Lösung	III-79
Tab. 40: Auswertungsmaske Calkarow (BU1).....	III-80
Tab. 41: Auswertungsmaske Calkarow (BU2).....	III-81
Tab. 42: Auswertungsmaske Calkarow (BU3).....	III-82
Tab. 43: Auswertungsmaske Calkarow (BU4).....	III-83
Tab. 44: Auswertungsmaske Calkarow (BU5).....	III-84
Tab. 45: Auswertungsmaske Calkarow (BS1)	III-85
Tab. 46: Auswertungsmaske Calkarow (BS2)	III-86
Tab. 47: Auswertungsmaske Calkarow (BS3)	III-87
Tab. 48: Auswertungsmaske Calkarow (BS4)	III-88

Tab. 49: Auswertungsmaske Calkarow (BS5)	III-89
Tab. 50: Auswertungsmaske Calkarow (LE1)	III-90
Tab. 51: Auswertungsmaske Calkarow (LE2)	III-91
Tab. 52: Auswertungsmaske Calkarow (LE3)	III-92
Tab. 53: Auswertungsmaske Calkarow (LE4)	III-93
Tab. 54: Auswertungsmaske Calkarow (LE5)	III-94
Tab. 55: Auswertungsmaske Calkarow (SA1)	III-95
Tab. 56: Auswertungsmaske Calkarow (SA2)	III-96
Tab. 57: Auswertungsmaske Calkarow (SA3)	III-97
Tab. 58: Auswertungsmaske Calkarow (SA4)	III-98
Tab. 59: Auswertungsmaske Calkarow (SA5)	III-99

Anhang

<u>Abbildungen</u>	III-2
Textbezogene Abbildungen	III-2
Graphen der kapillaren Wasseraufnahme i.A.a. DIN EN ISO 15148	III-9
Graphen des Wassereindringverhaltens Vgl. KMnO_4 und Wasser	III-11
Gesteinsscheiben der Probekörper	III-15
<u>Tabellen</u>	III-49
Petrophysikalische Parameter	III-49
Probekörperabmessungen	III-50
Messwerte i.A.a. DIN EN ISO 15148.....	III-51
Messwerte Karsten	III-55
Auswertetabellen Calkarow	III-81
<u>Kurzbeschreibungen der verwendeten Gesteine</u>	III-101
Bucher Sandstein.....	III-101
Nürnberger Burgsandstein	III-102
Leistädter Sandstein	III-103
Sander Sandstein	III-104
Postaer Sandstein.....	III-105
<u>Kurzzusammenfassung DIN EN ISO 15148:2016-12</u>	III-106
<u>Eidesstattliche Erklärung</u>	III-109

Abbildungen

Abb. 47: Durch Schichtung abgegrenzter trockener Teilbereich an Bohrkern P3

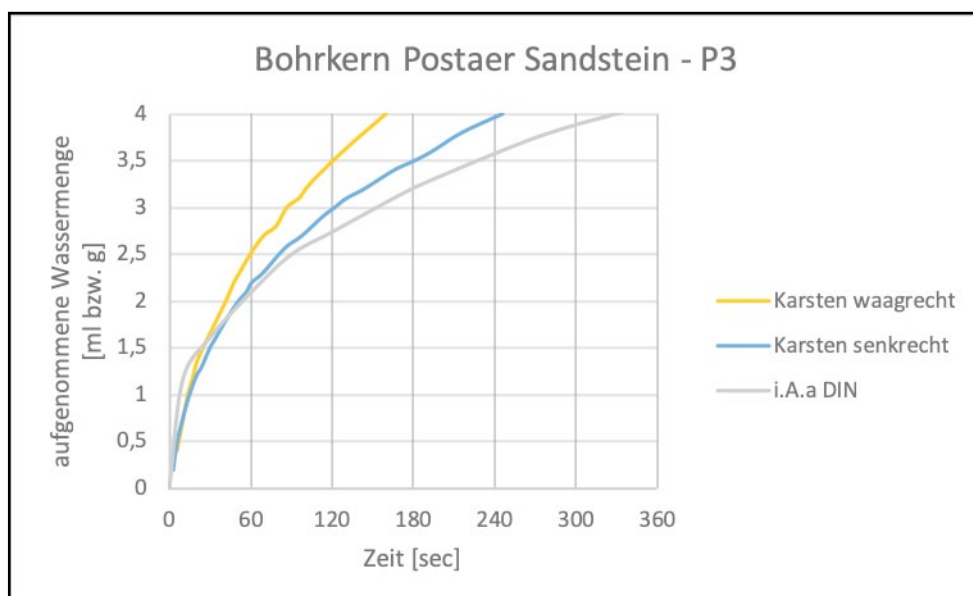


Abb. 48: Wasseraufnahme an Bohrkern P3



Abb. 49: Kaliumpermanganat als Feststoff



Abb. 50: Vergleichstest KMnO_4 an Gesteinsplättchen

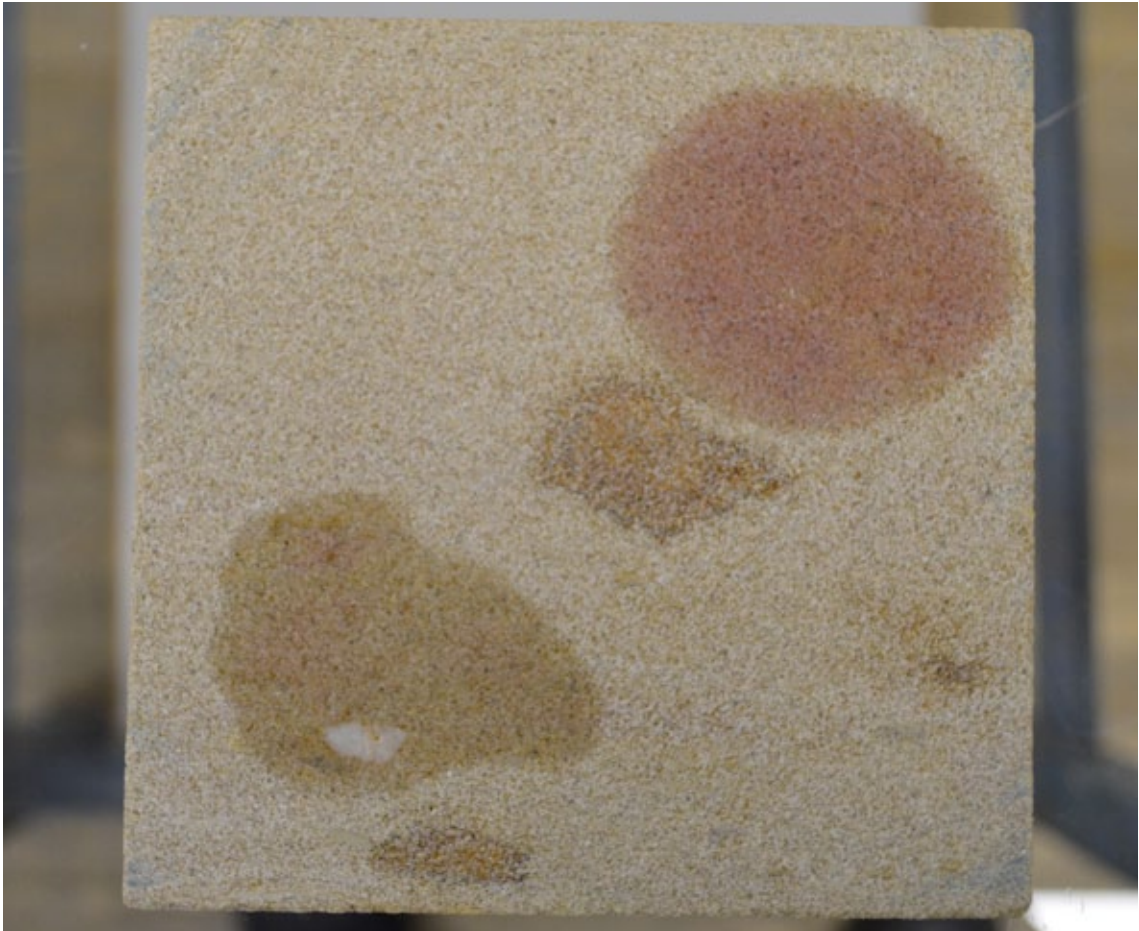


Abb. 51: Platte aus Leistädter Sandstein am Ende des Versuchs. unten links: 0,02M Lösung KMnO_4 , oben rechts: 0,04M Lösung KMnO_4



Abb. 52: Chromatographieeffekte an Abtswinder Sandstein, unten links: 0,02M Lösung KMnO_4 , oben rechts: 0,04M Lösung KMnO_4



Abb. 53: Nachsaugen an Krenzheimer Muschelkalk. Der Durchfeuchtungshorizont verfärbte sich erst etwa 20-30 Minuten schwach rosa.



Abb. 54: Kupfersulfatlösung durch Zugabe von Ammoniakwasser zu Tetraamminkupfersulfatlösung

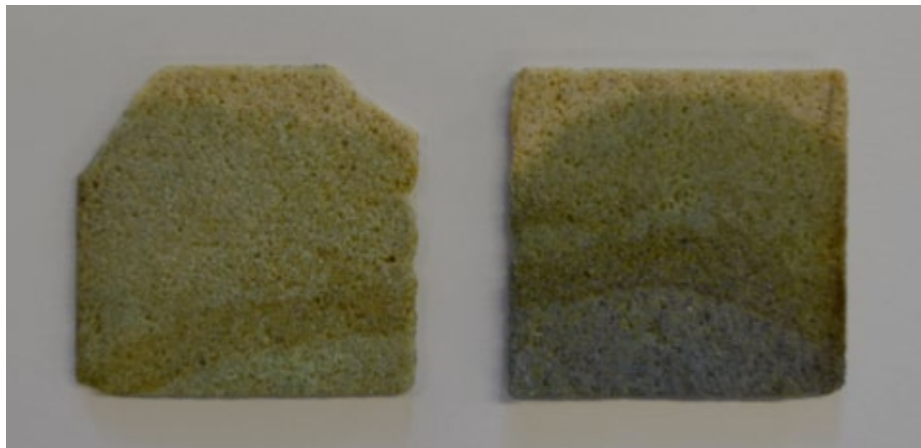


Abb. 55: Vergleichstest Tetraamminkupfersulfaft an Gesteinsplättchen aus Postaer Sandstein



Abb. 56: Chromatographieeffekt an Leistädter Sandstein



Abb. 57: Anreicherung von Tetraamminekupfersulfat an der Bohrkerndoberfläche



Abb. 58: Nachsaugeffekt an Nürnberger Burgsandstein (Scheibe BS5 - 5.A)

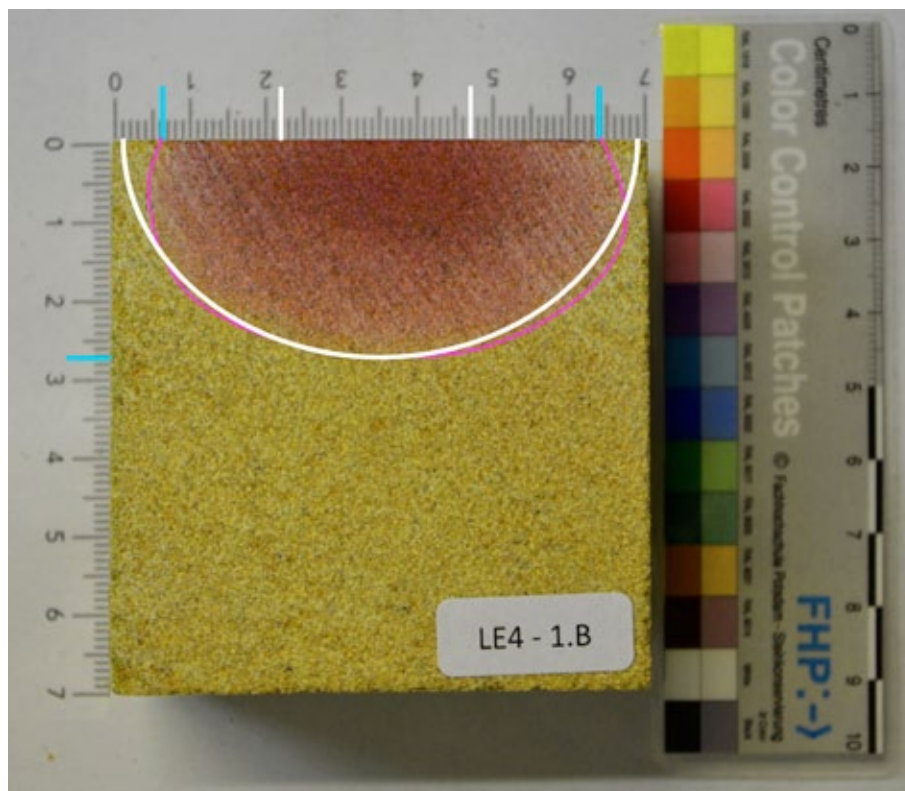


Abb. 59: LE4 - Rechnungsgrundlage

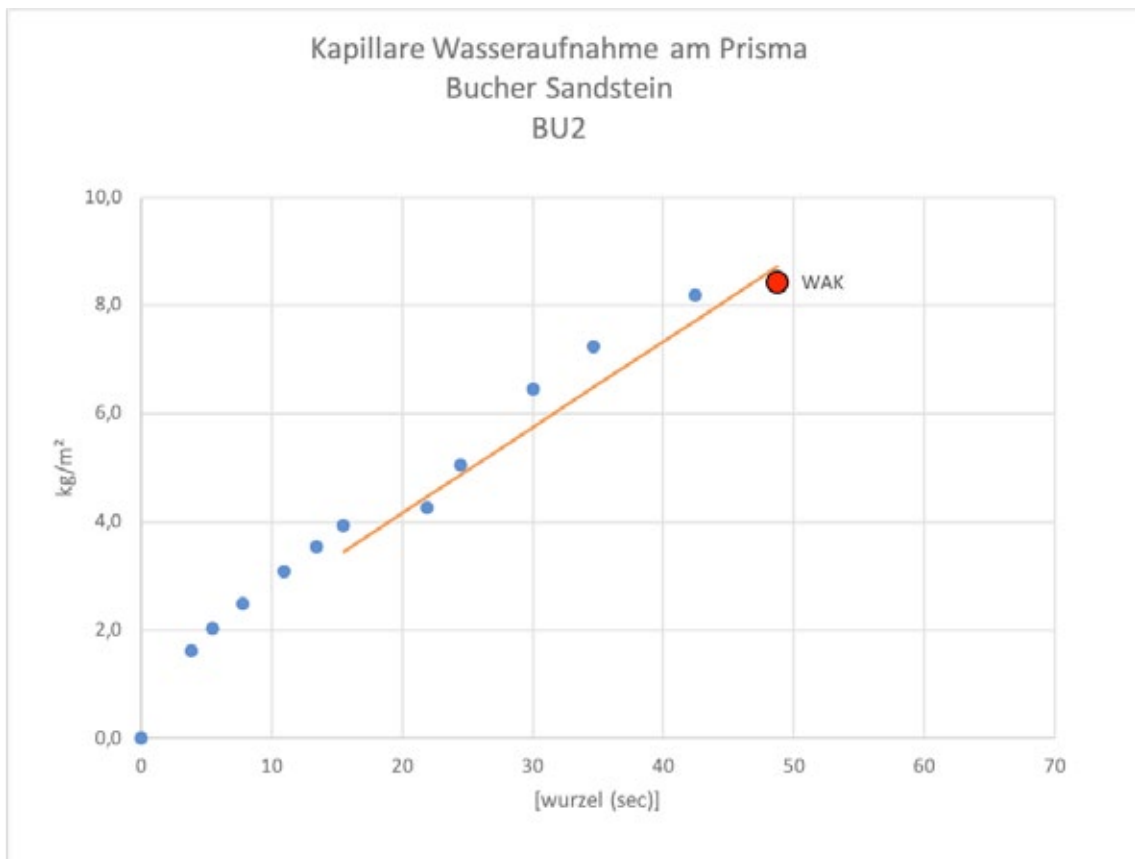


Abb. 60: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme i.A.a. DIN (BU2)

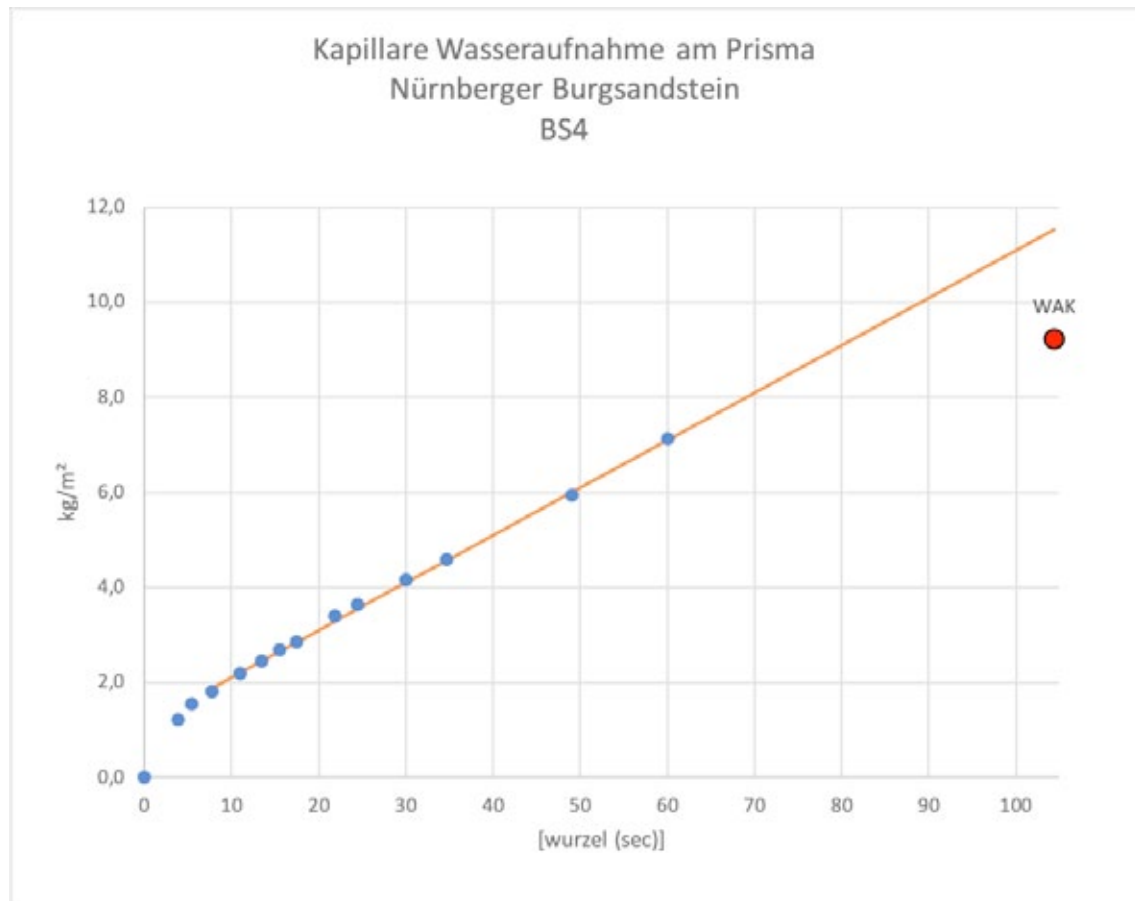


Abb. 61: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme i.A.a. DIN (BS4)

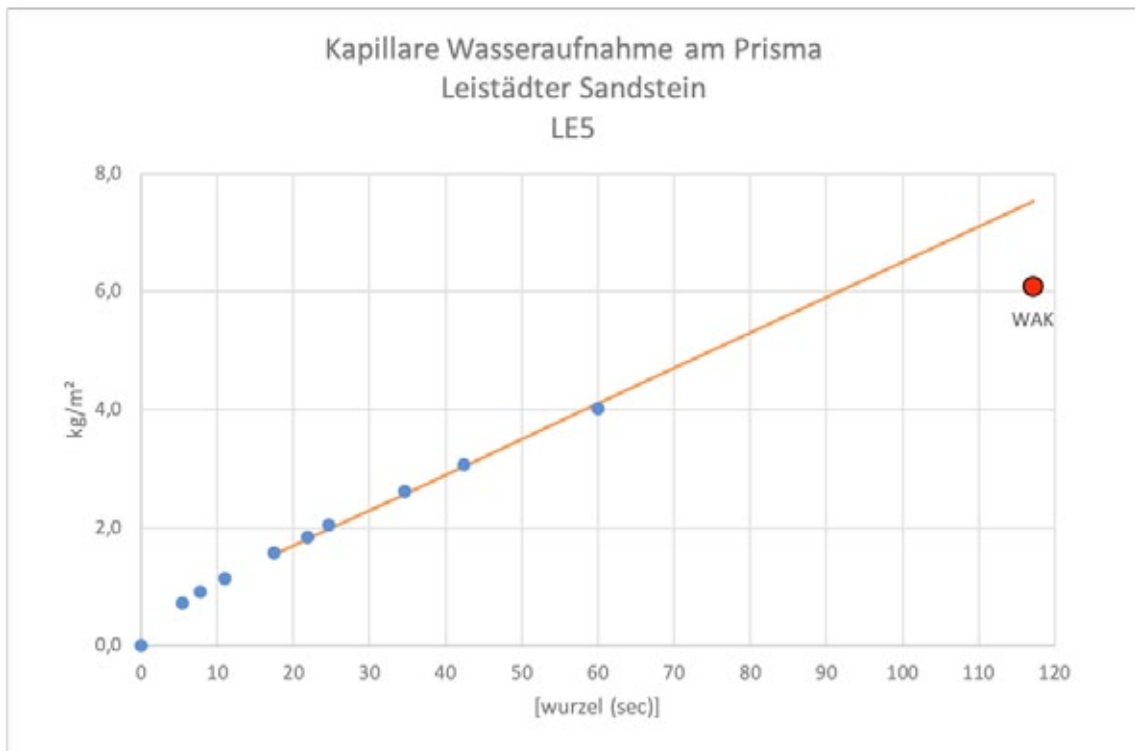


Abb. 62: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme i.A.a. DIN (LE5)

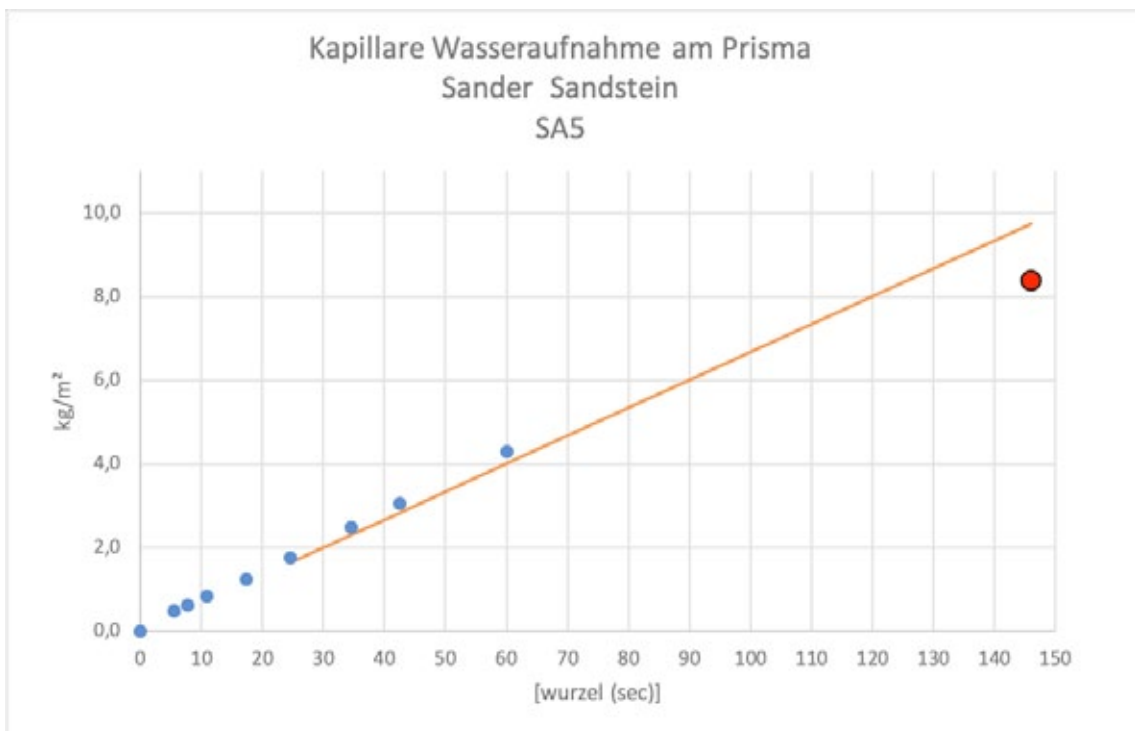


Abb. 63: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme i.A.a. DIN (SA5)

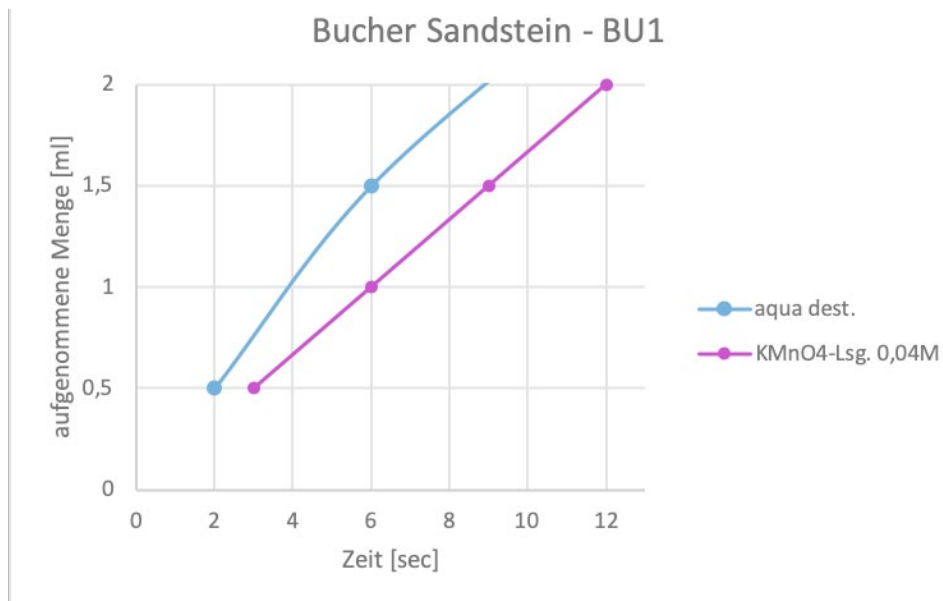


Abb. 64: Vergleich Eindringverhalten $KMnO_4$ und H_2O (BU1)

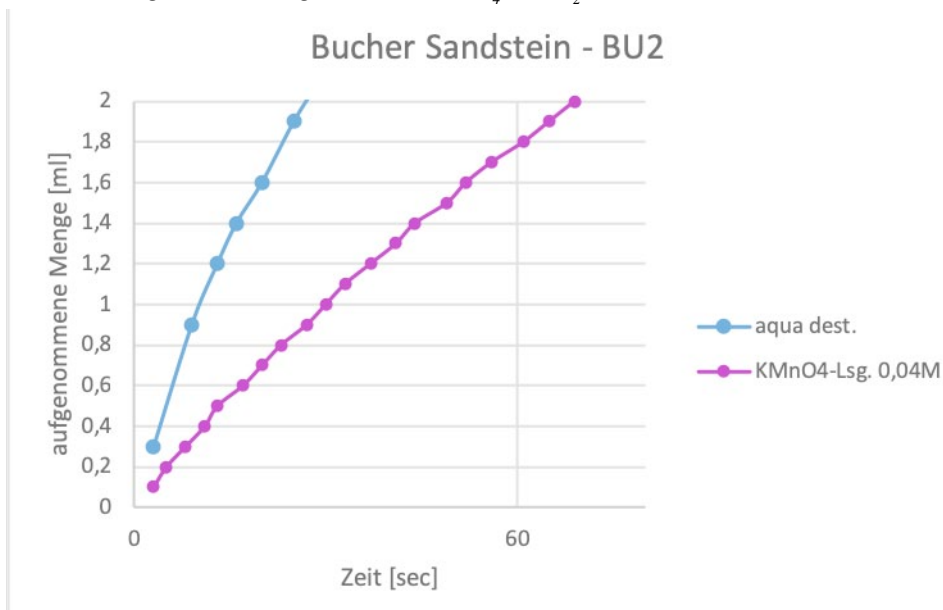


Abb. 65: Vergleich Eindringverhalten $KMnO_4$ und H_2O (BU2)

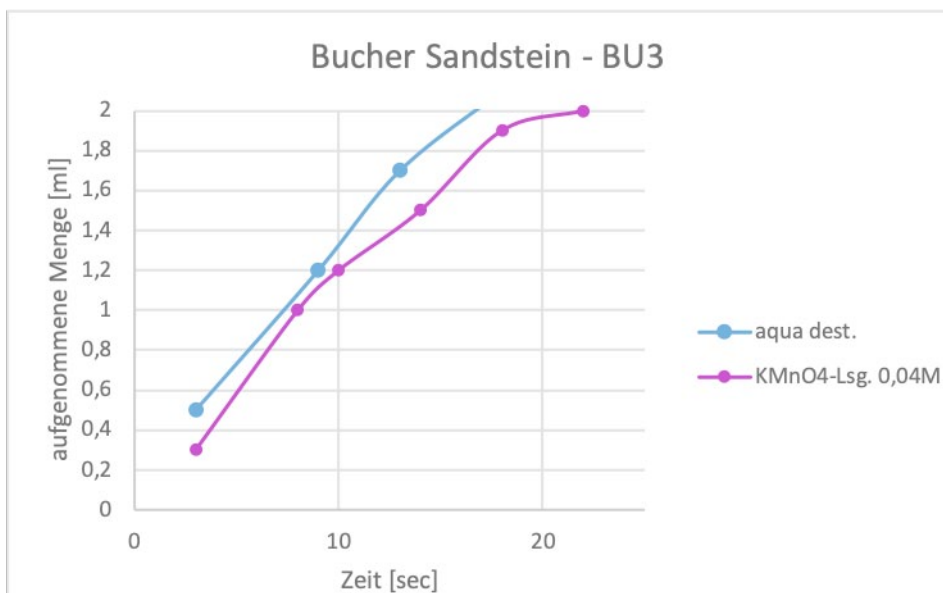


Abb. 66: Vergleich Eindringverhalten $KMnO_4$ und H_2O (BU3)

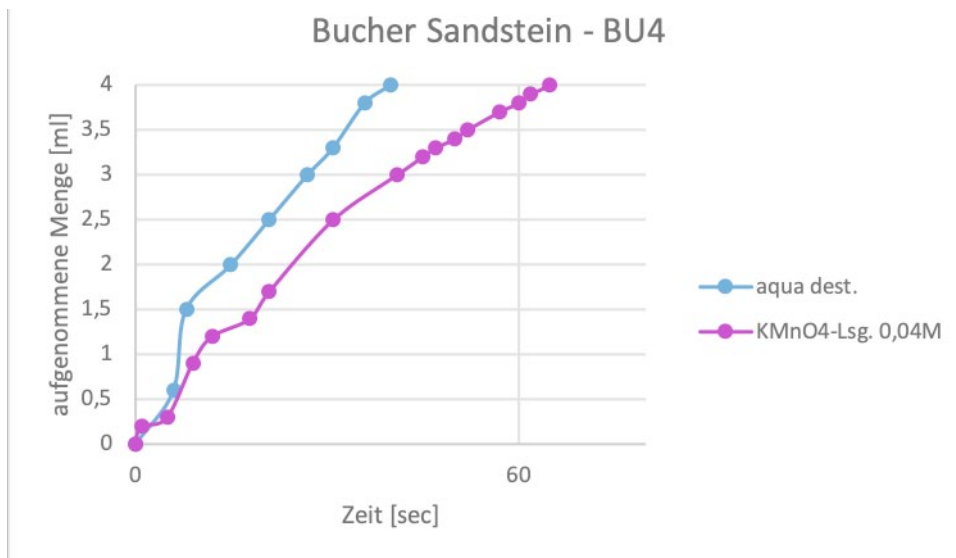


Abb. 67: Vergleich Eindringverhalten $KMnO_4$ und H_2O (BU4)

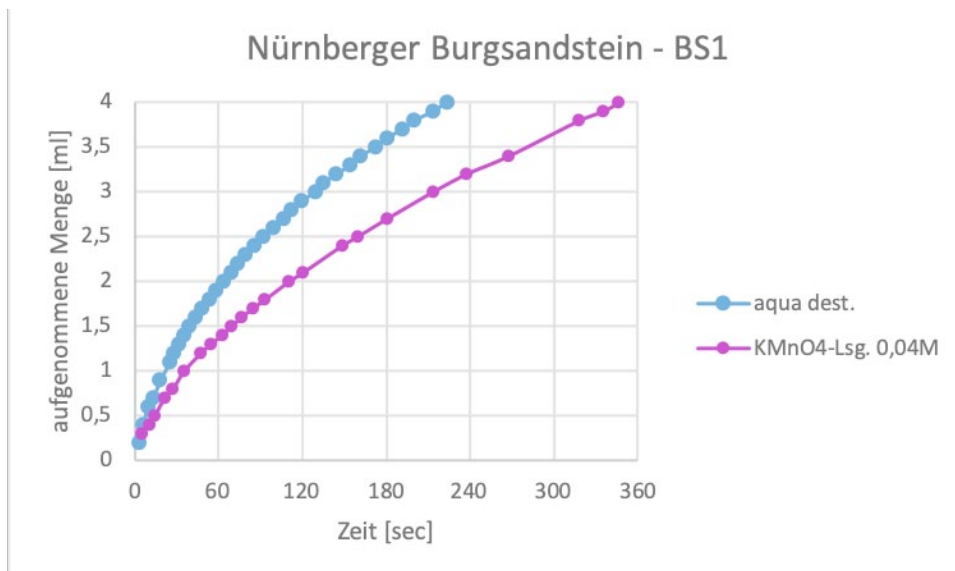


Abb. 68: Vergleich Eindringverhalten $KMnO_4$ und H_2O (BS1)

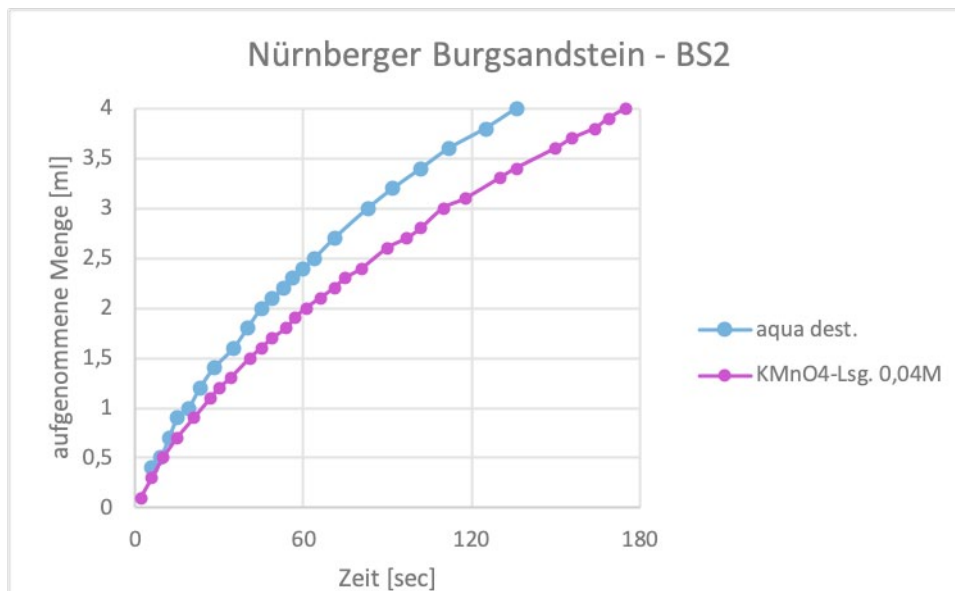


Abb. 69: Vergleich Eindringverhalten $KMnO_4$ und H_2O (BS2)

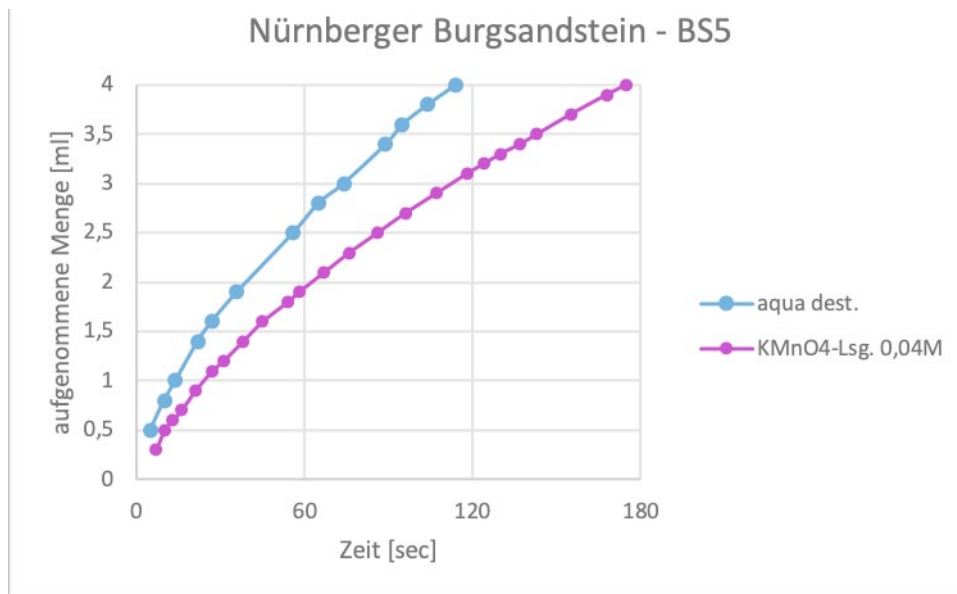


Abb. 70: Vergleich Eindringverhalten $KMnO_4$ und H_2O (BS5)

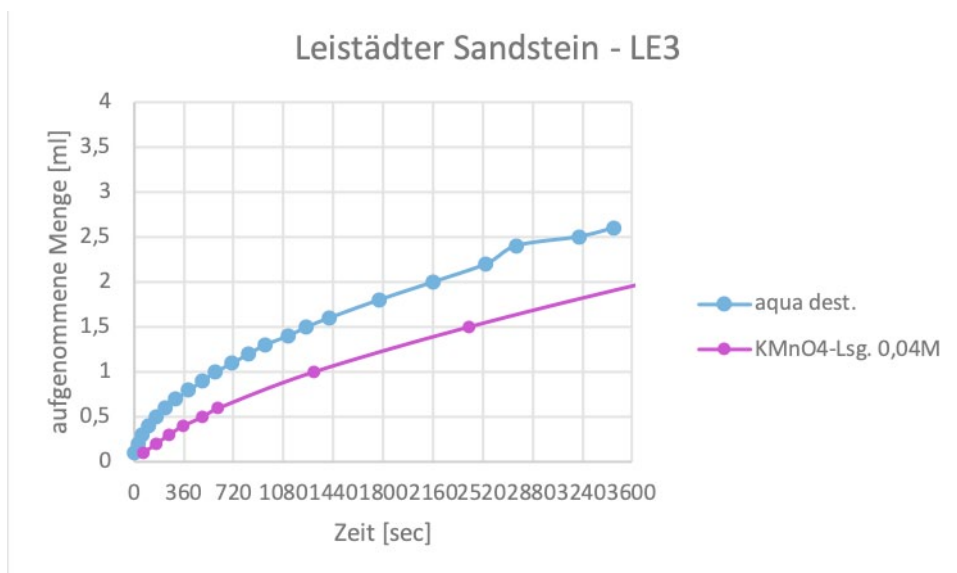


Abb. 71: Vergleich Eindringverhalten $KMnO_4$ und H_2O (LE3)

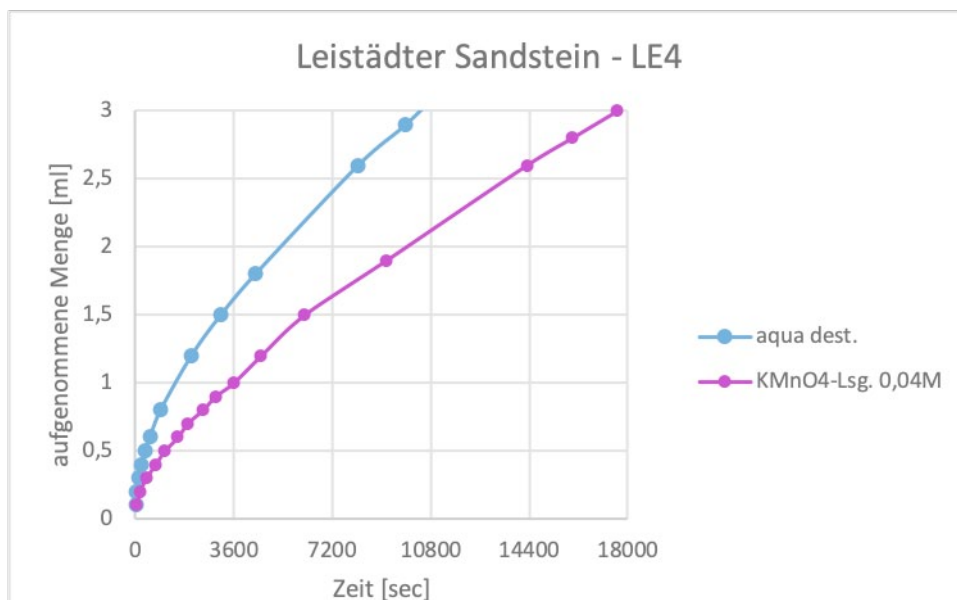


Abb. 72: Vergleich Eindringverhalten $KMnO_4$ und H_2O (LE4)

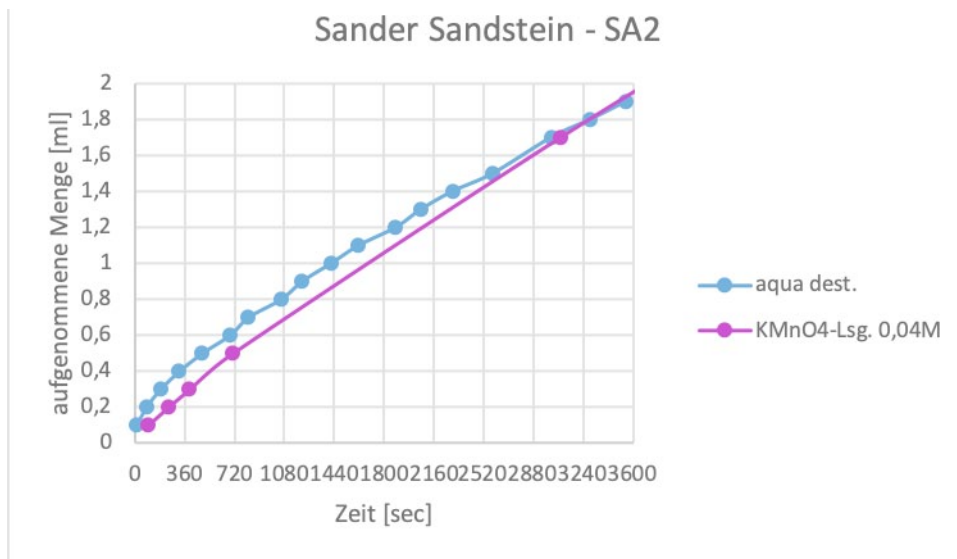


Abb. 73: Vergleich Eindringverhalten $KMnO_4$ und H_2O (SA2)

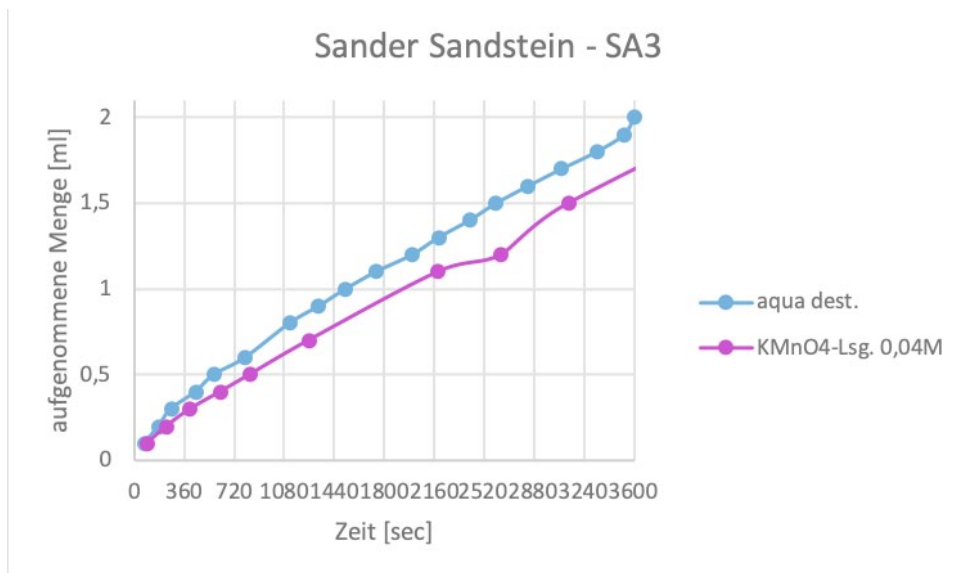


Abb. 74: Vergleich Eindringverhalten $KMnO_4$ und H_2O (SA3)



Abb. 75: BU1 - Oberfläche

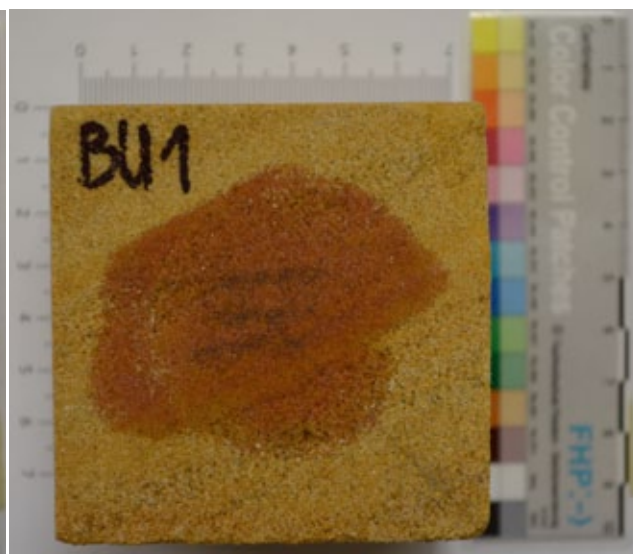


Abb. 76: BU1 - Oberfläche angefärbt

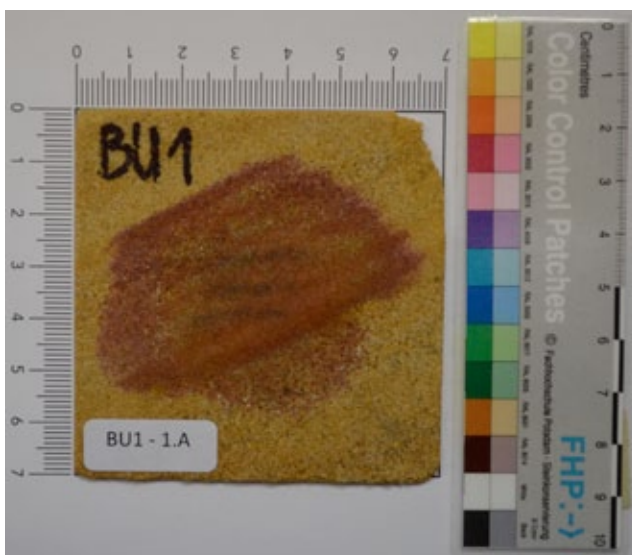


Abb. 77: BU1 - 1.A

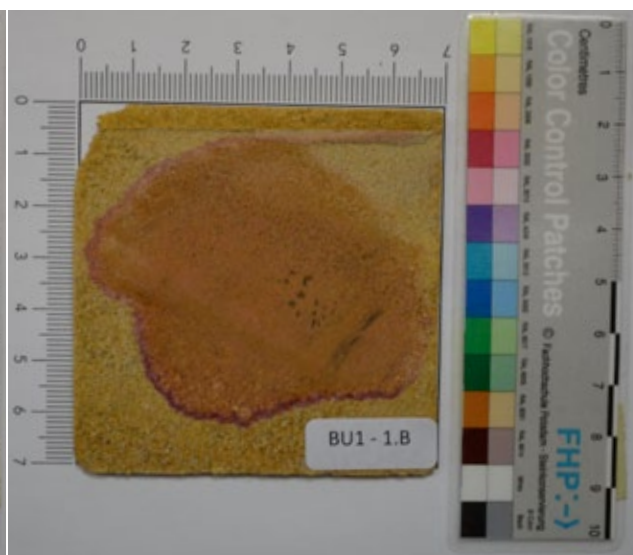


Abb. 78: BU1 - 1.B

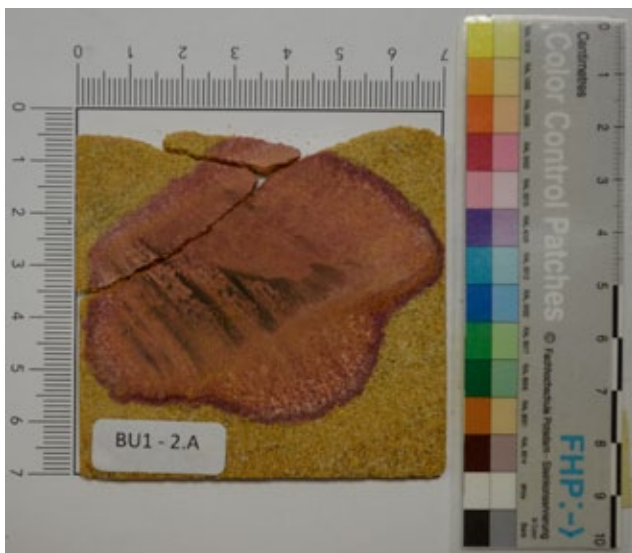


Abb. 79: BU1 - 2.A



Abb. 80: BU1 - 2.B

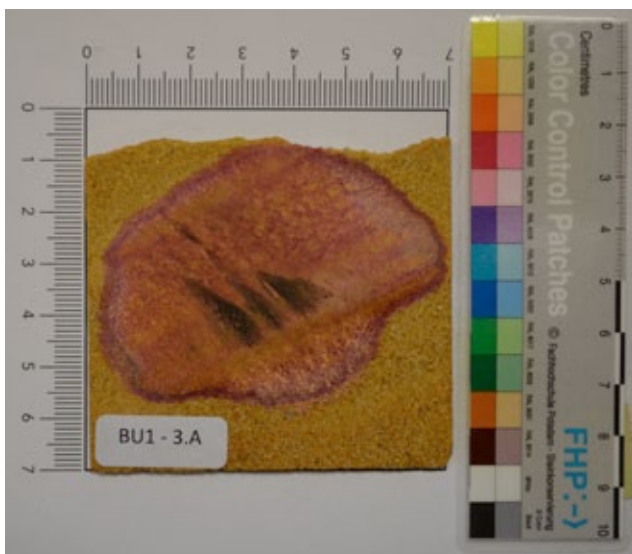


Abb. 81: BU1 - 3.A

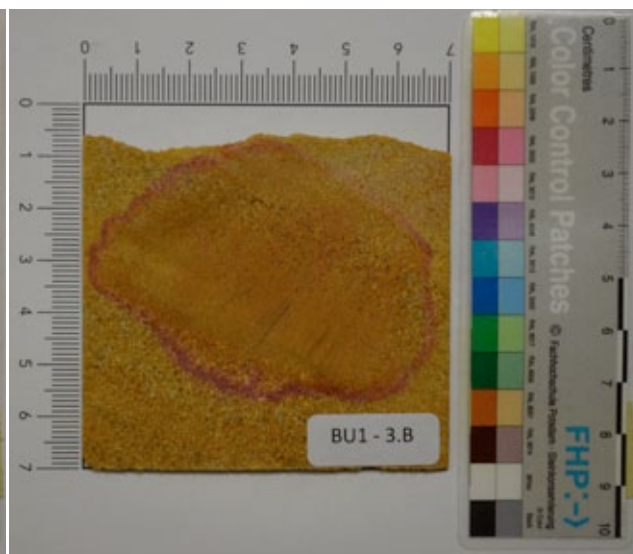


Abb. 82: BU1 - 3.B

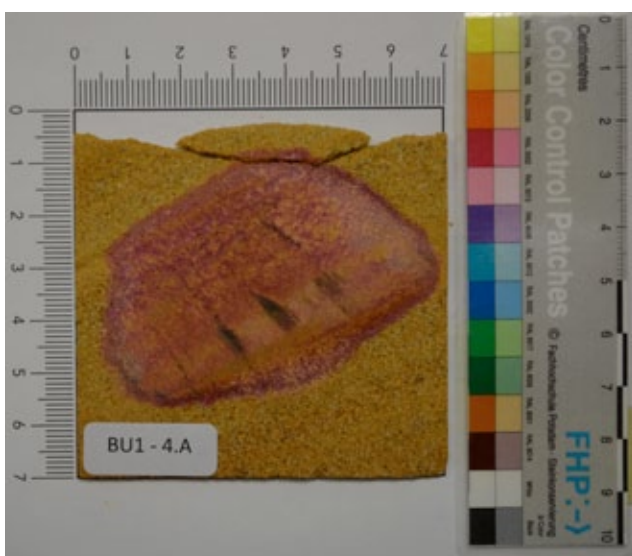


Abb. 83: BU1 - 4.A

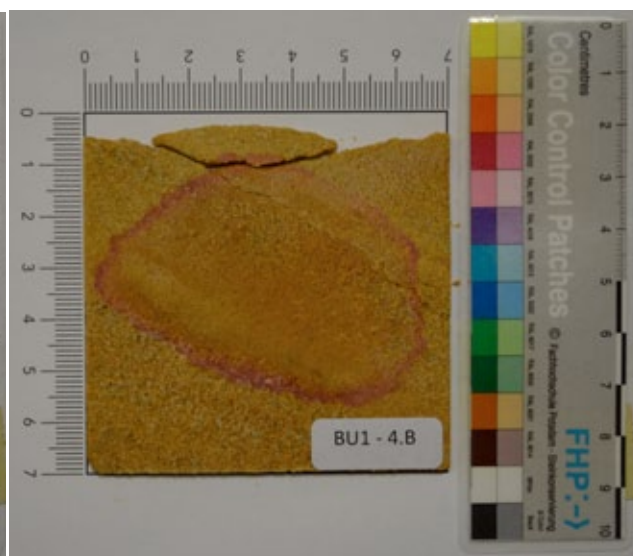


Abb. 84: BU1 - 4.B

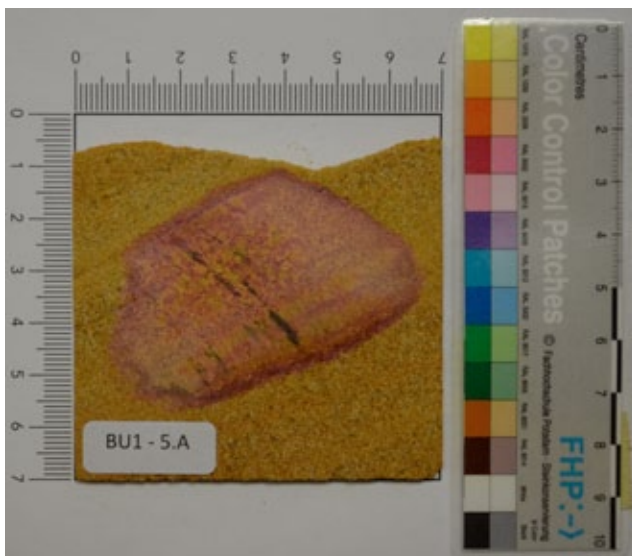


Abb. 85: BU1 - 5.A

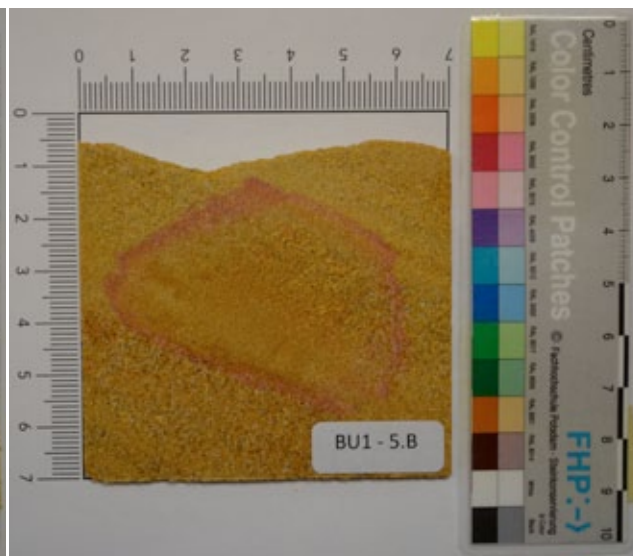


Abb. 86: BU1 - 5.B



Abb. 87: BU1 - 6.A

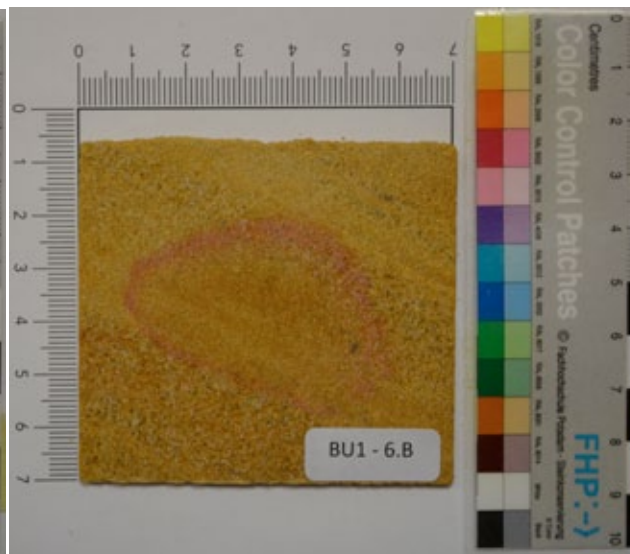


Abb. 88: BU1 - 6.B

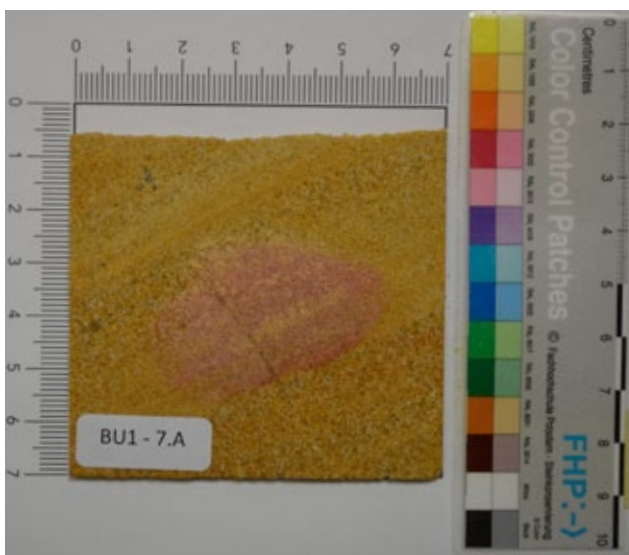


Abb. 89: BU1 - 7.A

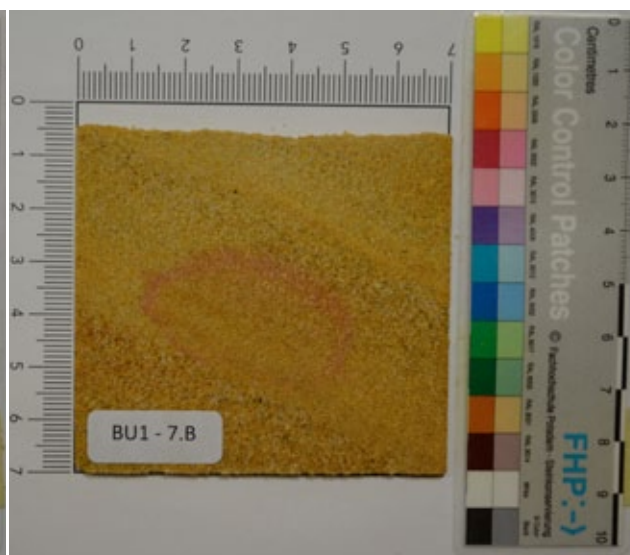


Abb. 90: BU1 - 7.B

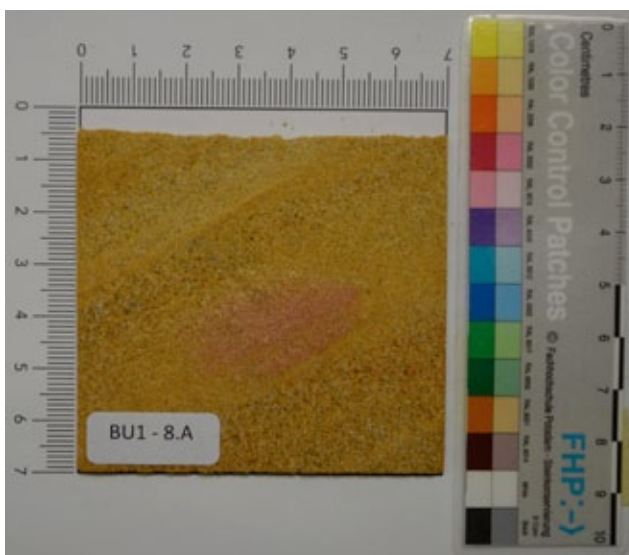


Abb. 91: BU1 - 8.A

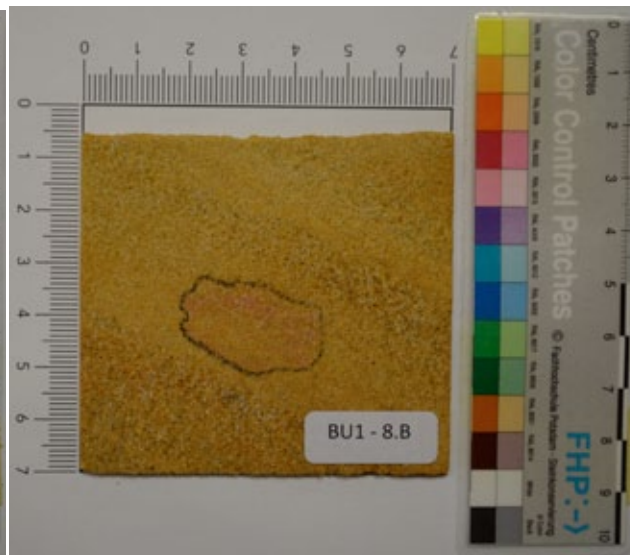


Abb. 92: BU1 - 8.B

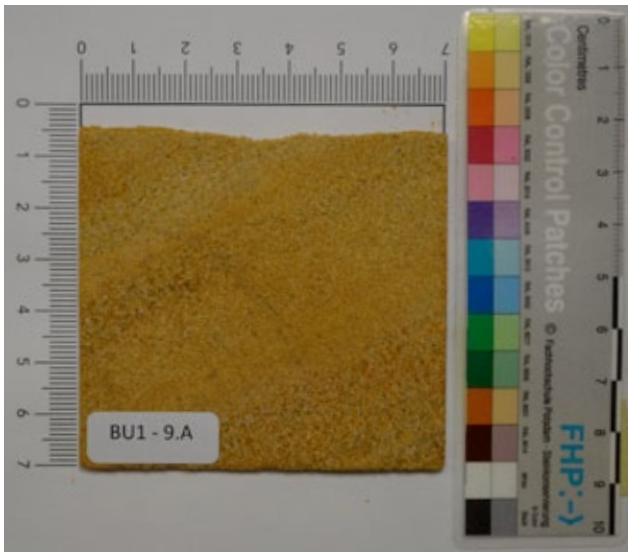


Abb. 93: BU1 - 9.A

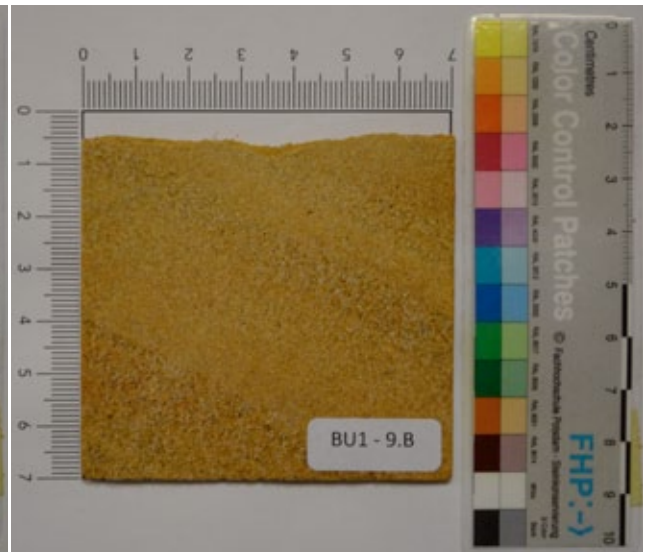


Abb. 94: BU1 - 9.B

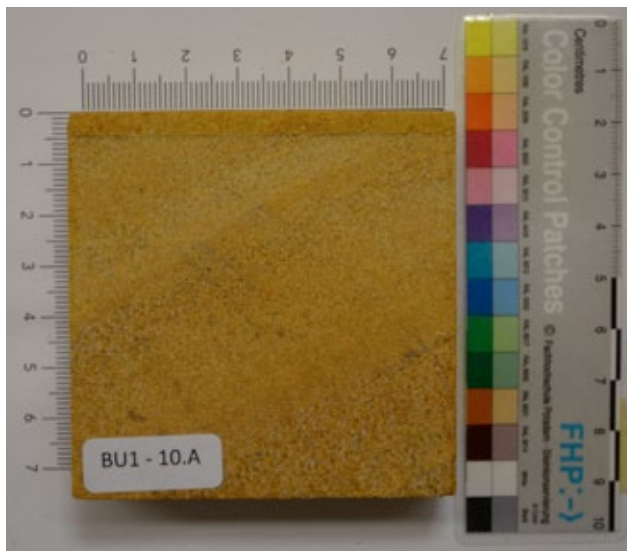


Abb. 95: BU1 - 10.A

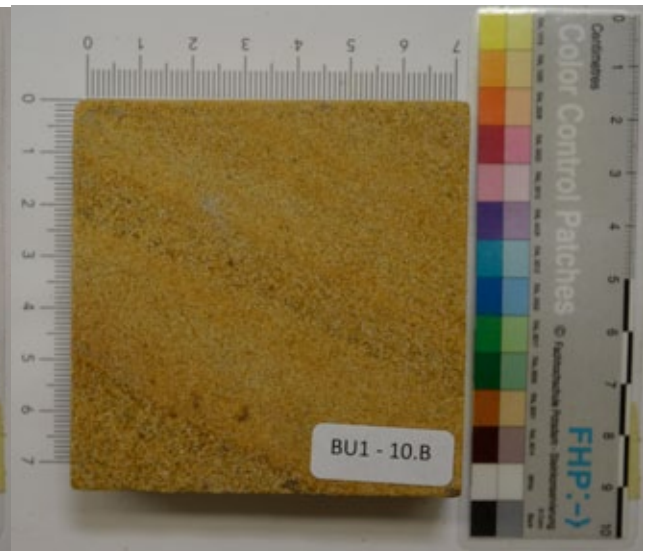


Abb. 96: BU1 - 10.B

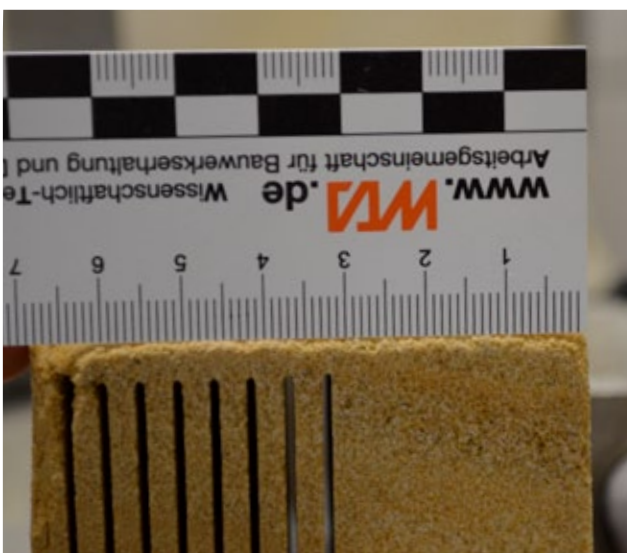


Abb. 97: BU1 - Sägeschnitte seitlich 1

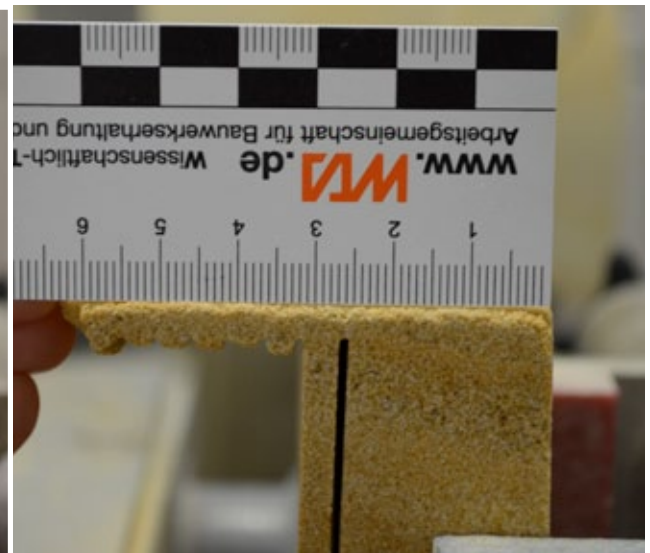


Abb. 98: BU1 - Sägeschnitte seitlich 2

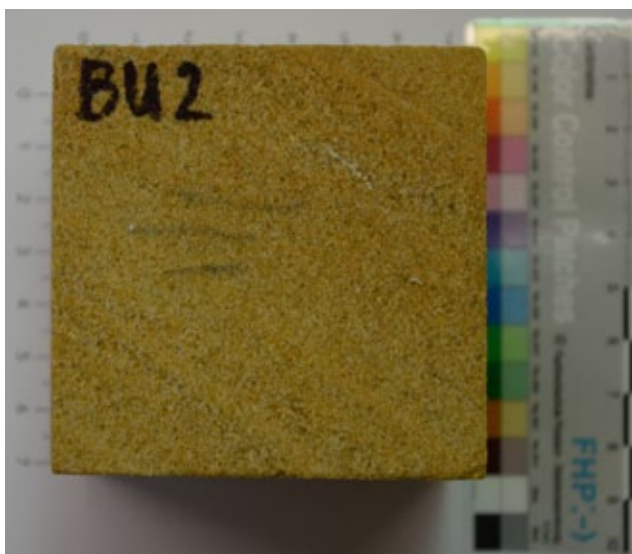


Abb. 99: BU2 - Oberfläche

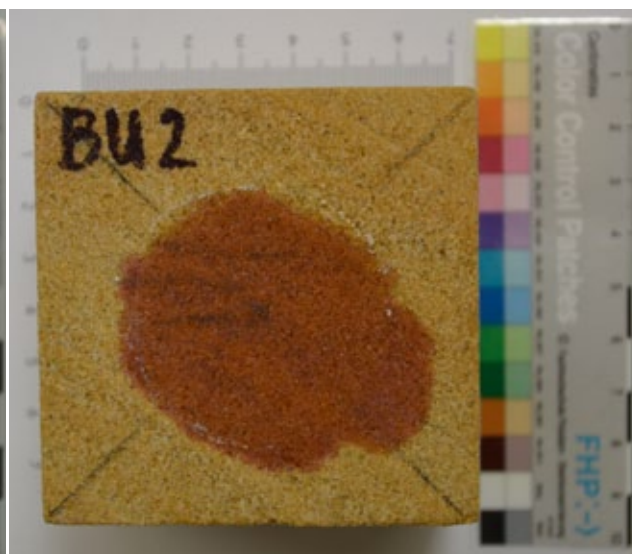


Abb. 100: BU2 - Oberfläche angefärbt

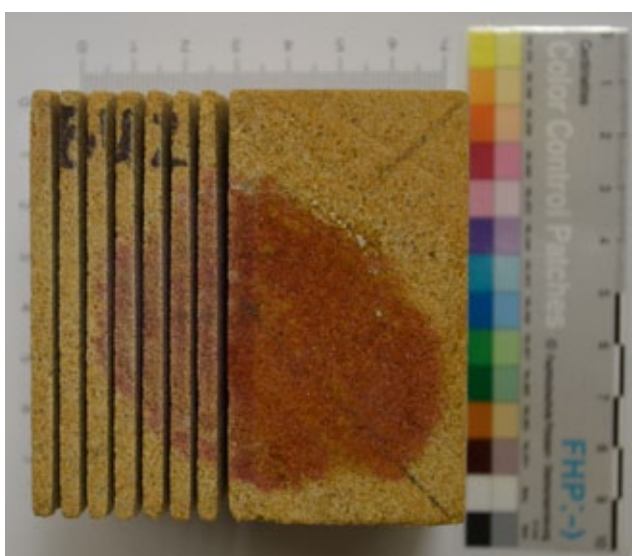


Abb. 101: BU2 - Oberfläche eingeschnitten

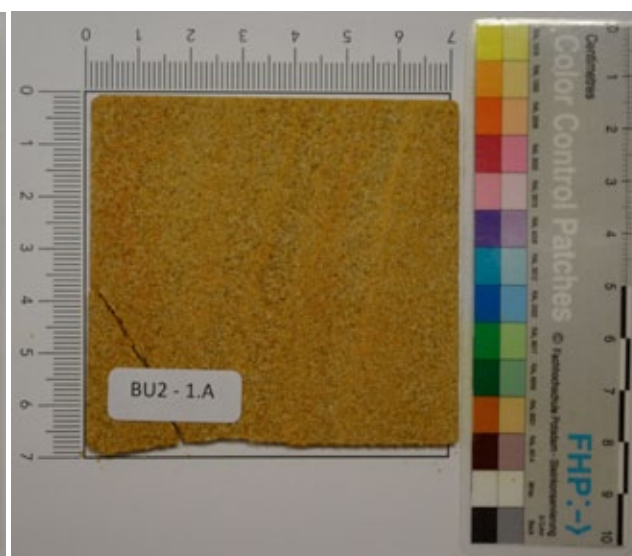


Abb. 102: BU2 - 1.A

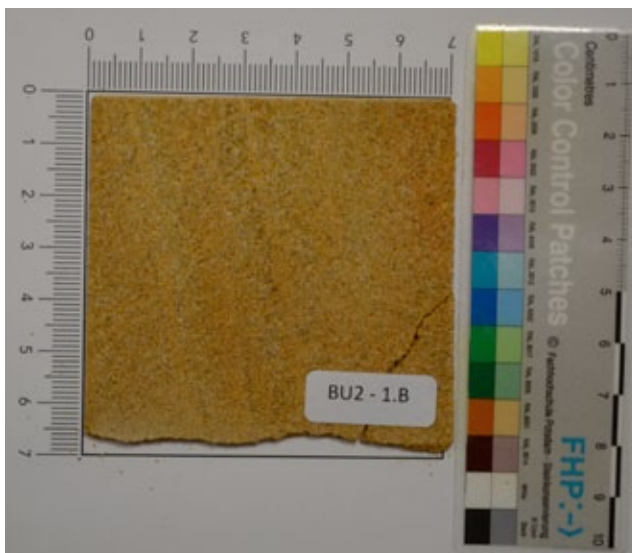


Abb. 103: BU2 - 1.B

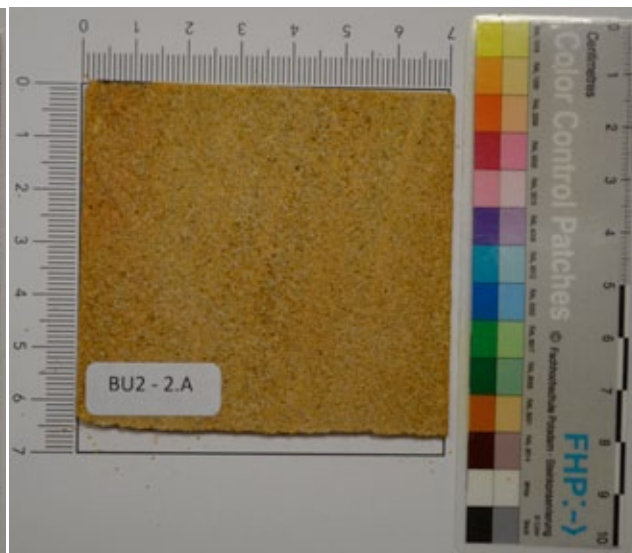


Abb. 104: BU2 - 2.A

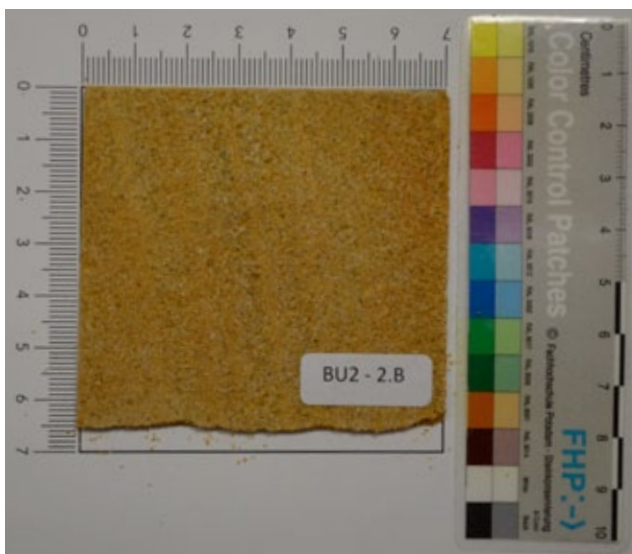


Abb. 105: BU2 - 2.B

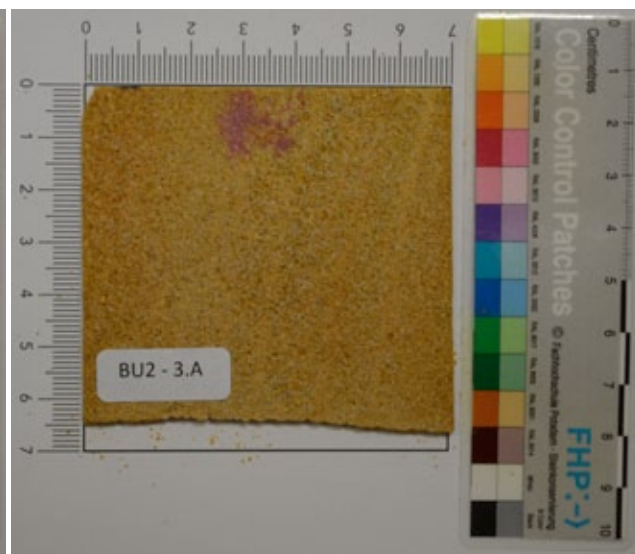


Abb. 106: BU2 - 3.A

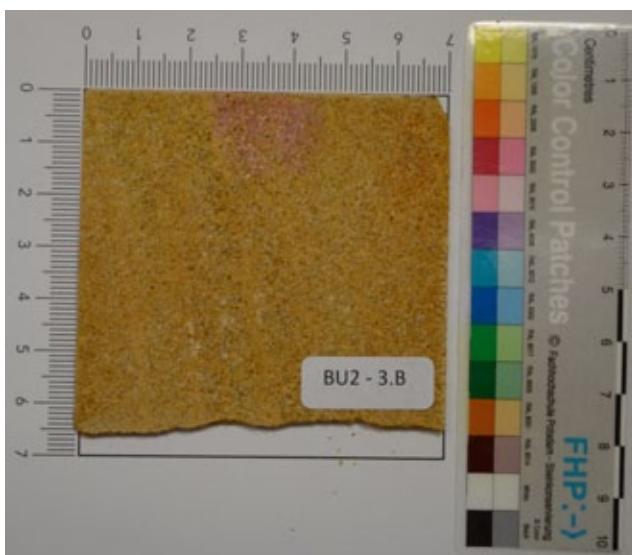


Abb. 107: BU2 - 3.B

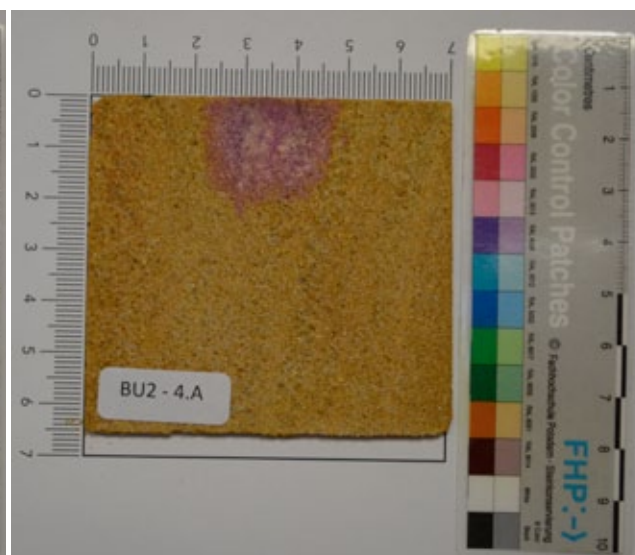


Abb. 108: BU2 - 4.A

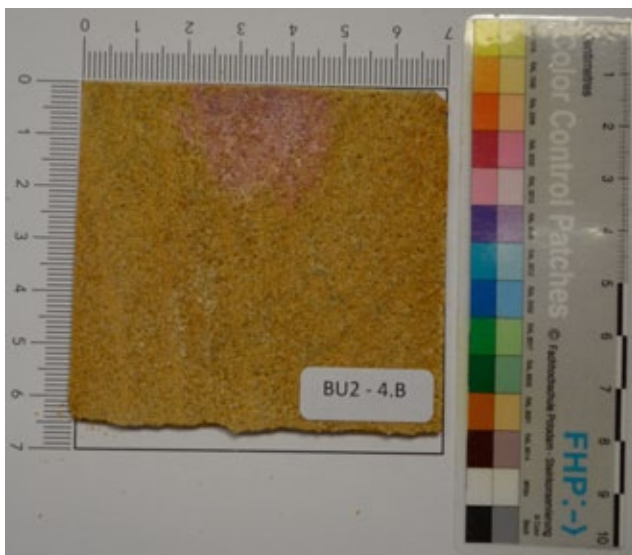


Abb. 109: BU2 - 4.B

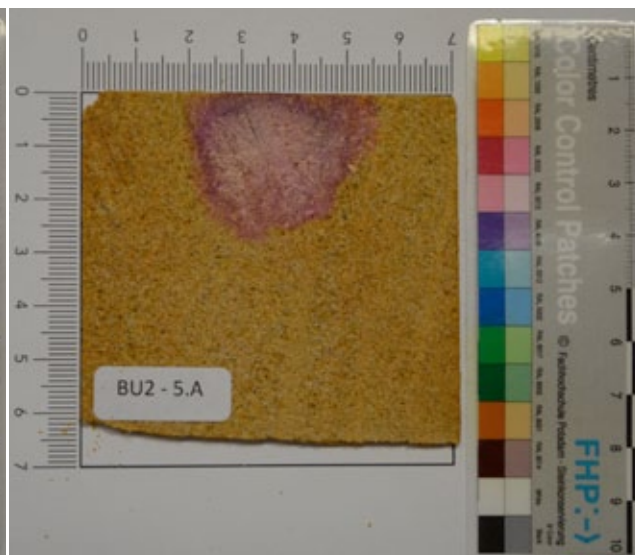


Abb. 110: BU2 - 5.A

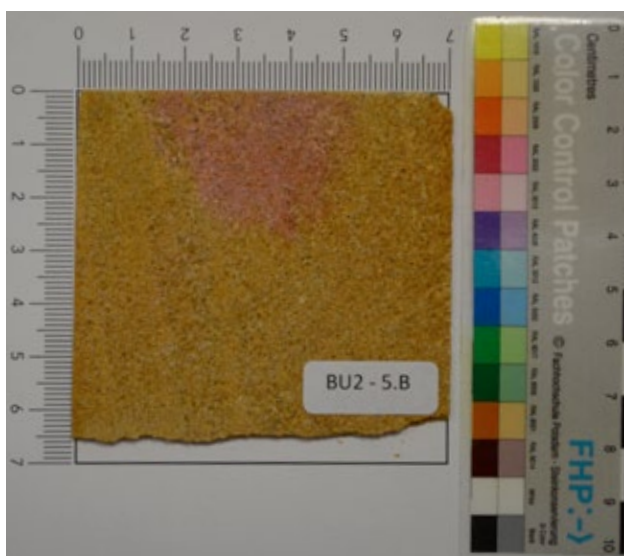


Abb. 111: BU2 - 5.B

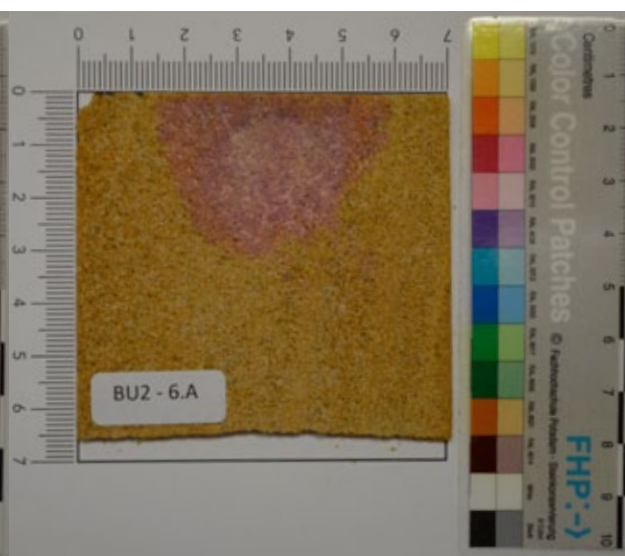


Abb. 112: BU2 - 6.A

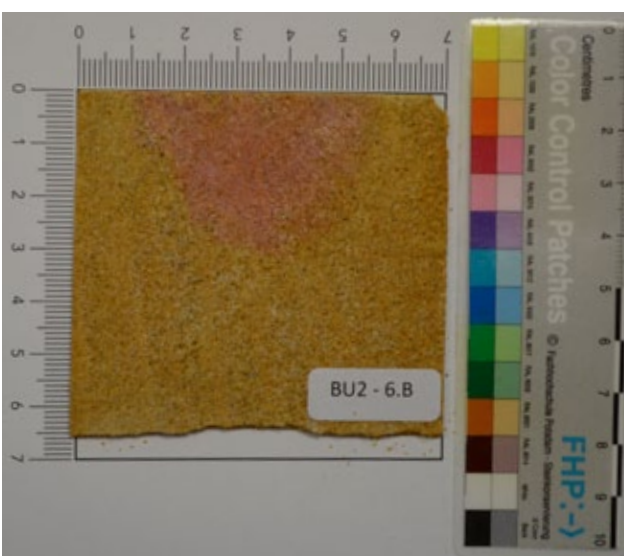


Abb. 113: BU2 - 6.B

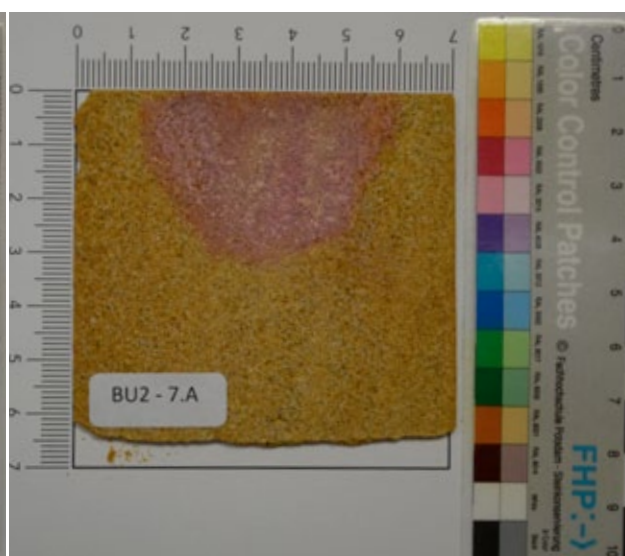


Abb. 114: BU2 - 7.A

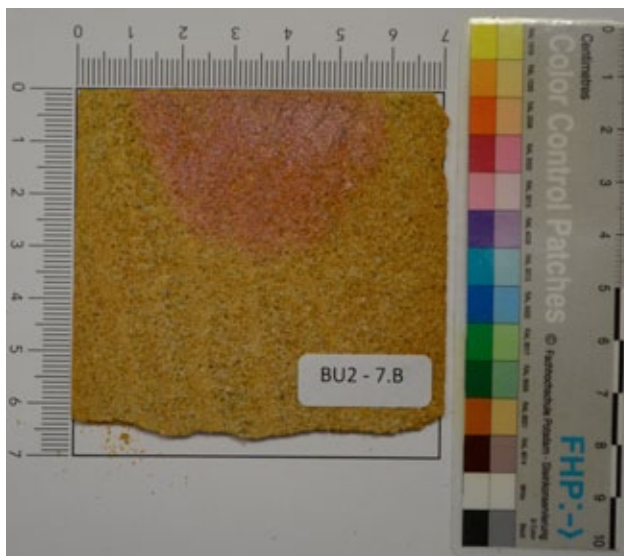


Abb. 115: BU2 - 7.B

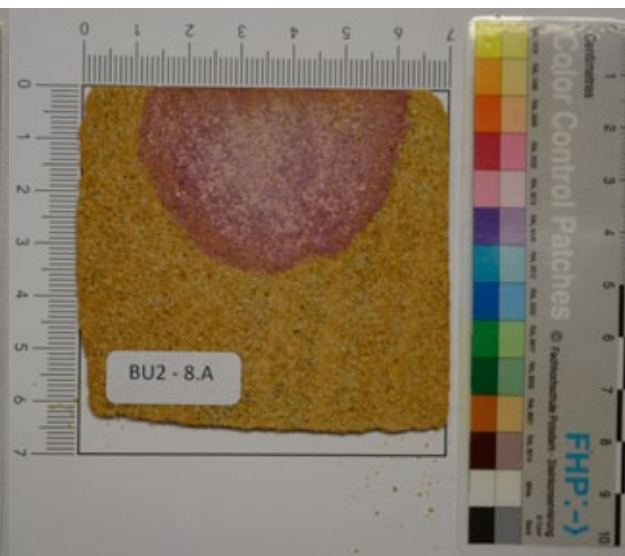


Abb. 116: BU2 - 8.A

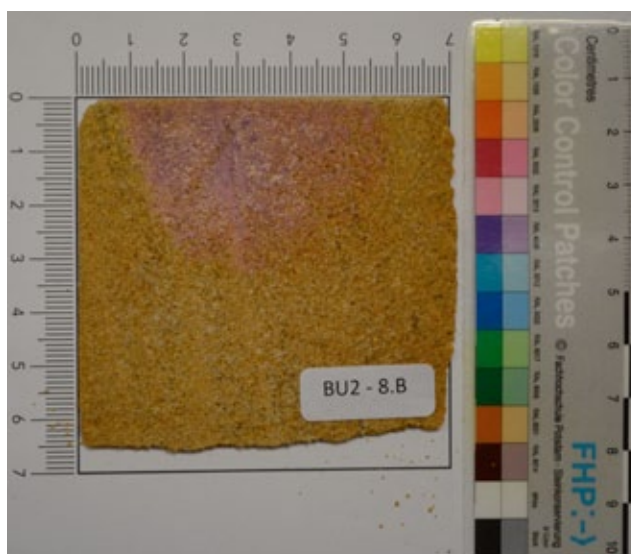


Abb. 117: BU2 - 8.B

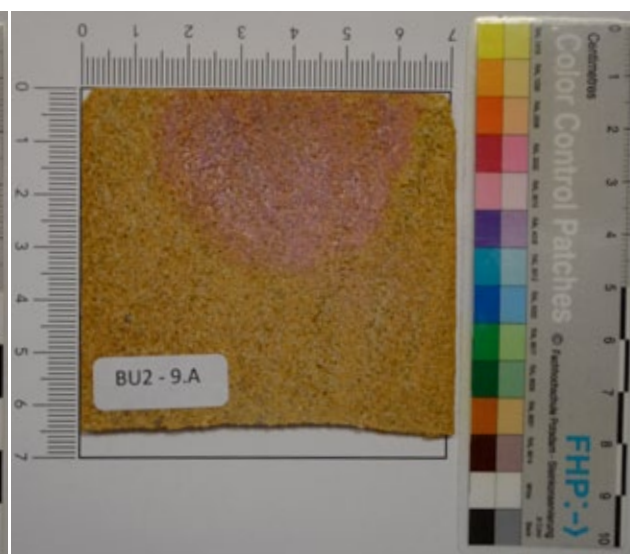


Abb. 118: BU2 - 9.A (Mitte)

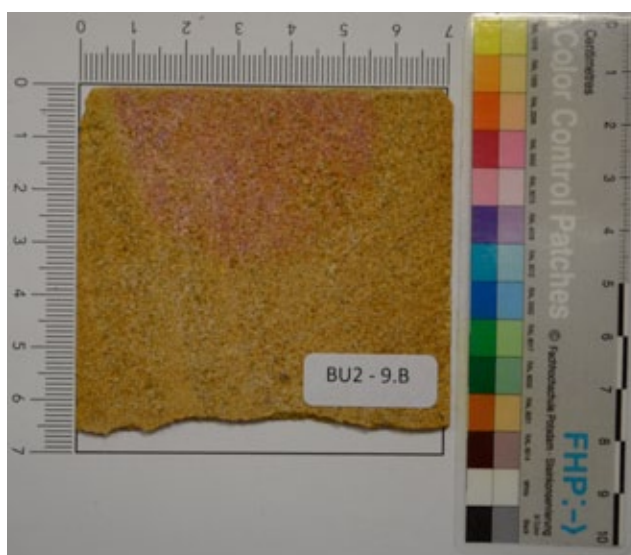


Abb. 119: BU2 - 9.B

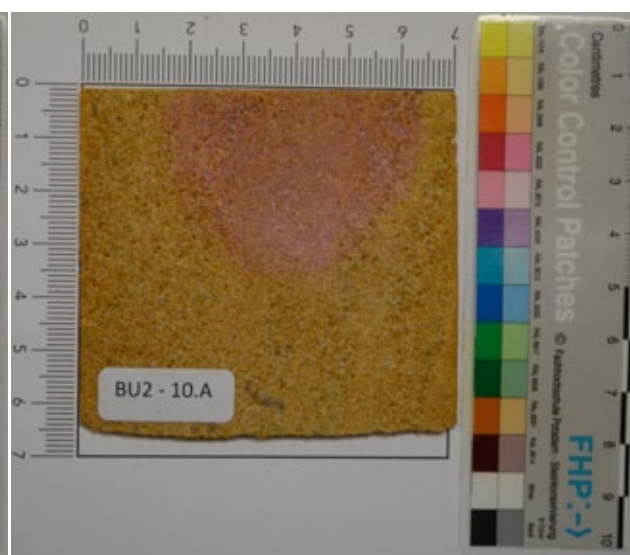


Abb. 120: BU2 - 10.A

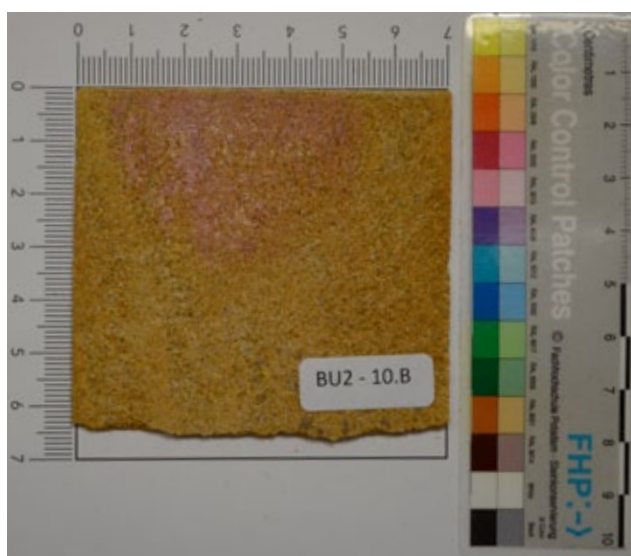


Abb. 121: BU2 - 10.B

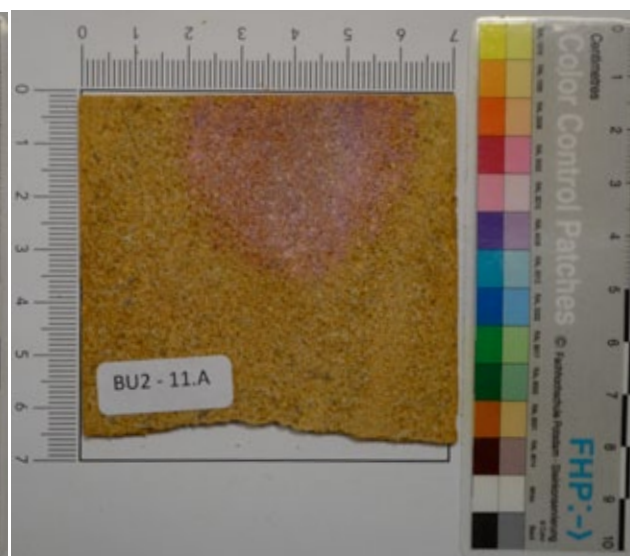


Abb. 122: BU2 - 11.A

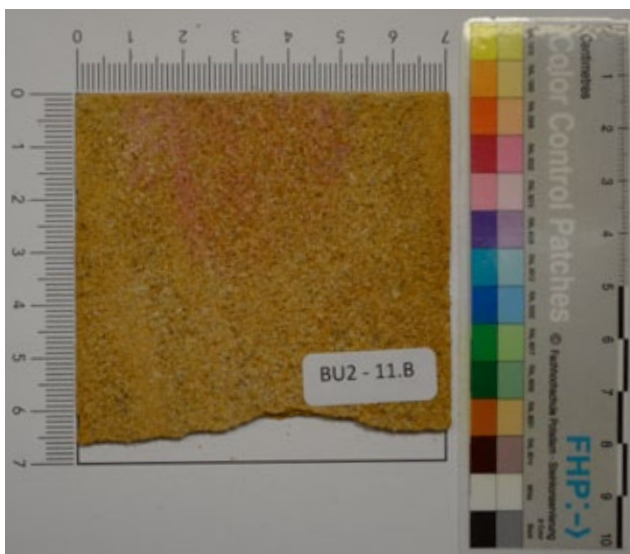


Abb. 123: BU2 - 11.B

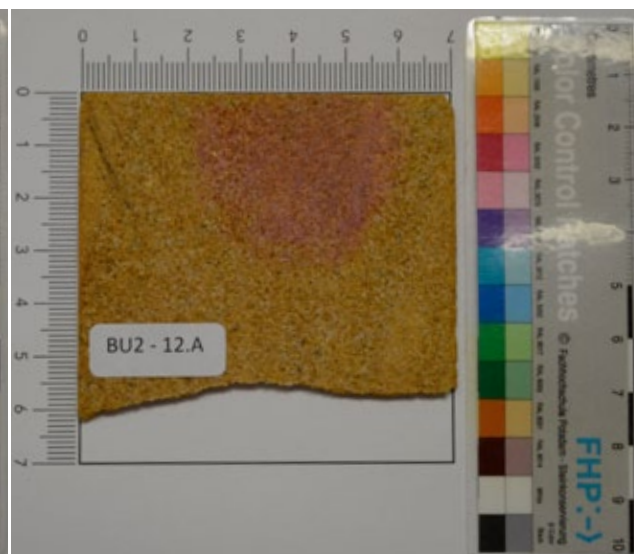


Abb. 124: BU2 - 12.A

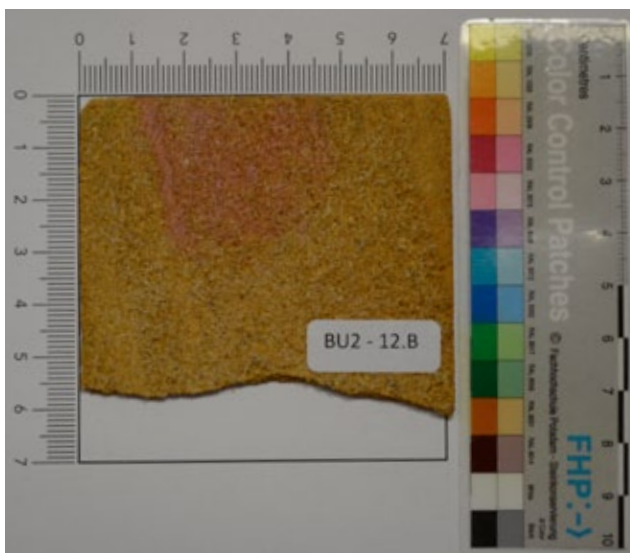


Abb. 125: BU2 - 12.B

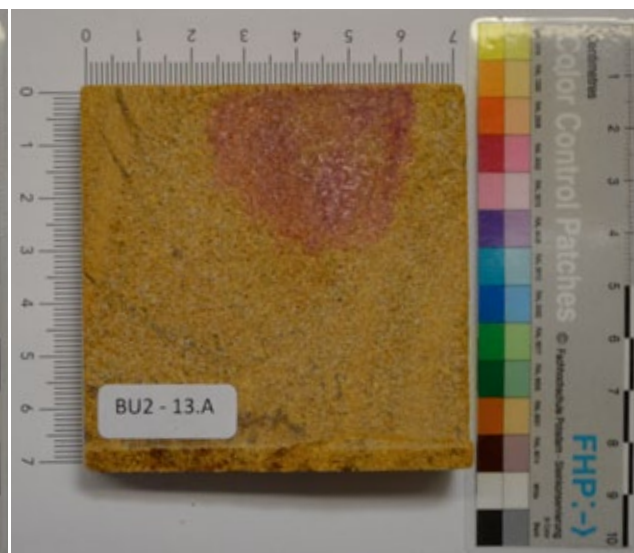


Abb. 126: BU2 - 13.A

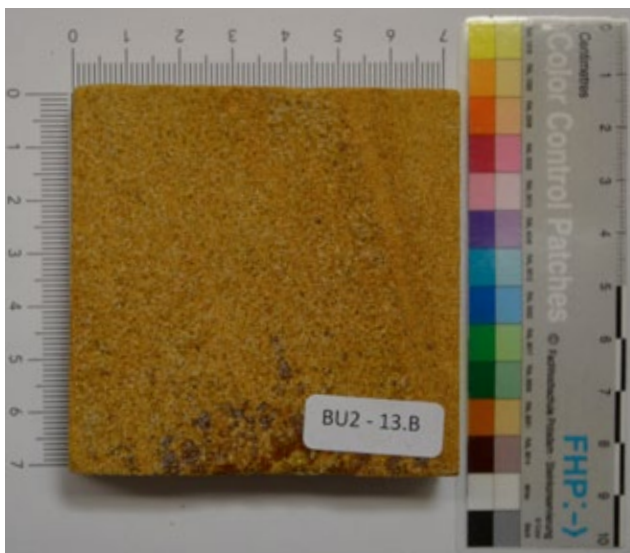


Abb. 127: BU2 - 13.B



Abb. 128: BU2 - Sägeschnitte seitlich 1

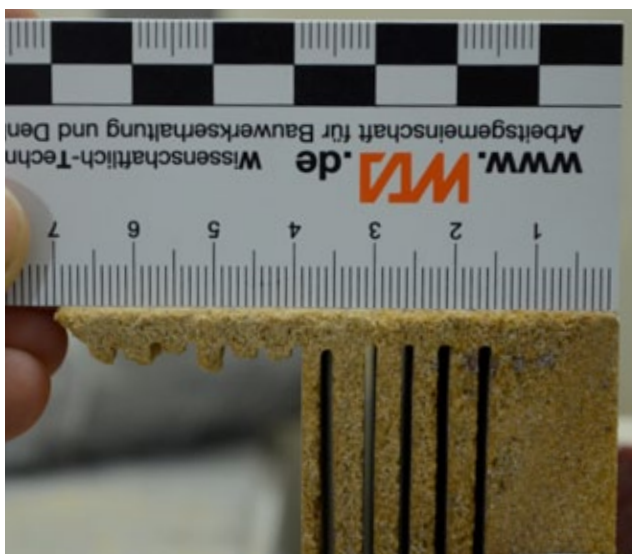


Abb. 129: BU2 - Sägeschnitte seitlich 2



Abb. 130: BU3 - Oberfläche angefärbt

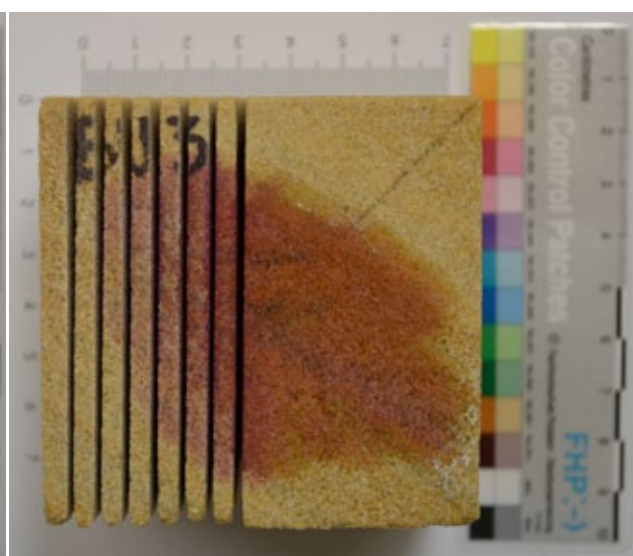


Abb. 131: BU3 - Oberfläche eingeschnitten



Abb. 132: BU3 - 1.A

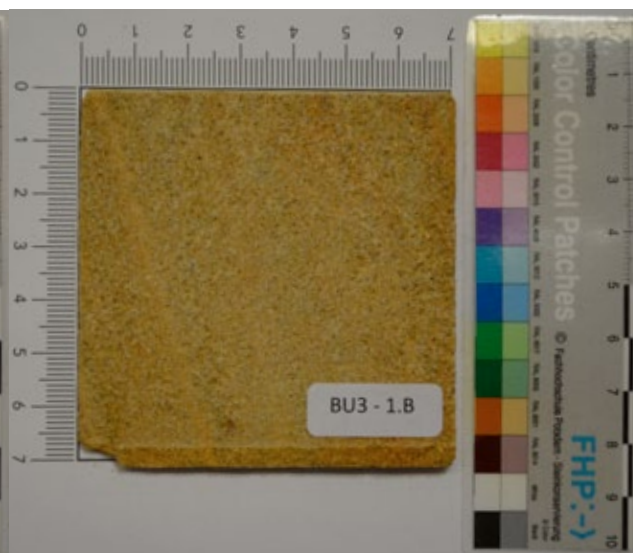


Abb. 133: BU3 - 1.B

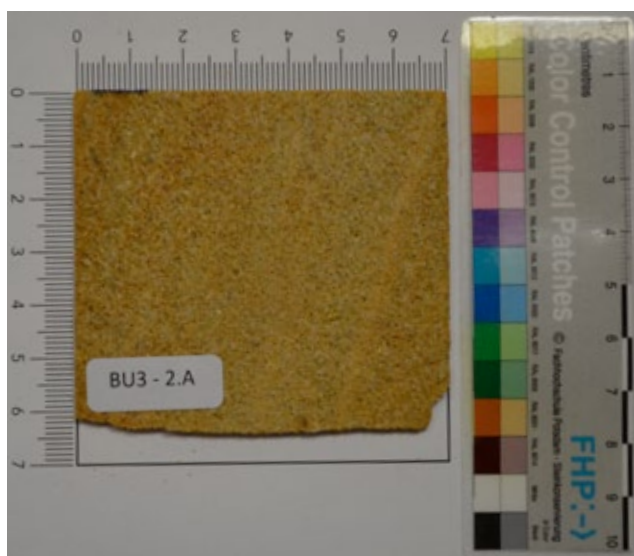


Abb. 134: BU3 - 2.A

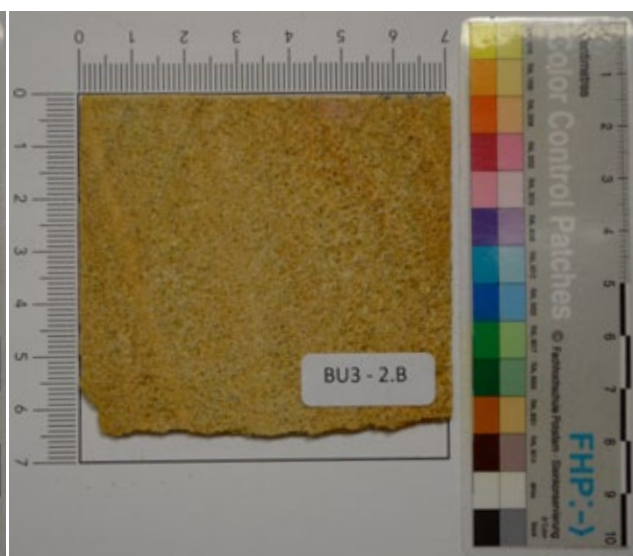


Abb. 135: BU3 - 2.B

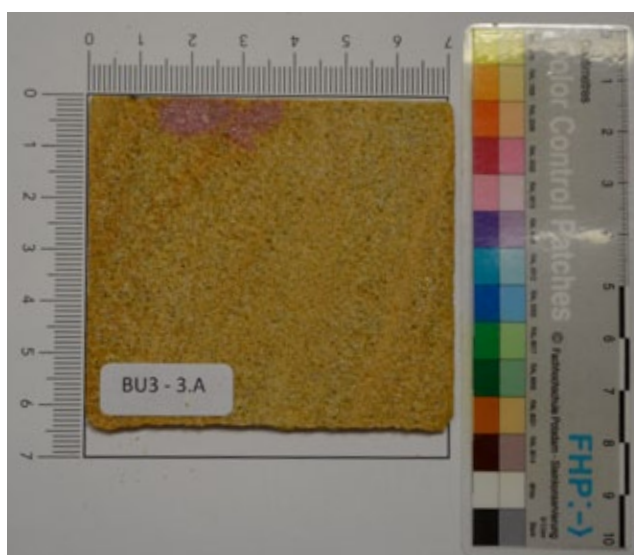


Abb. 136: BU3 - 3.A

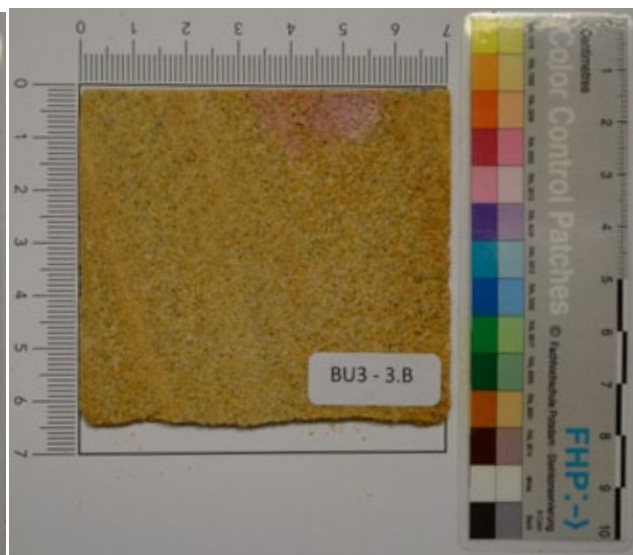


Abb. 137: BU3 - 3.B

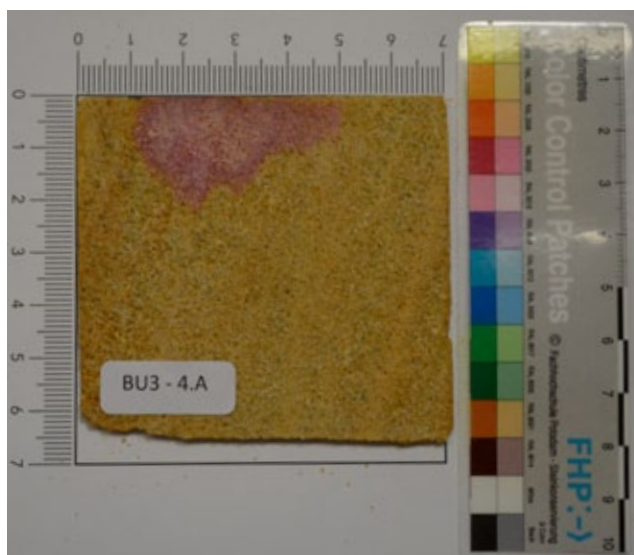


Abb. 138: BU3 - 4.A

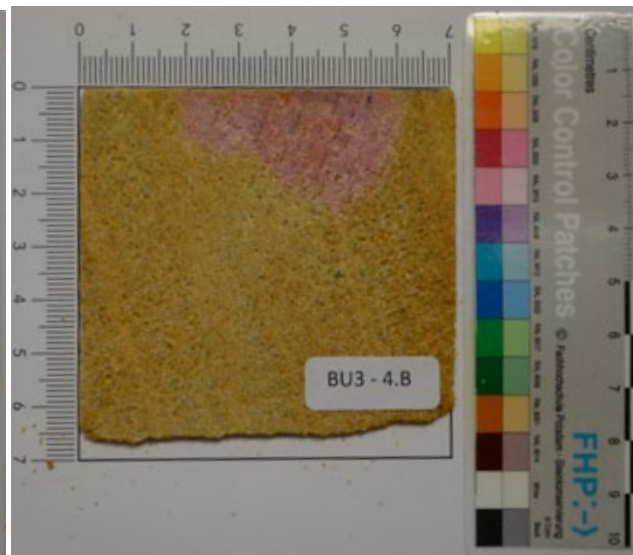


Abb. 139: BU3 - 4.B

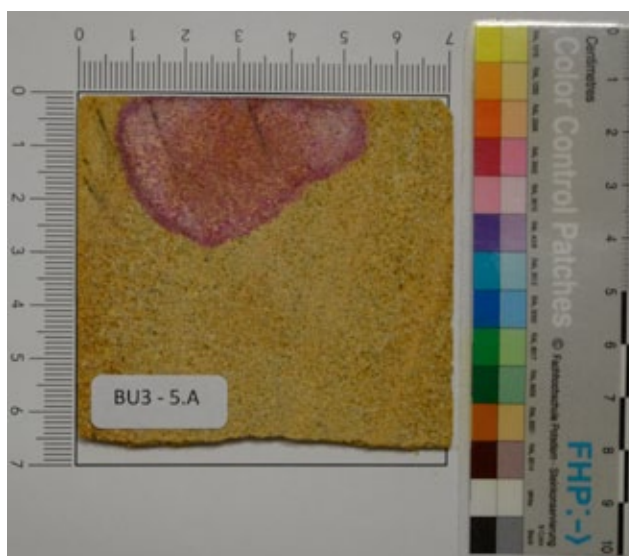


Abb. 140: BU3 - 5.A

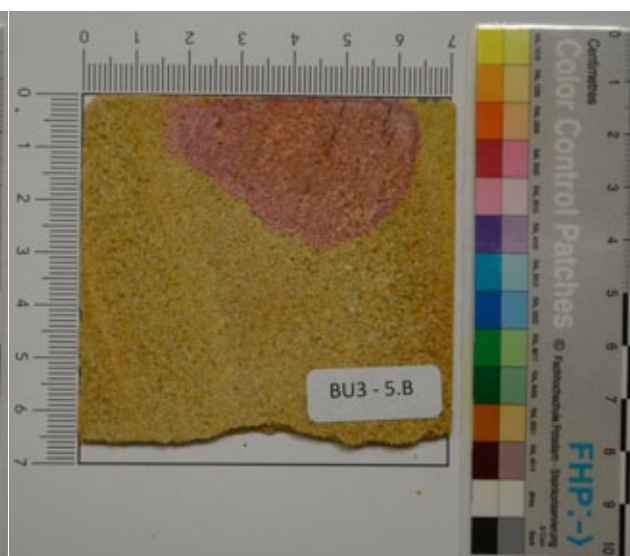


Abb. 141: BU3 - 5.B

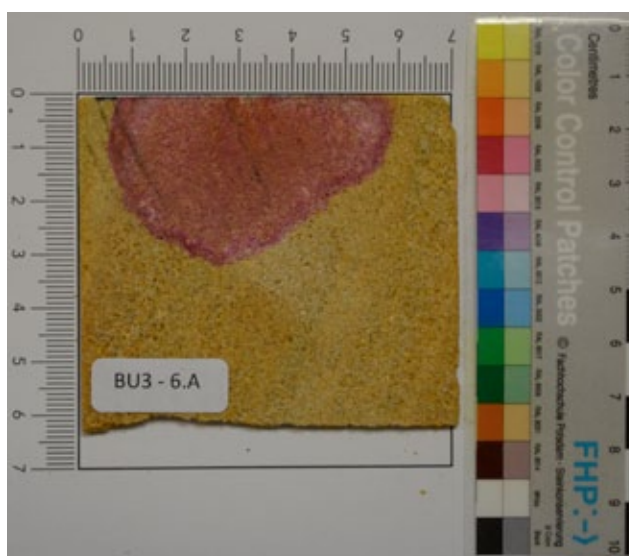


Abb. 142: BU3 - 6.A

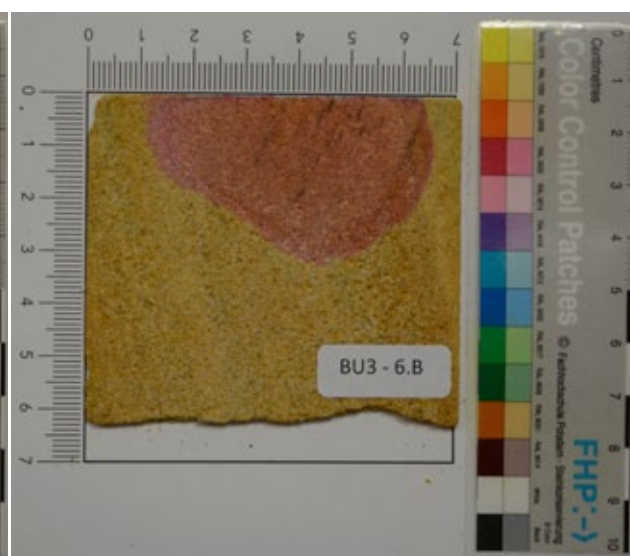


Abb. 143: BU3 - 6.B

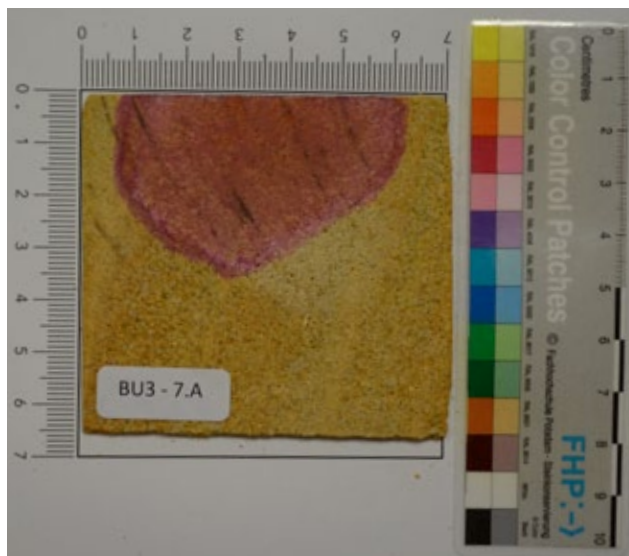


Abb. 144: BU3 - 7.A

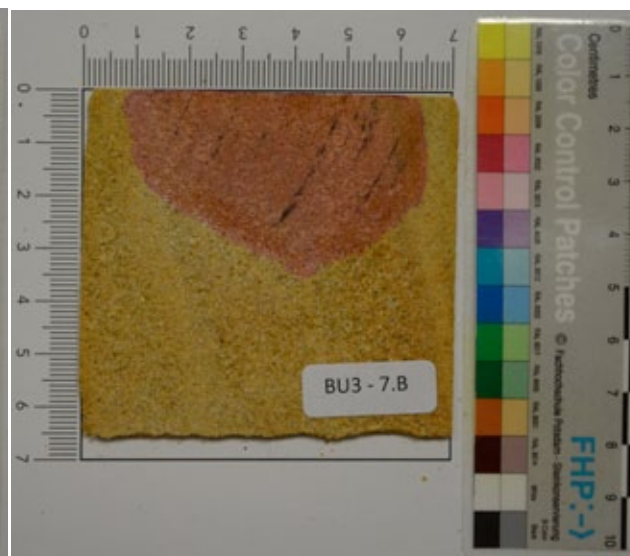


Abb. 145: BU3 - 7.B

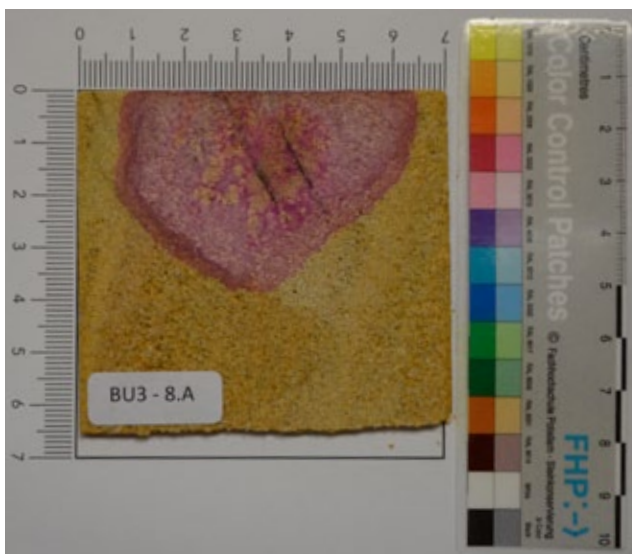


Abb. 146: BU3 - 8.A

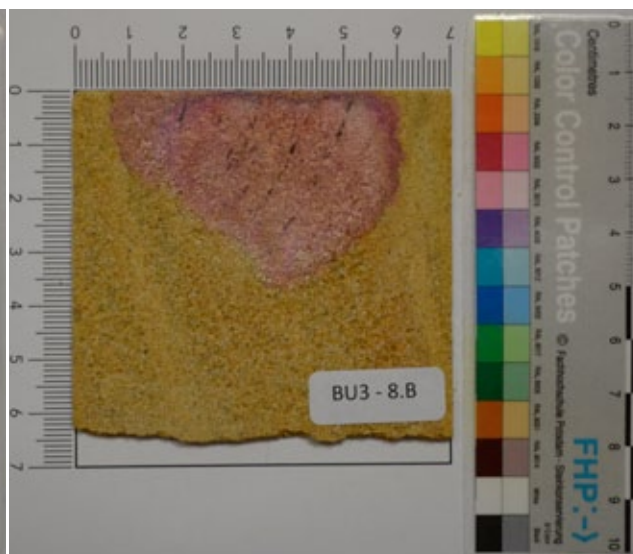


Abb. 147: BU3 - 8.B (Mitte)

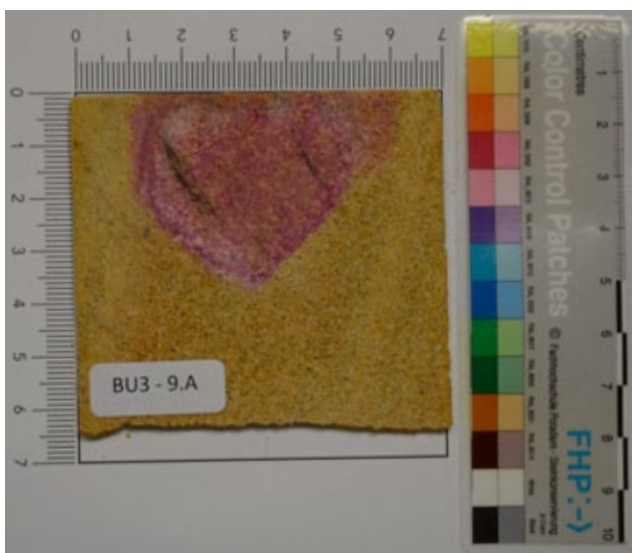


Abb. 148: BU3 - 9.A

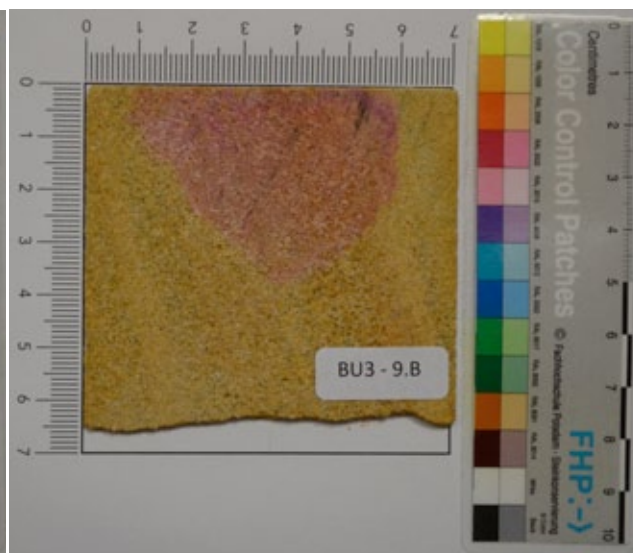


Abb. 149: BU3 - 9.B

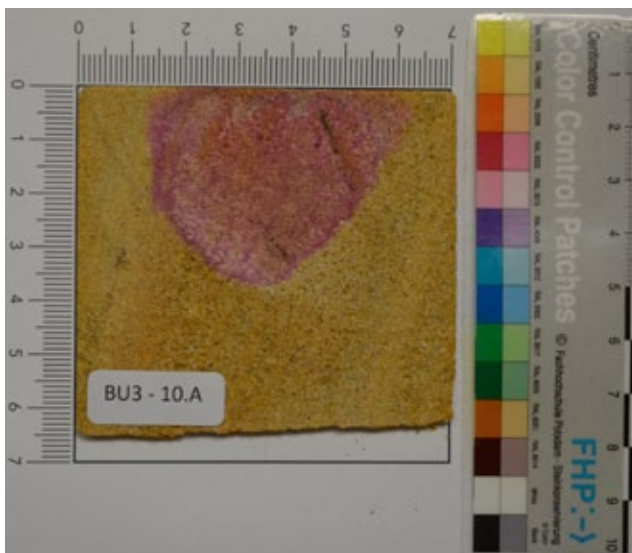


Abb. 150: BU3 - 10.A

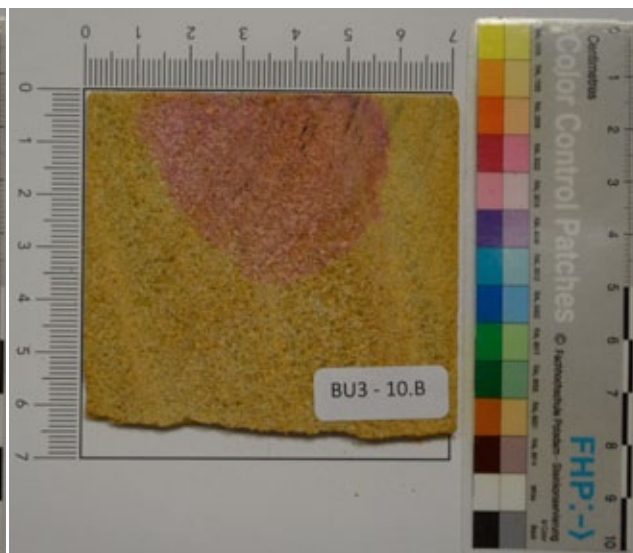


Abb. 151: BU3 - 10.B

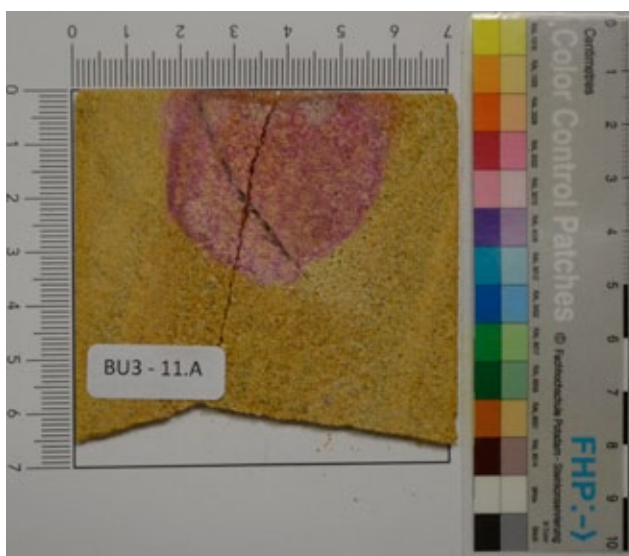


Abb. 152: BU3 - 11.A

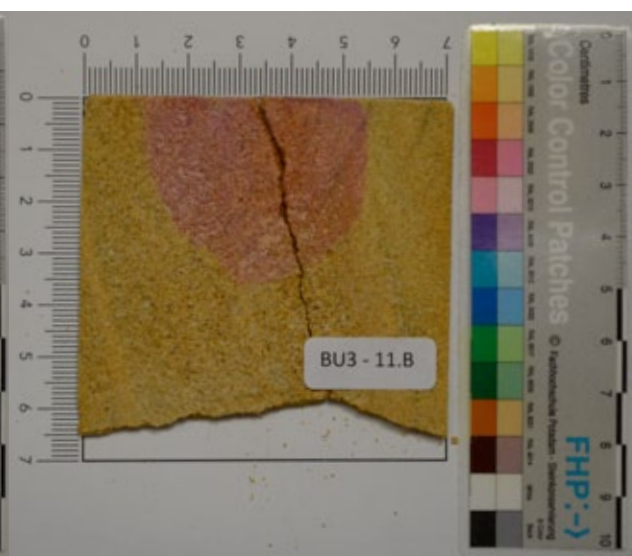


Abb. 153: BU3 - 11.B

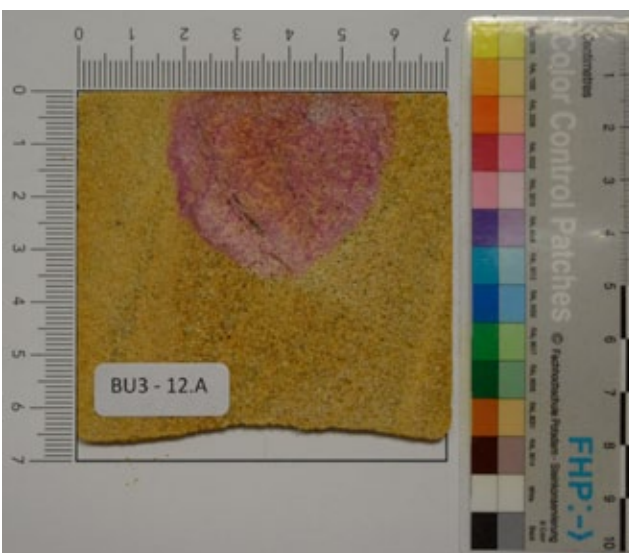


Abb. 154: BU3 - 12.A

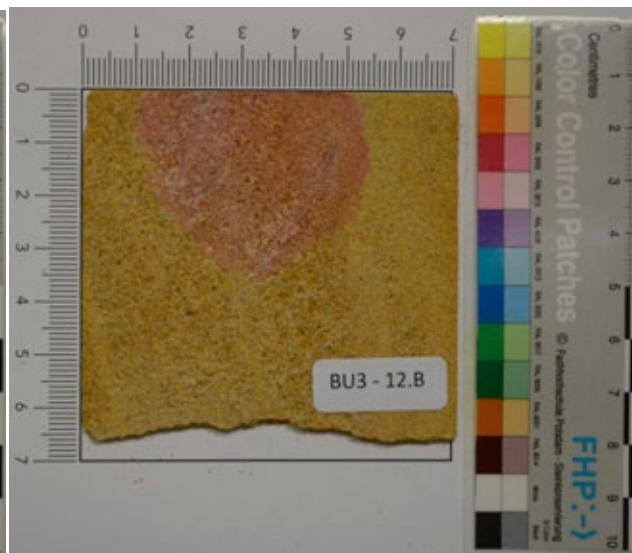


Abb. 155: BU3 - 12.B

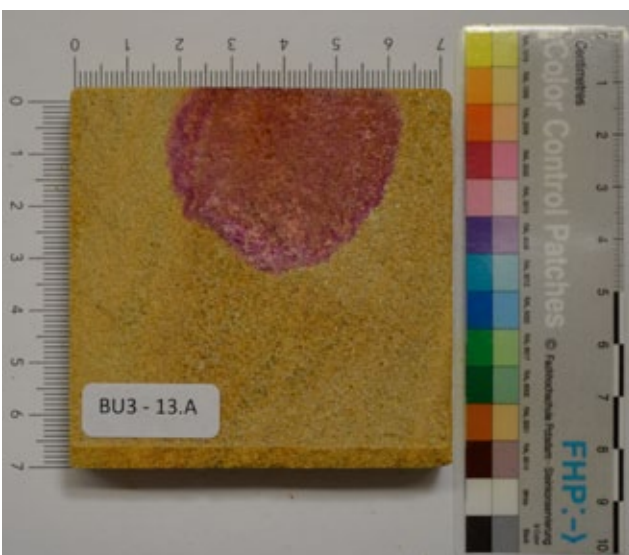


Abb. 156: BU3 - 13.A

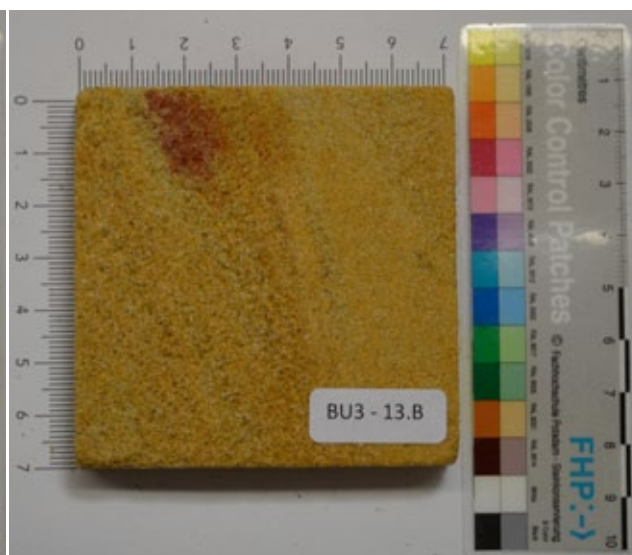


Abb. 157: BU3 - 13.B

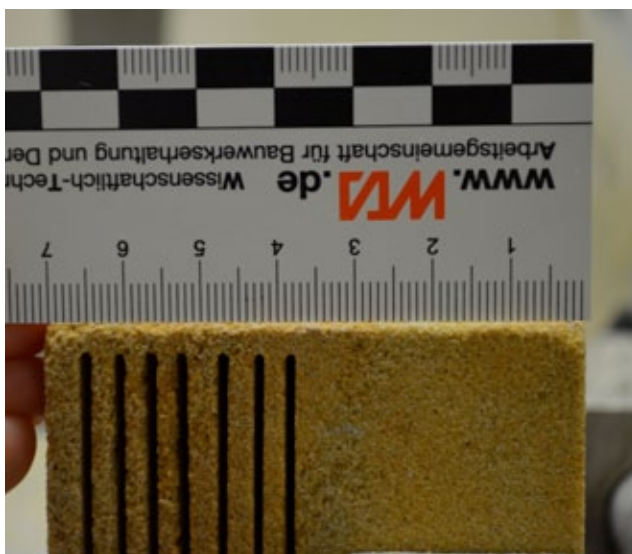


Abb. 158: BU3 - Sägeschnitte seitlich 1

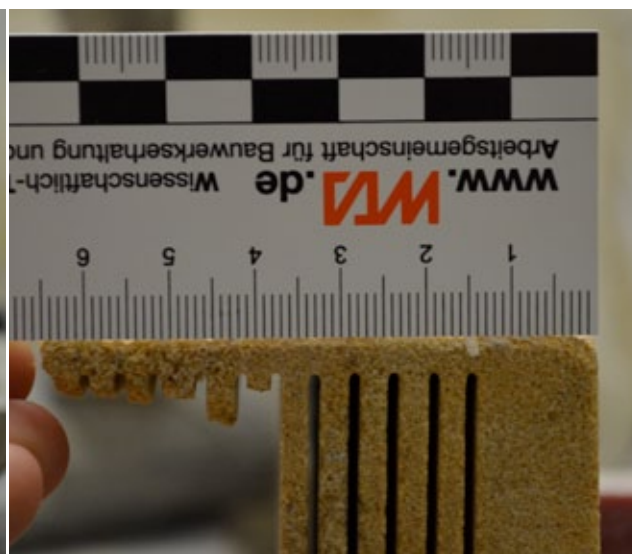


Abb. 159: BU3 - Sägeschnitte seitlich 2



Abb. 160: BU4 - Oberfläche angefärbt

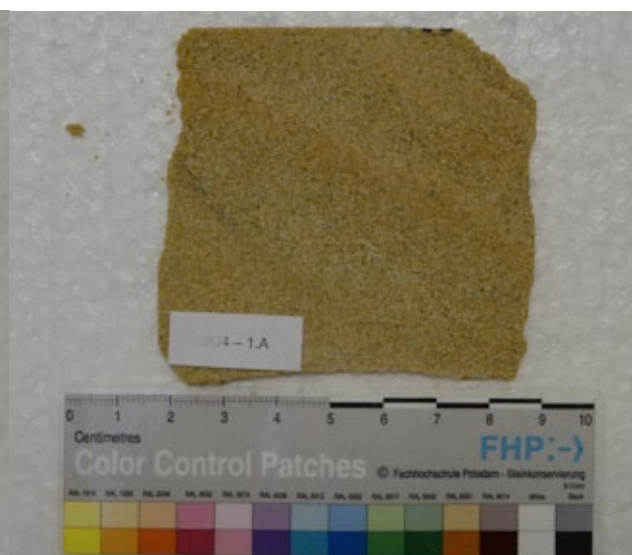


Abb. 161: BU4 - 1.A

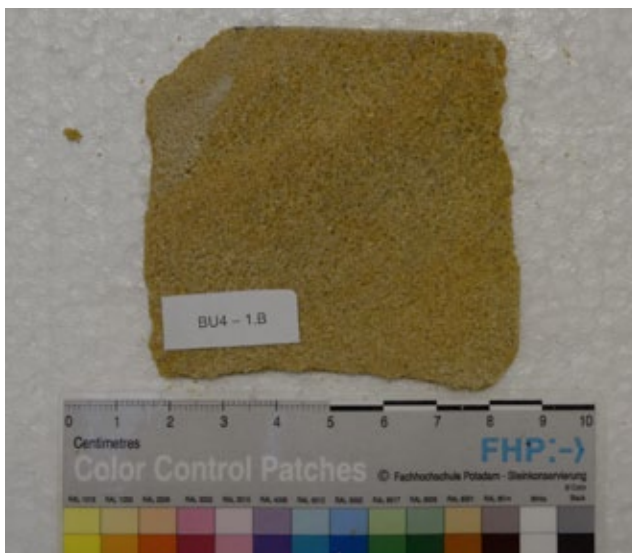


Abb. 162: BU4 - 1.B

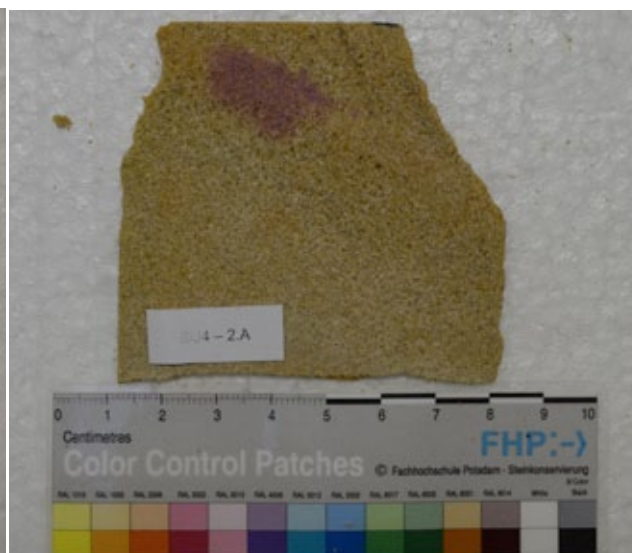


Abb. 163: BU4 - 2.A

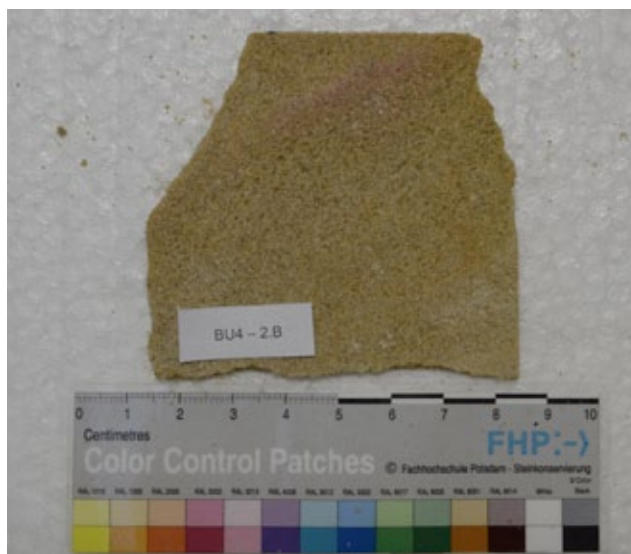


Abb. 164: BU4 - 2.B

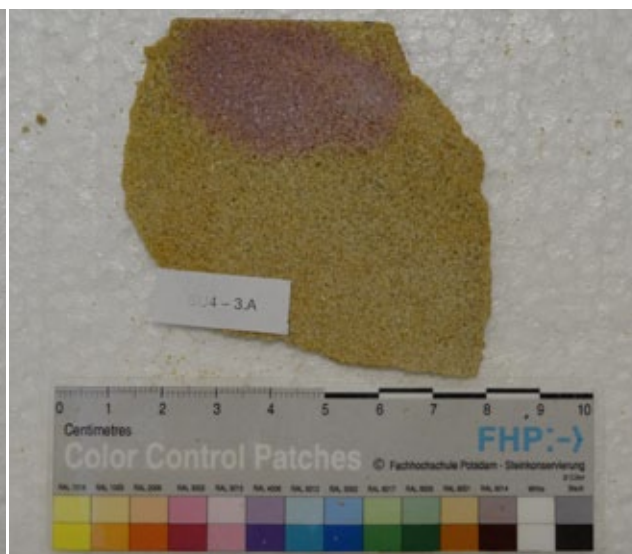


Abb. 165: BU4 - 3.A

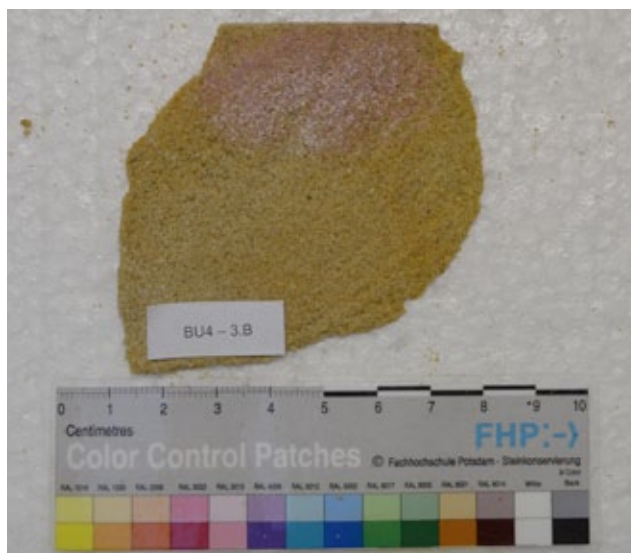


Abb. 166: BU4 - 3.B

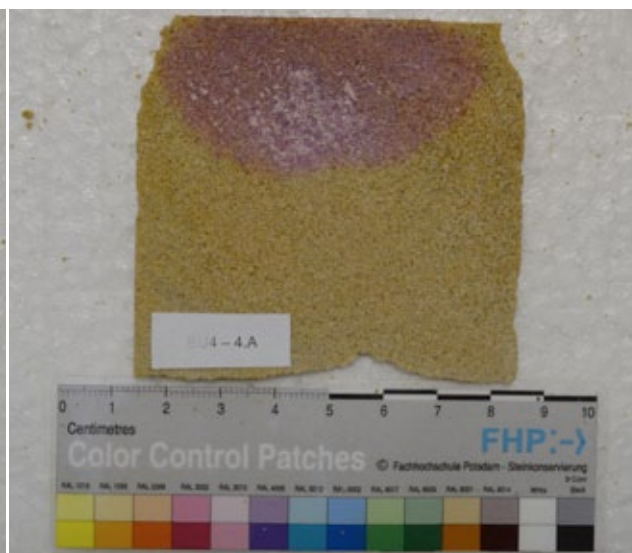


Abb. 167: BU4 - 4.A

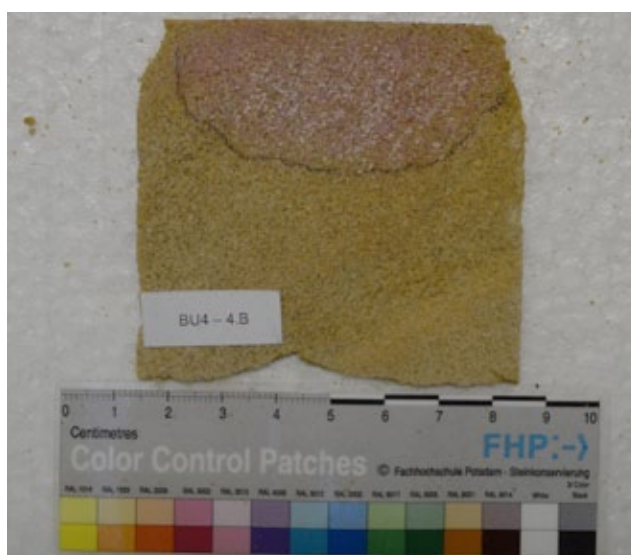


Abb. 168: BU4 - 4.B

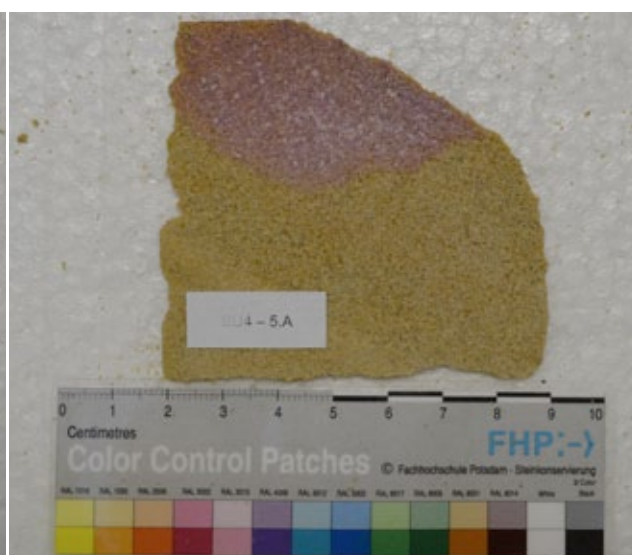


Abb. 169: BU4 - 5.A

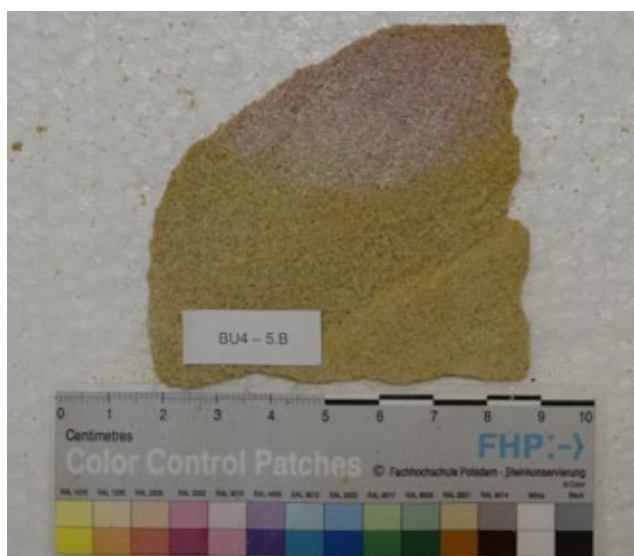


Abb. 170: BU4 - 5.B

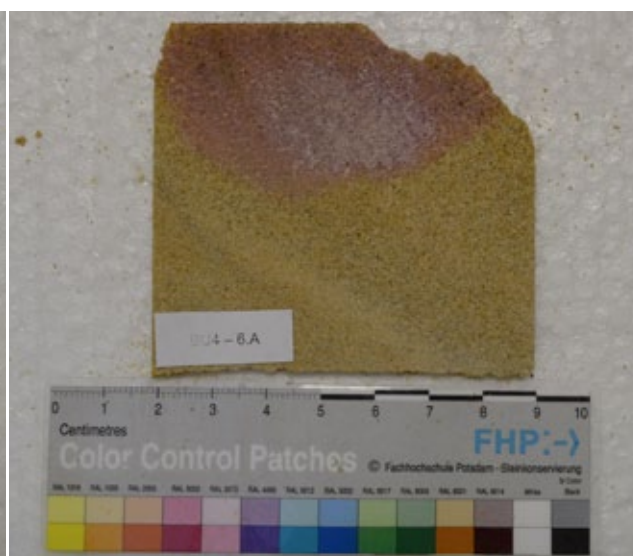


Abb. 171: BU4 - 6.A

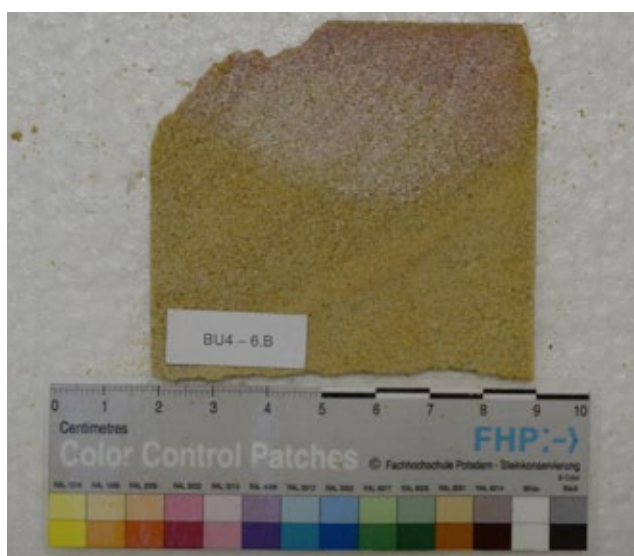


Abb. 172: BU4 - 6.B

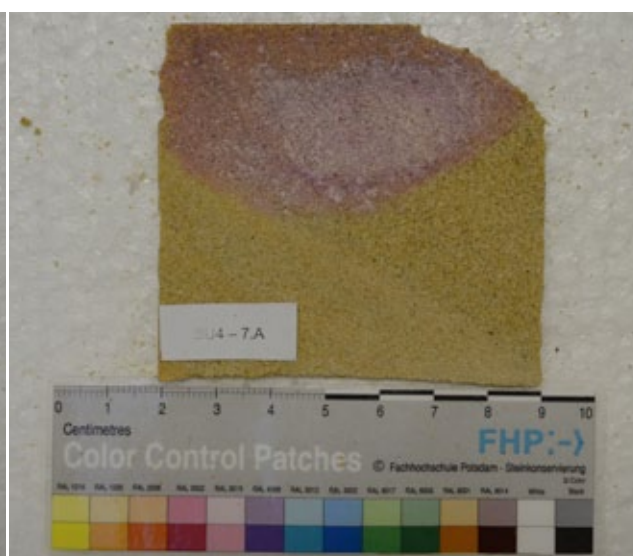


Abb. 173: BU4 - 7.A

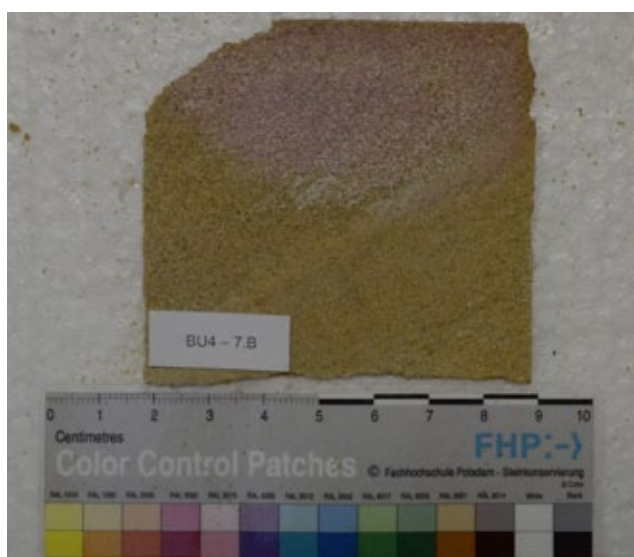


Abb. 174: BU4 - 7.B

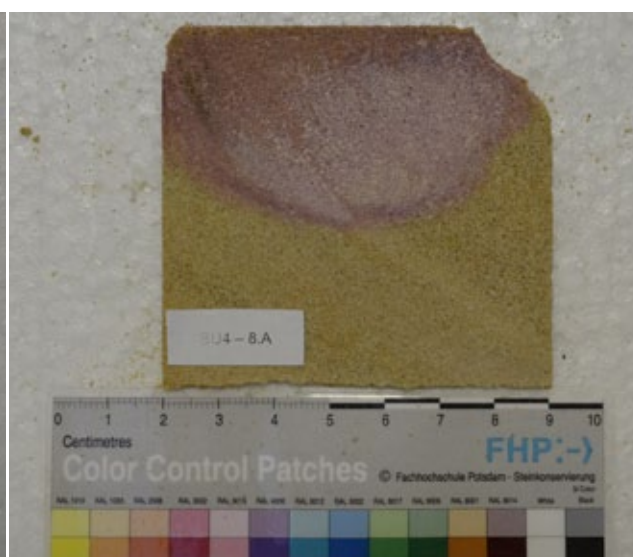


Abb. 175: BU4 - 8.A

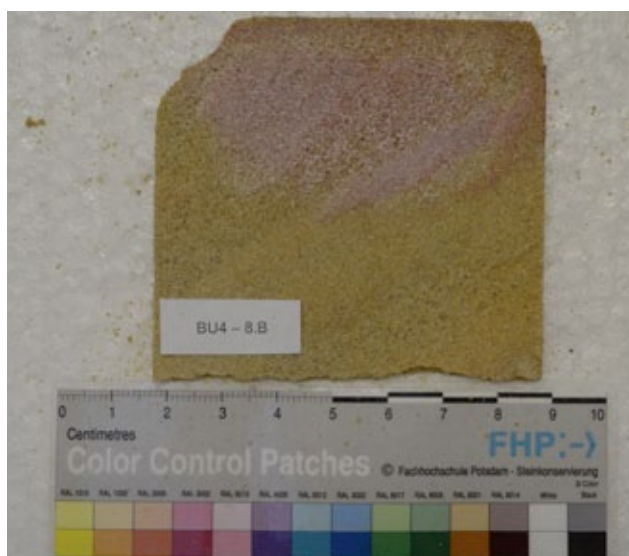


Abb. 176: BU4 - 8.B

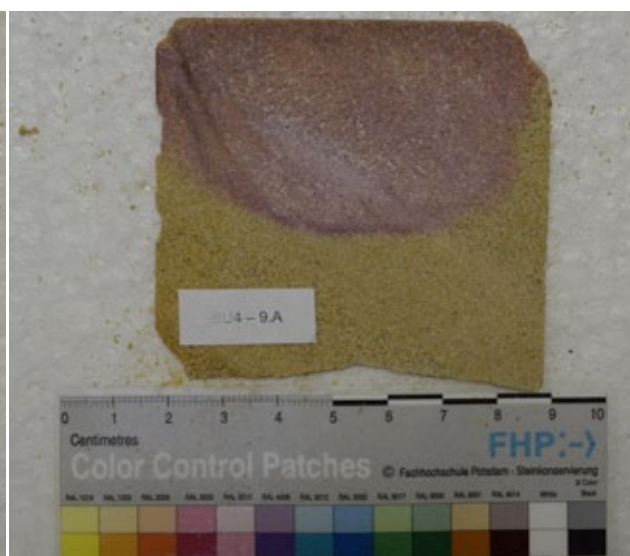


Abb. 177: BU4 - 9.A

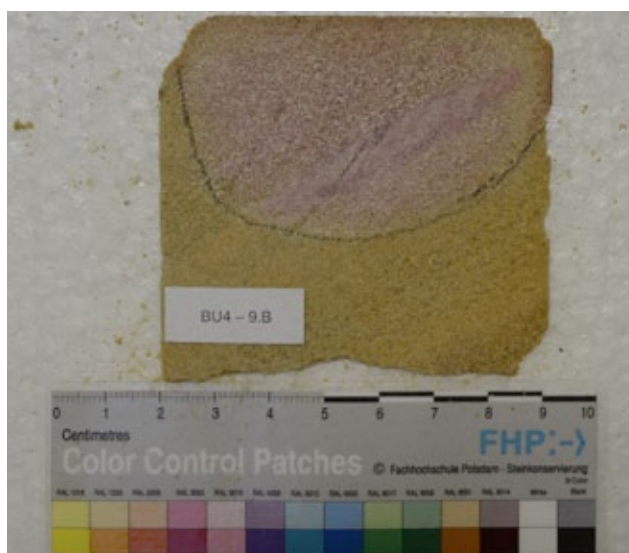


Abb. 178: BU4 - 9.B

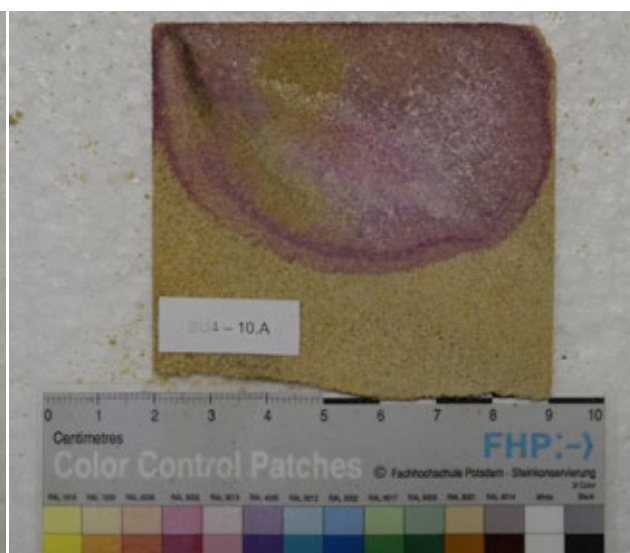


Abb. 179: BU4 - 10.A

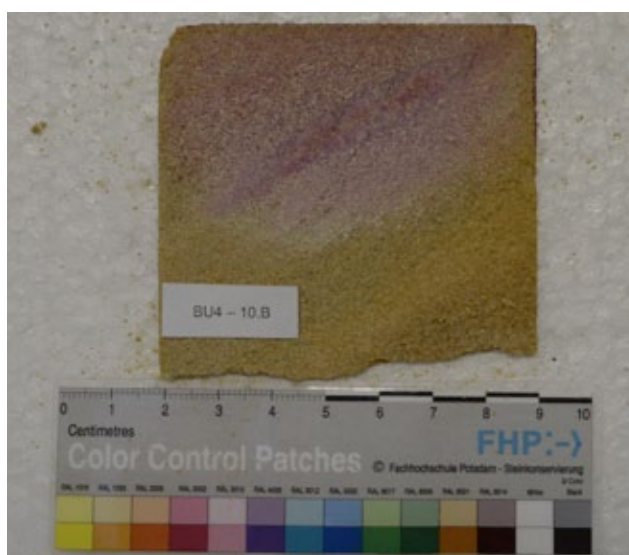


Abb. 180: BU4 - 10.B

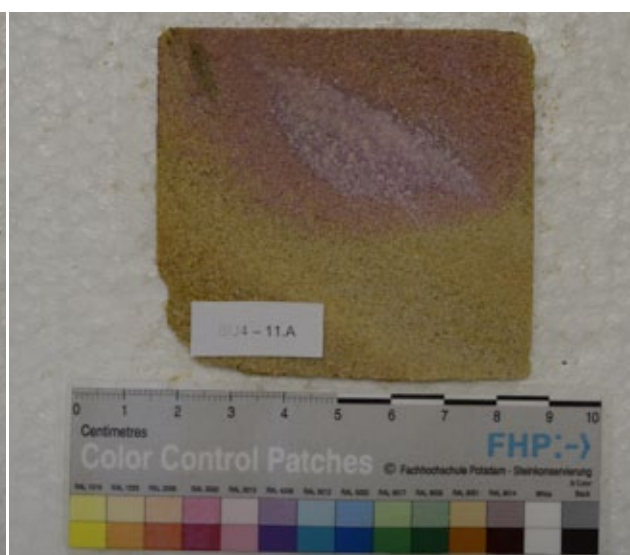
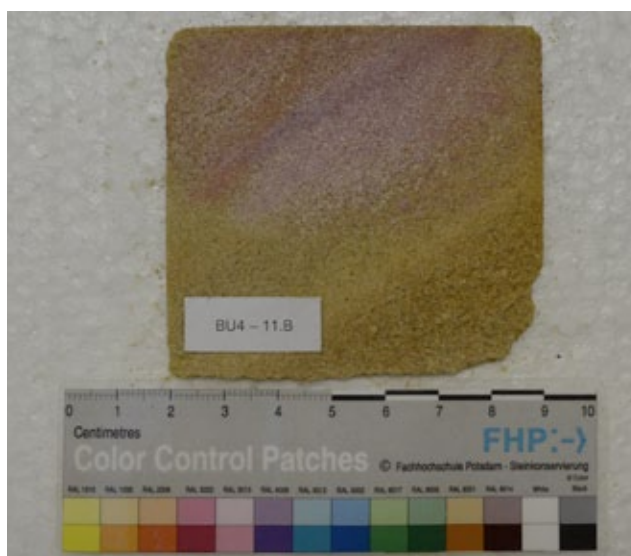
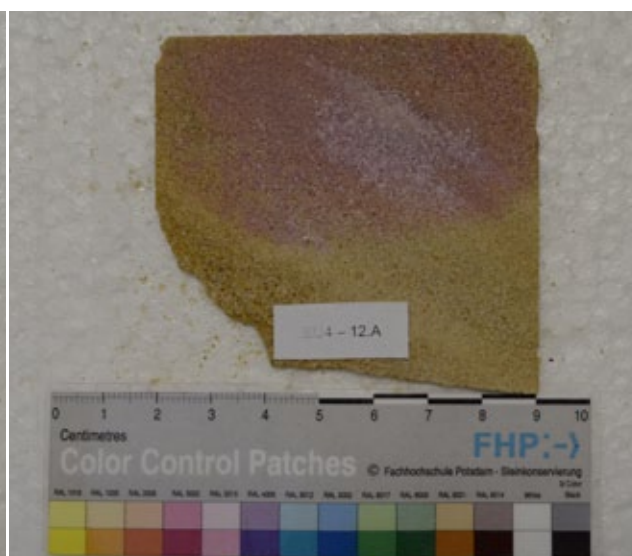
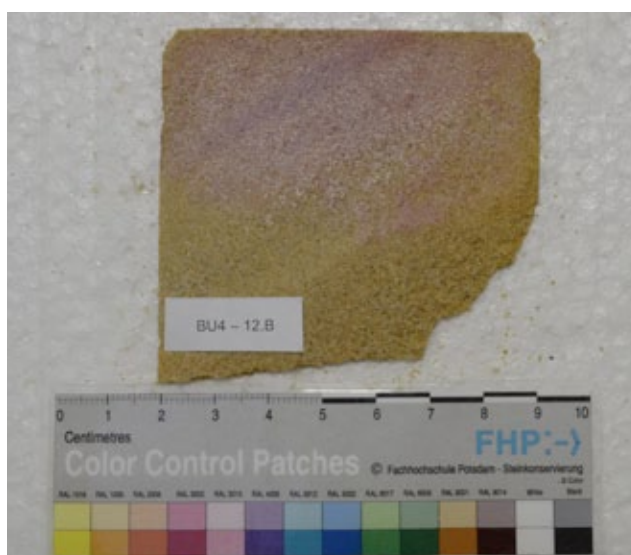
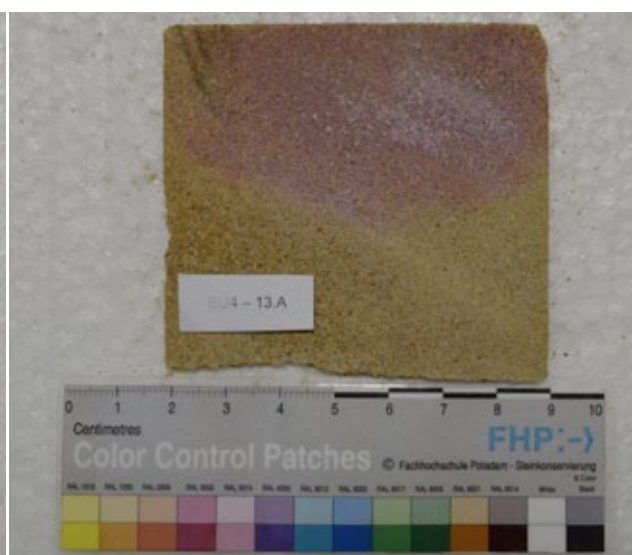
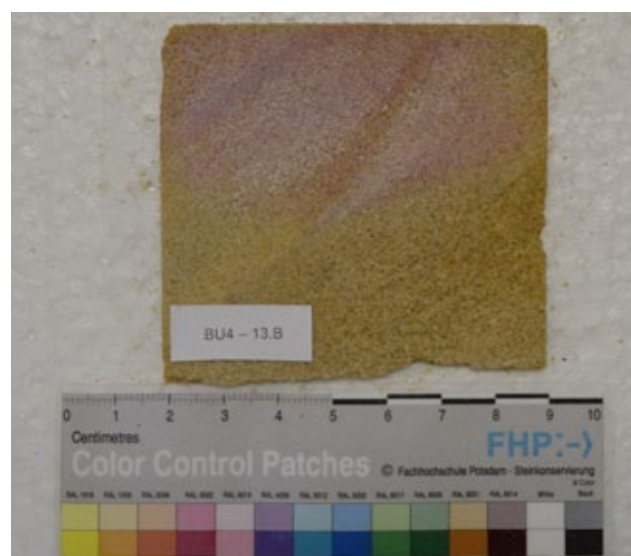
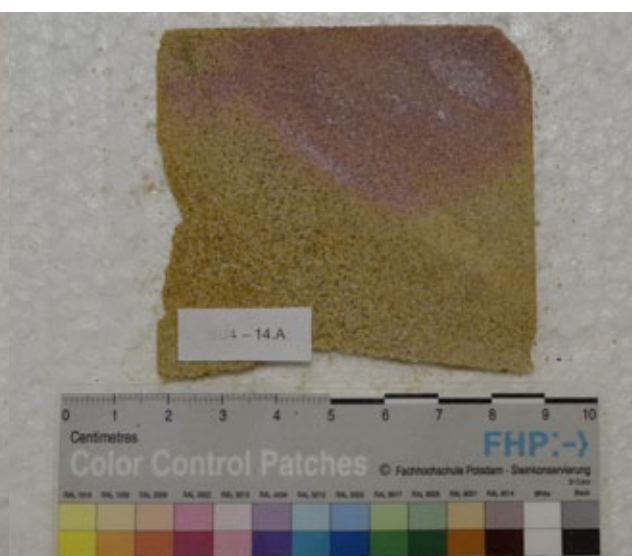


Abb. 181: BU4 - 11.A

*Abb. 182: BU4 - 11.B**Abb. 183: BU4 - 12.A**Abb. 184: BU4 - 12.B**Abb. 185: BU4 - 13.A**Abb. 186: BU4 - 13.B**Abb. 187: BU4 - 14.A*

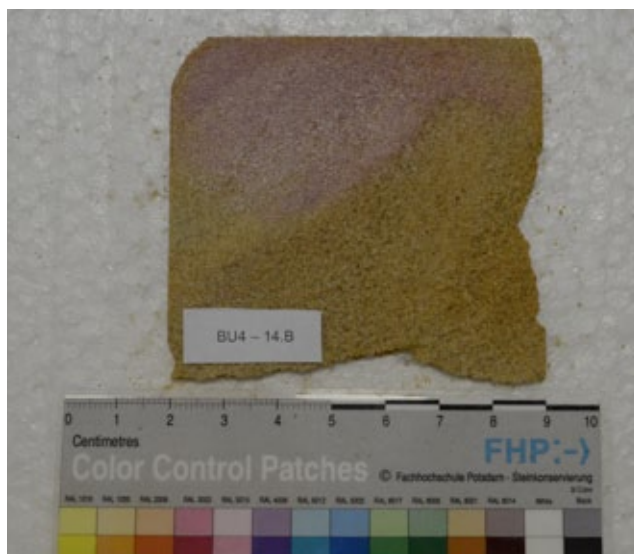


Abb. 188: BU4 - 14.B

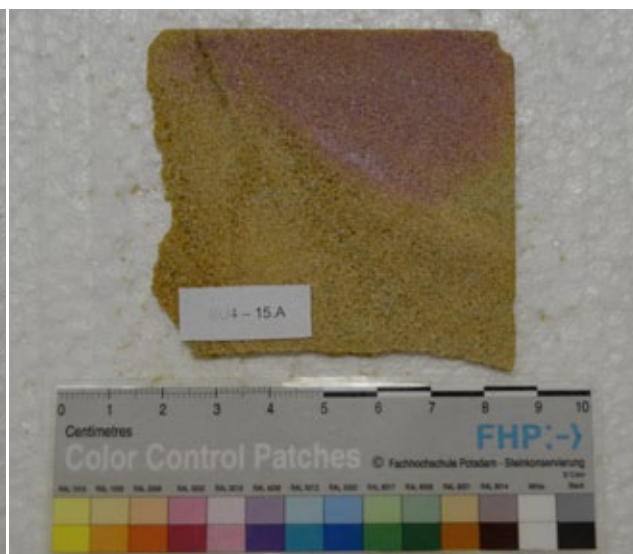


Abb. 189: BU4 - 15.A



Abb. 190: BU4 - 15.B

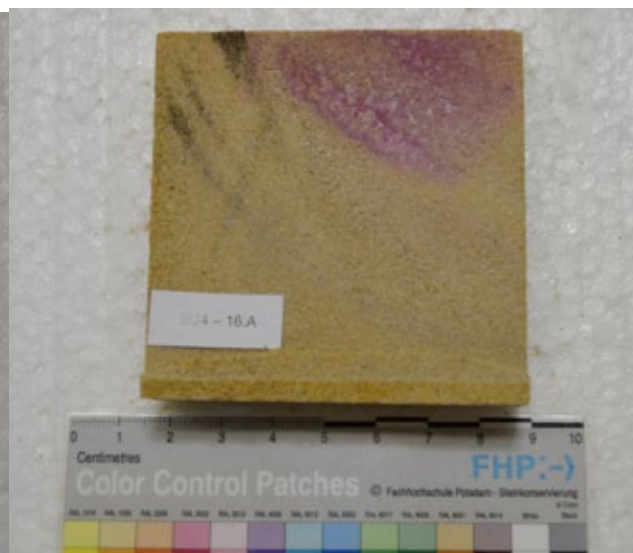


Abb. 191: BU4 - 16.A

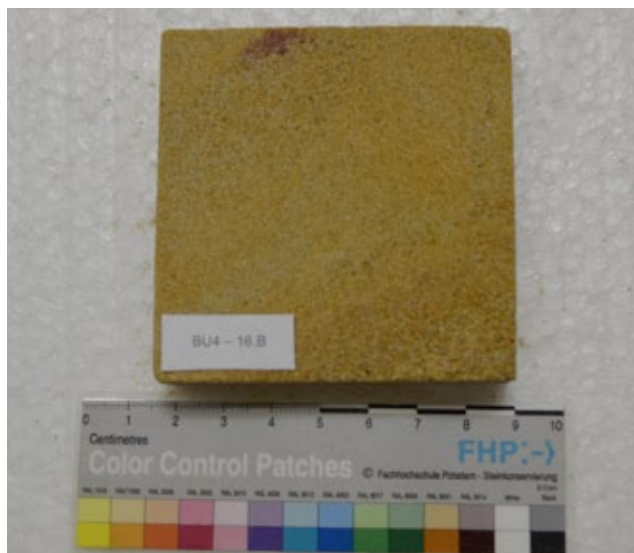


Abb. 192: BU4 - 16.B



Abb. 193: BU4 - Sägeschnitte seitlich

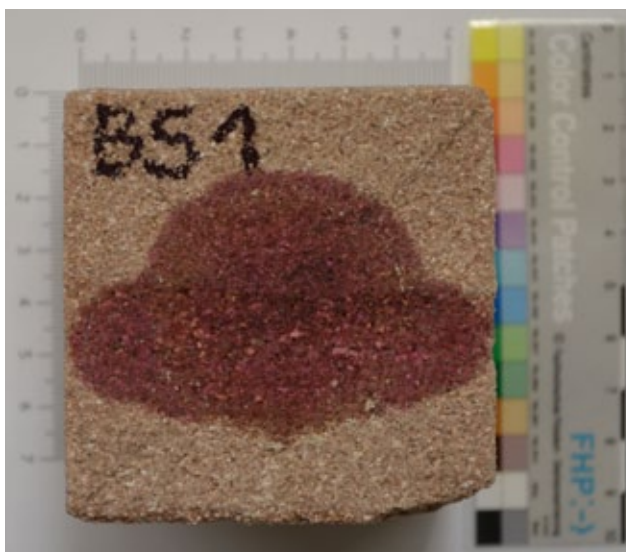


Abb. 194: BS1 - Oberfläche angefärbt

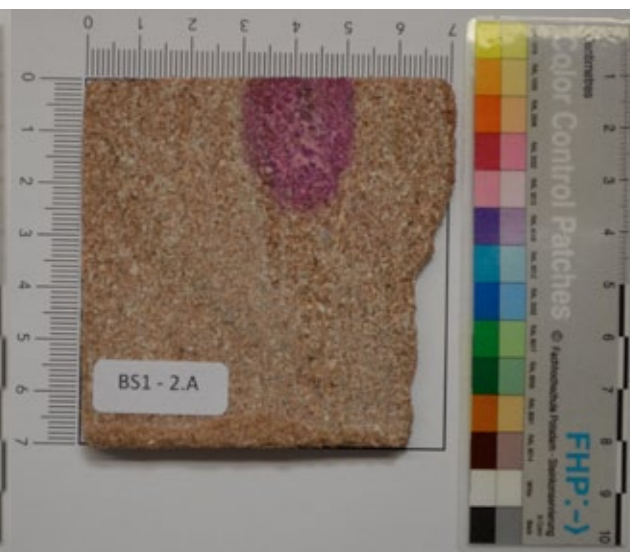


Abb. 195: BS1 - 2.A

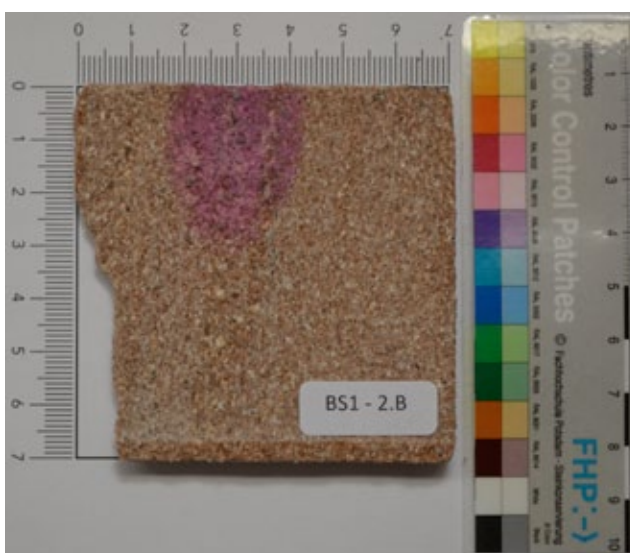


Abb. 196: BS1 - 2.B

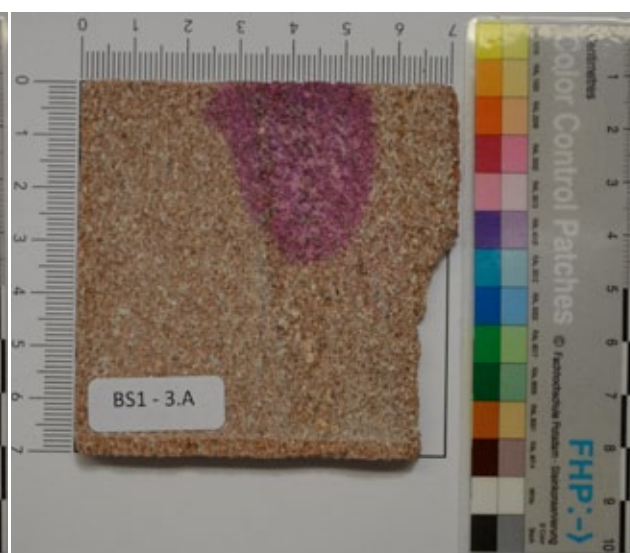


Abb. 197: BS1 - 3.A

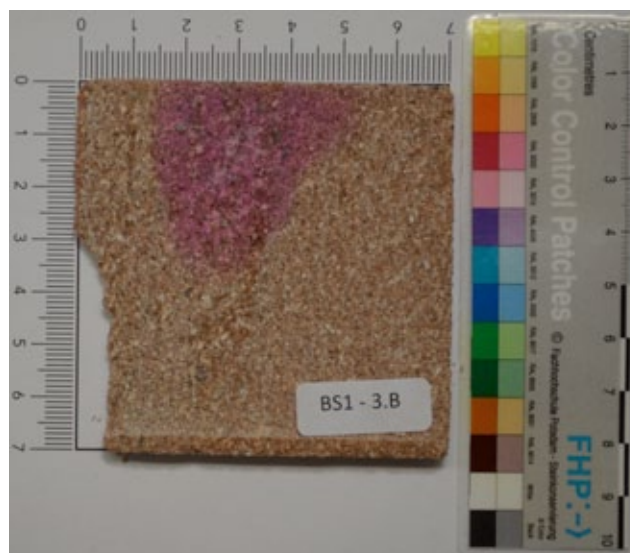


Abb. 198: BS1 - 3.B

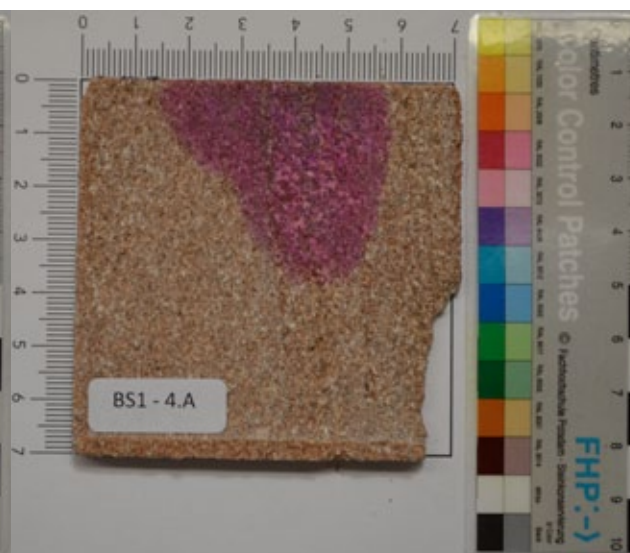


Abb. 199: BS1 - 4.A



Abb. 200: BS1 - 4.B



Abb. 201: BS1 - 5.A

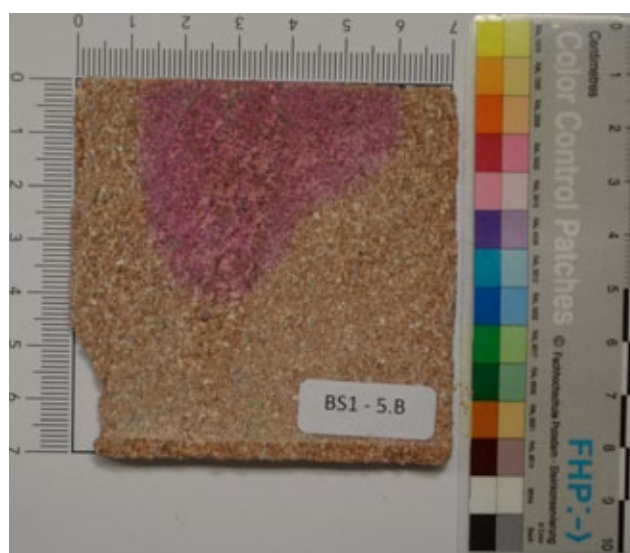


Abb. 202: BS1 - 5.B

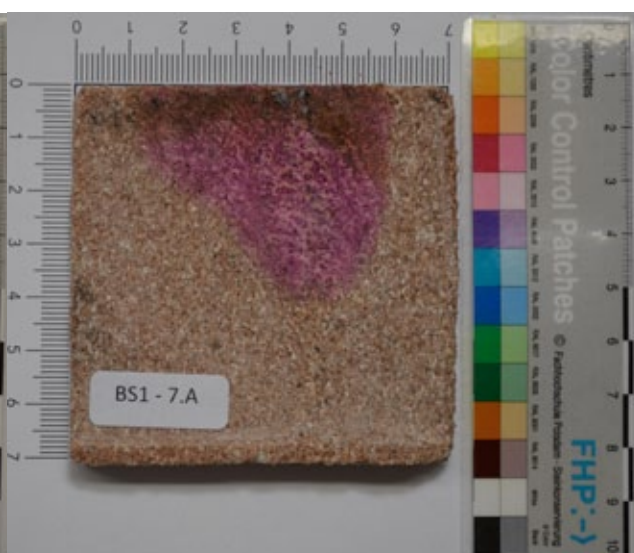


Abb. 203: BS1 - 7.A

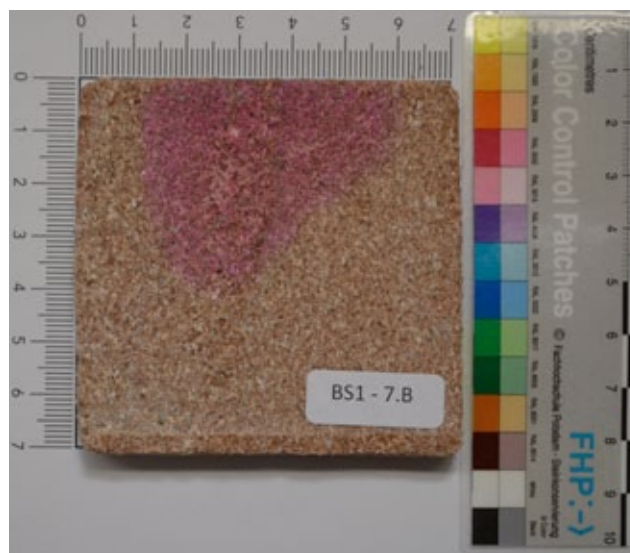


Abb. 204: BS1 - 7.B

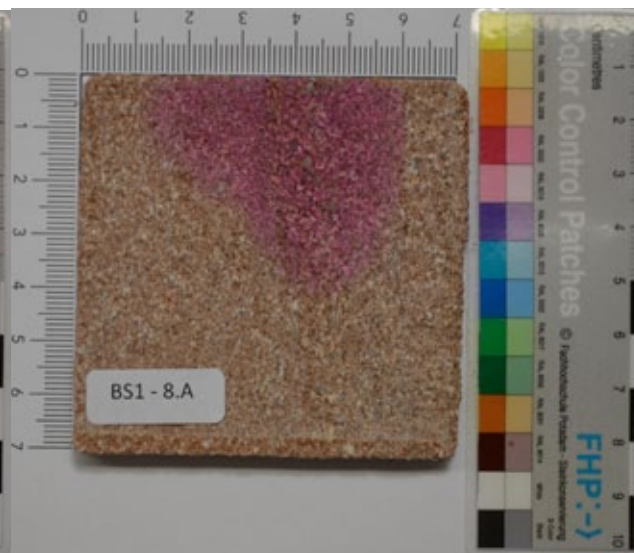


Abb. 205: BS1 - 8.A

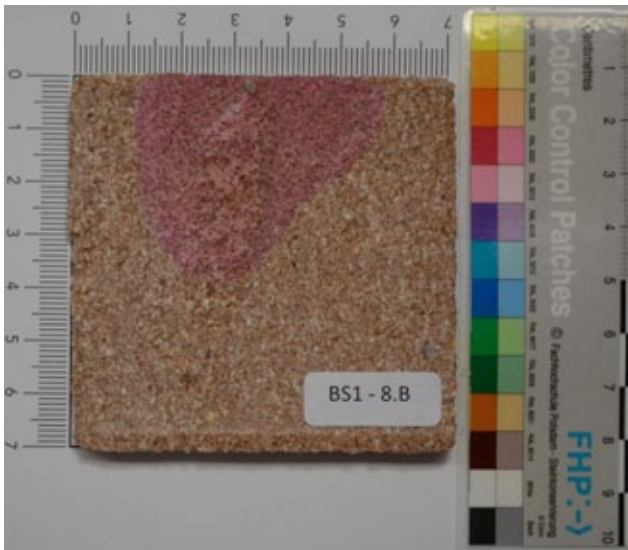


Abb. 206: BS1 - 8.B

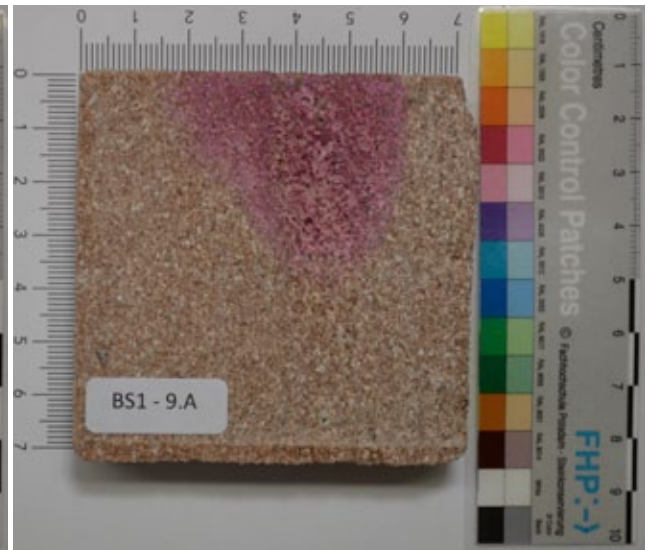


Abb. 207: BS1 - 9.A

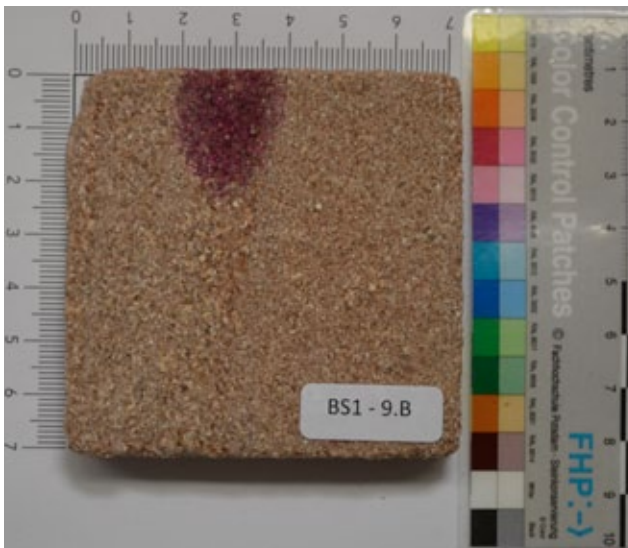


Abb. 208: BS1 - 9.B

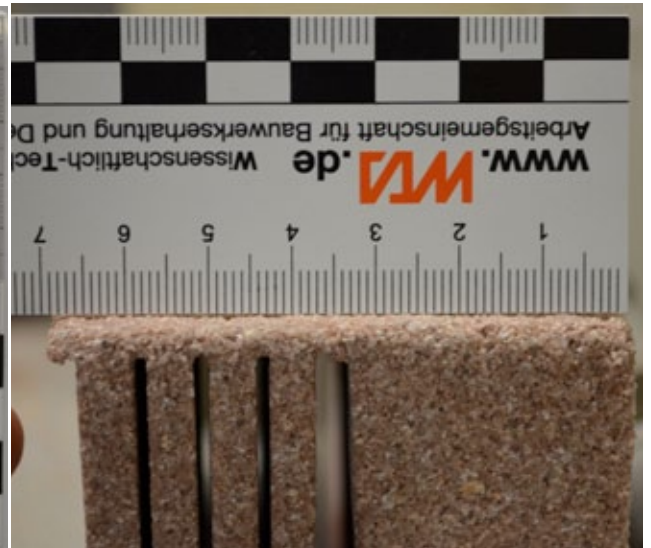


Abb. 209: BS1 - Sägeschnitte seitlich 1



Abb. 210: BS1 - Sägeschnitte seitlich 2

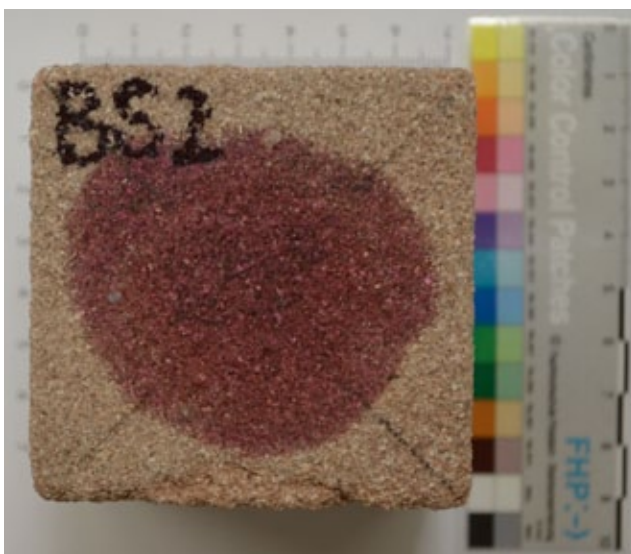


Abb. 211: BS2 - Oberfläche angefärbt

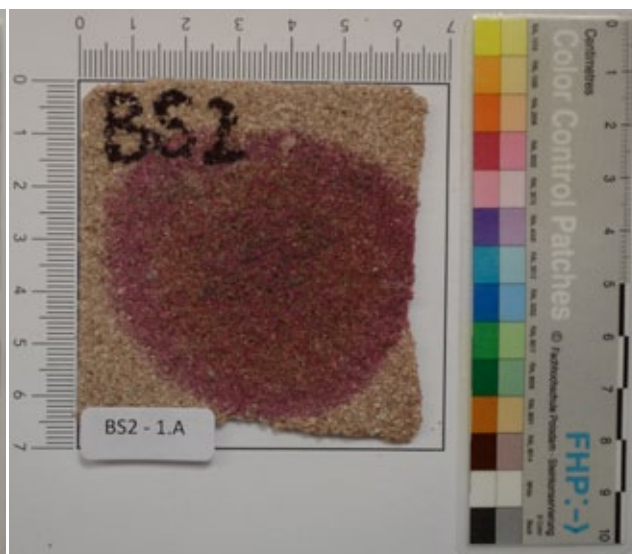


Abb. 212: BS2 - 1.A

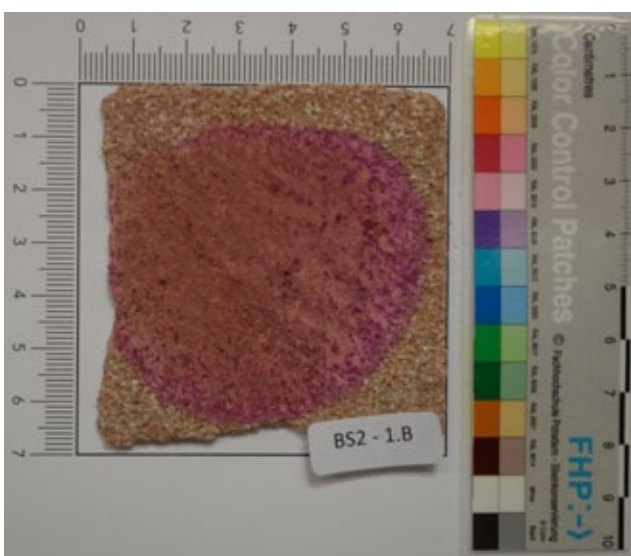


Abb. 213: BS2 - 1.B

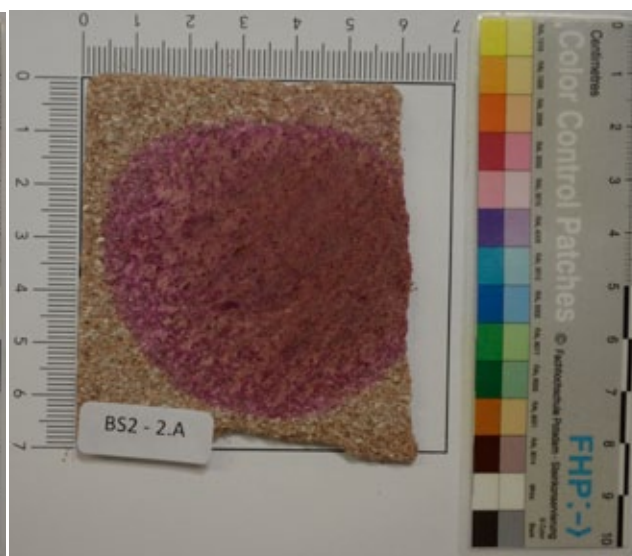


Abb. 214: BS2 - 2.A

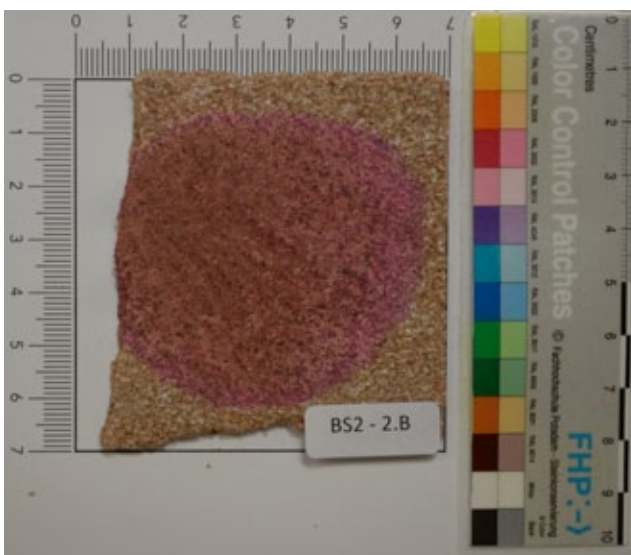


Abb. 215: BS2 - 2.B

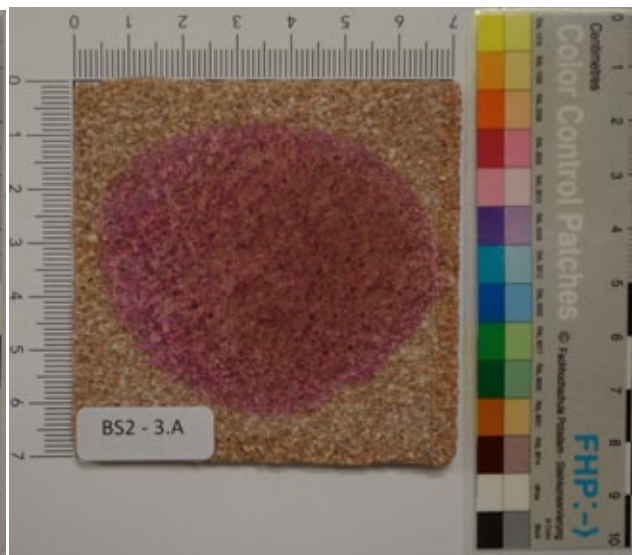


Abb. 216: BS2 - 3.A

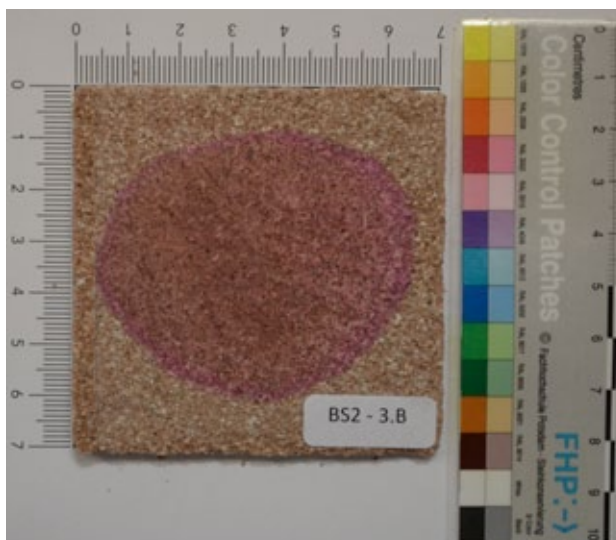


Abb. 222: BS2 - 3.B

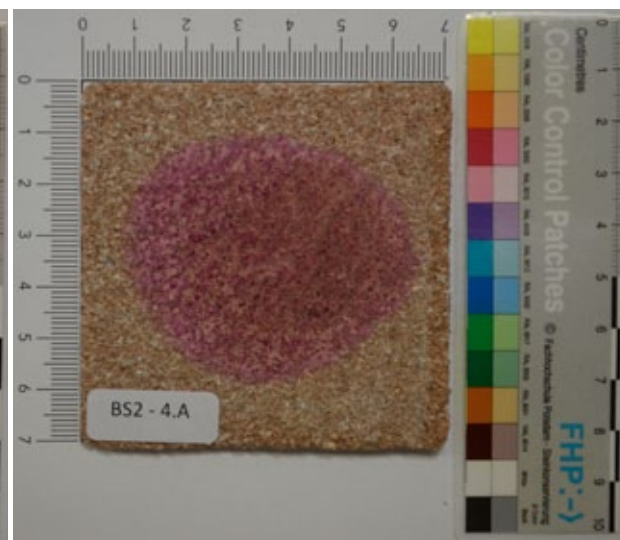


Abb. 221: BS2 - 4.A

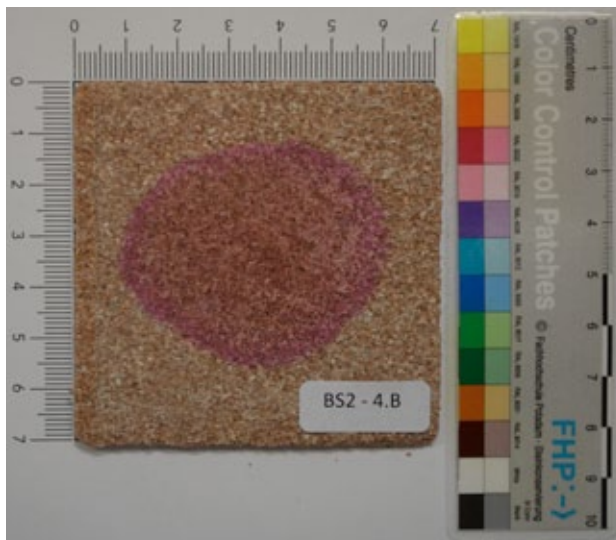


Abb. 220: BS2 - 4.B

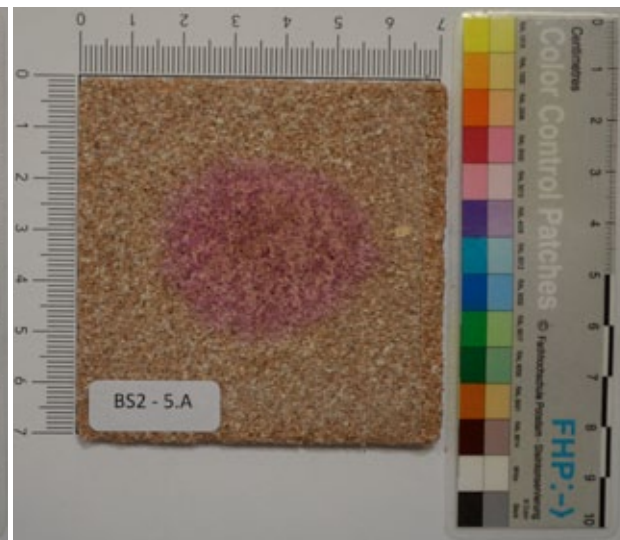


Abb. 219: BS2 - 5.A

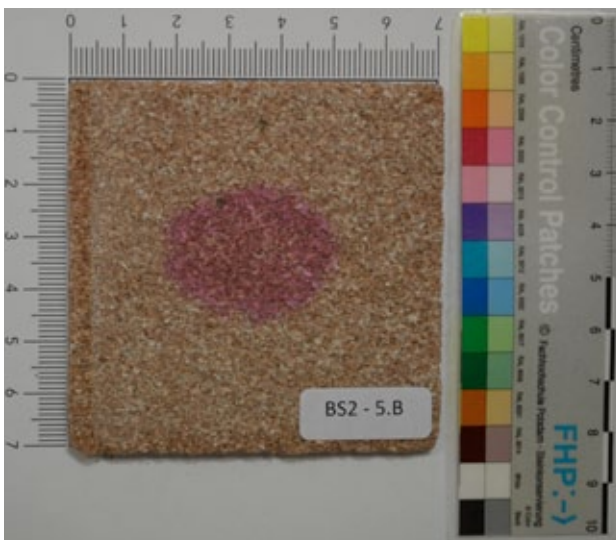


Abb. 218: BS2 - 5.B



Abb. 217: BS2 - 6.A

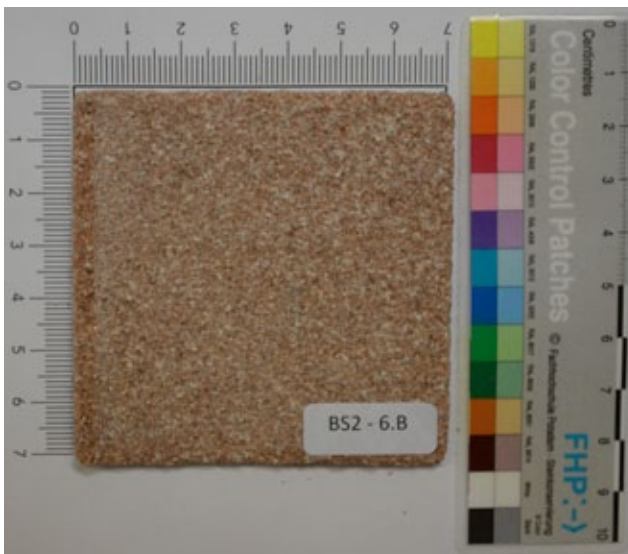


Abb. 223: BS2 - 6.B

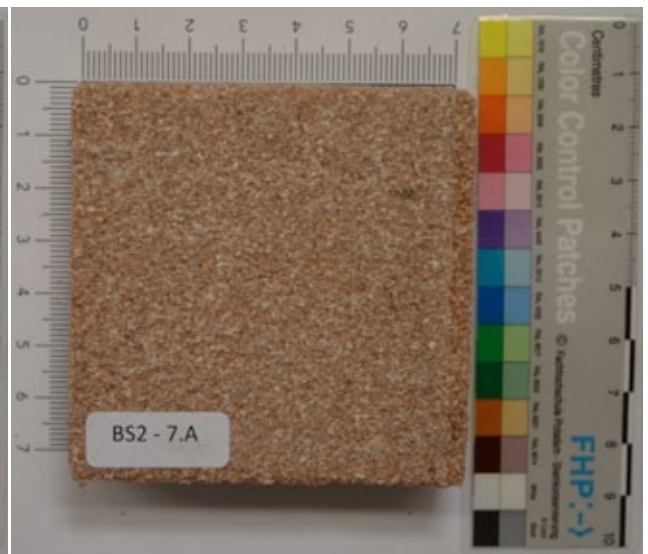


Abb. 224: BS2 - 7.A



Abb. 225: BS2 - 7.B

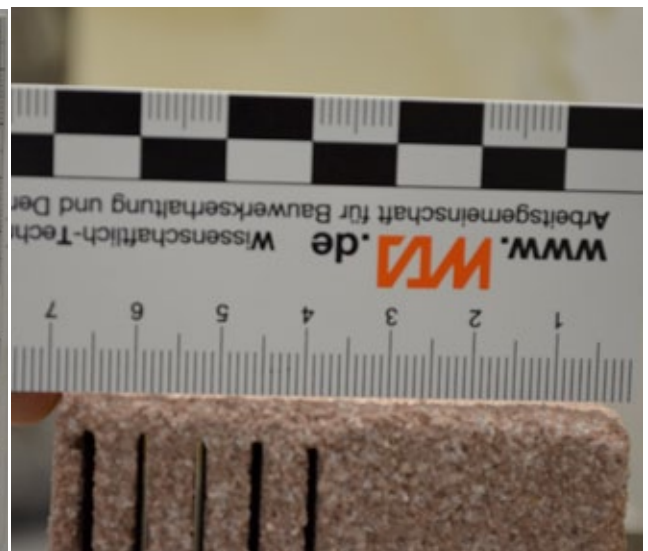


Abb. 226: BS2 - Sägeschnitte seitlich 1



Abb. 227: BS2 - Sägeschnitte seitlich 2

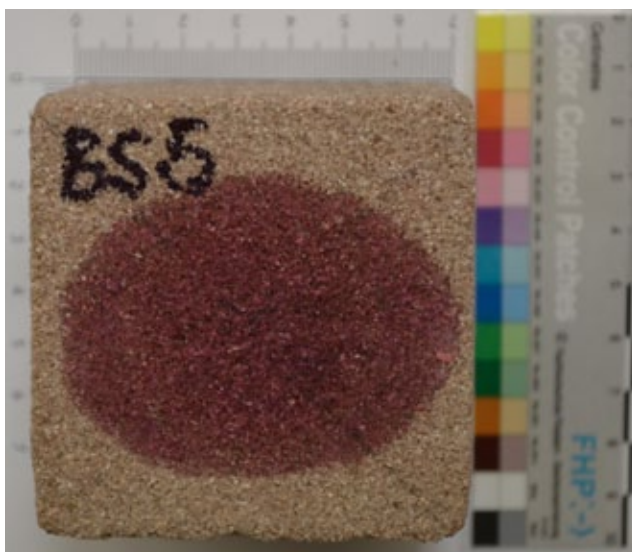


Abb. 228: BS5 - Oberfläche angefärbt

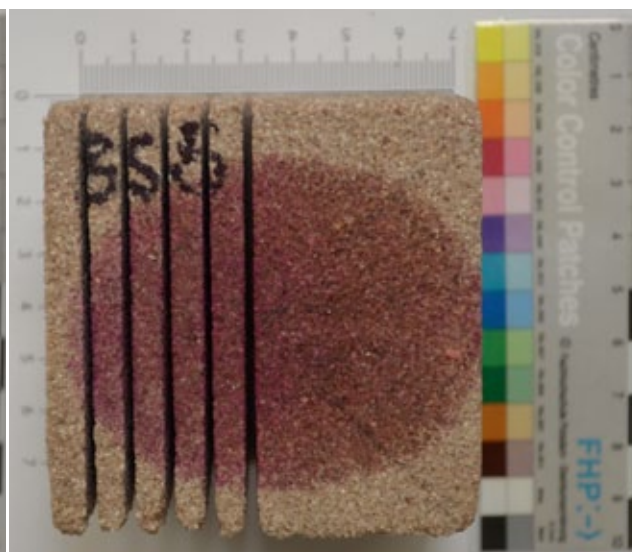


Abb. 229: BS5 - Oberfläche eingeschnitten



Abb. 230: BS5 - 1.A



Abb. 231: BS5 - 1.B

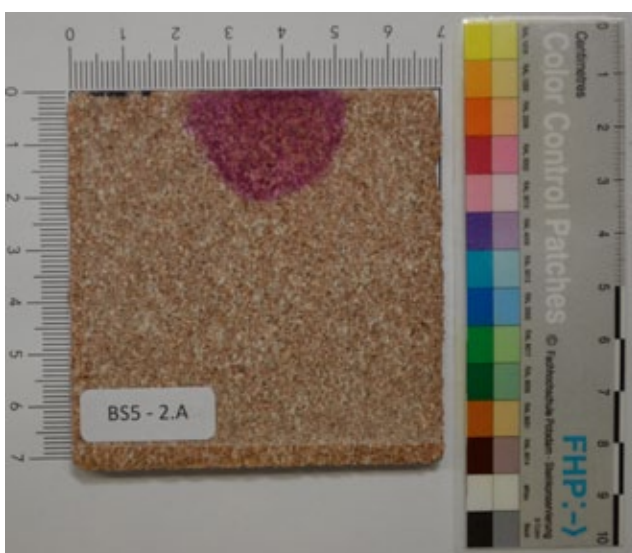


Abb. 232: BS5 - 2.A

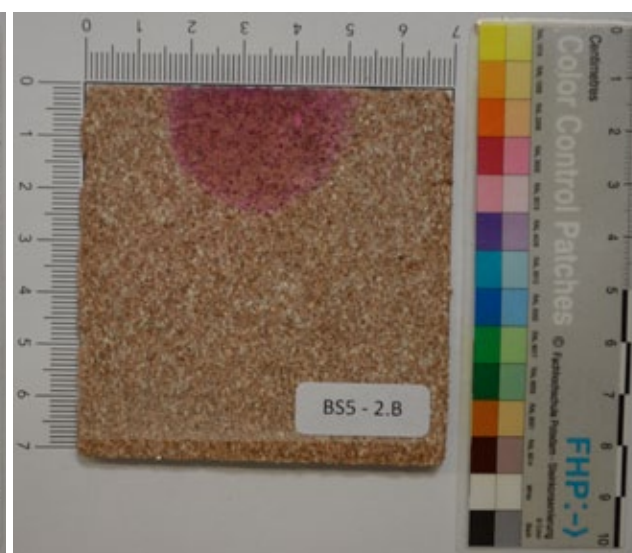


Abb. 233: BS5 - 2.B



Abb. 234: BS5 - 3.A

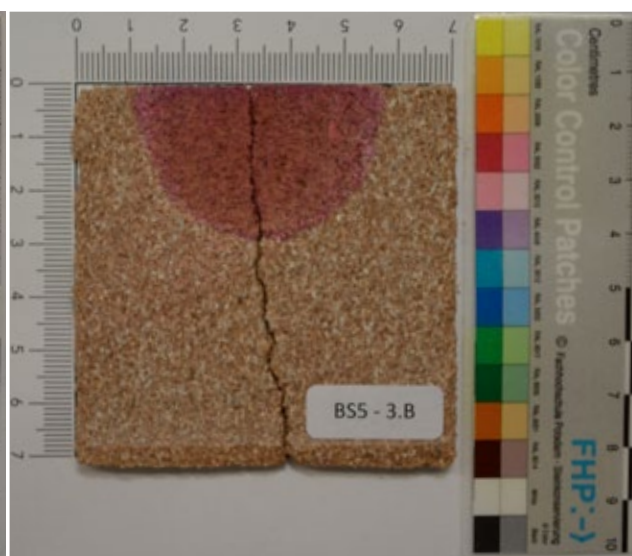


Abb. 235: BS5 - 3.B

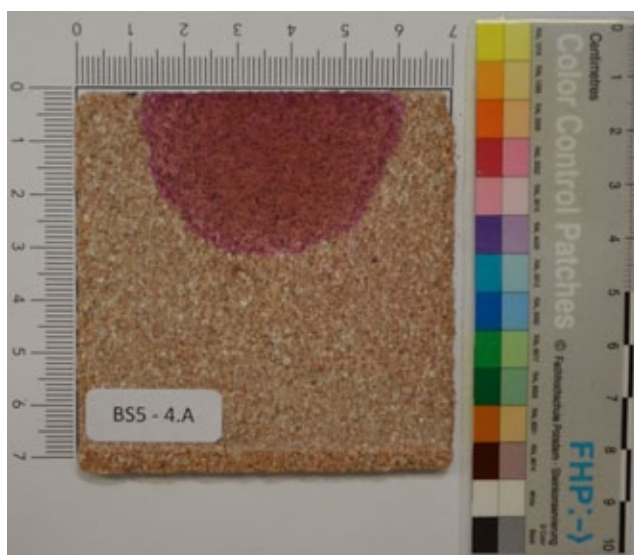


Abb. 236: BS5 - 4.A

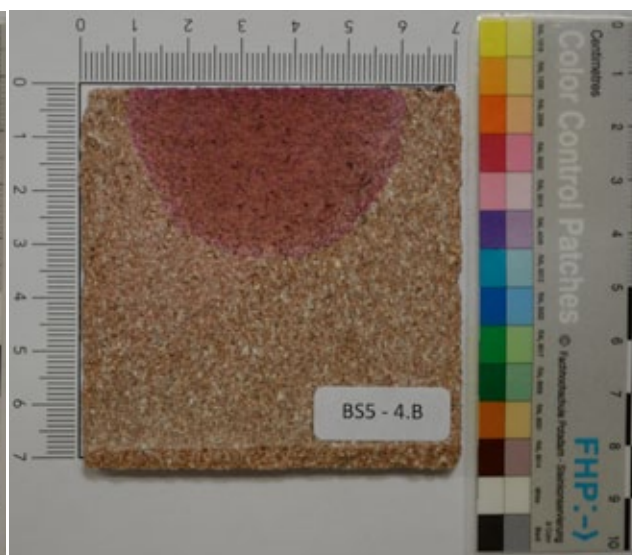


Abb. 237: BS5 - 4.B

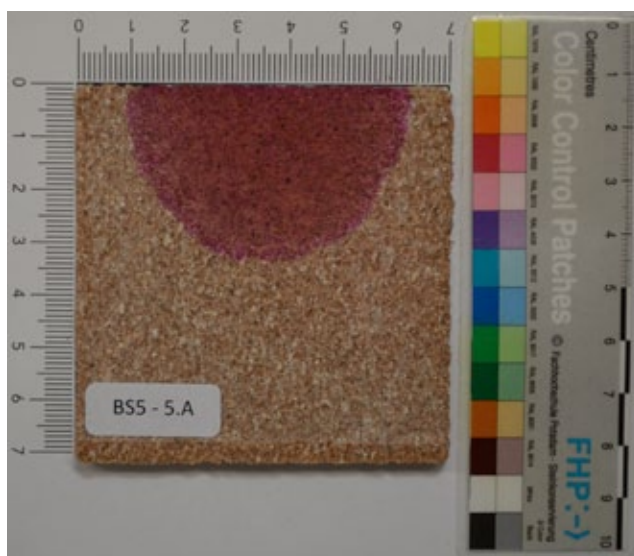


Abb. 238: BS5 - 5.A

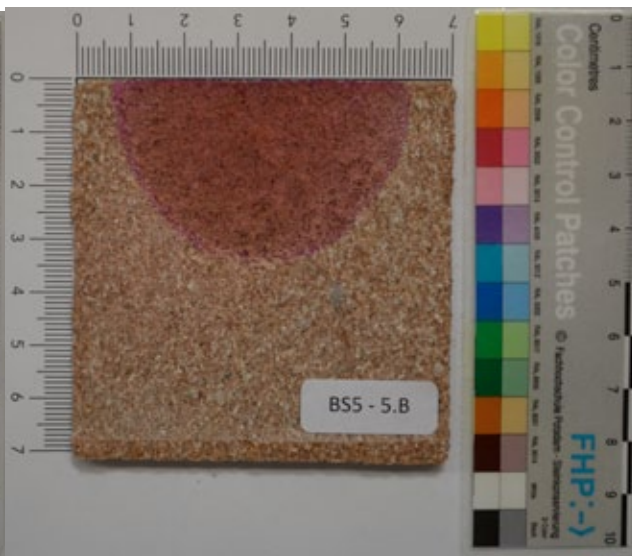


Abb. 239: BS5 - 5.B

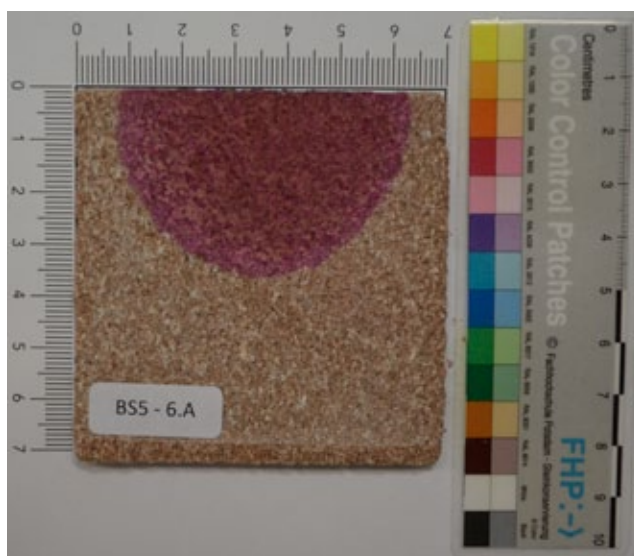


Abb. 240: BS5 - 6.A (Mitte)

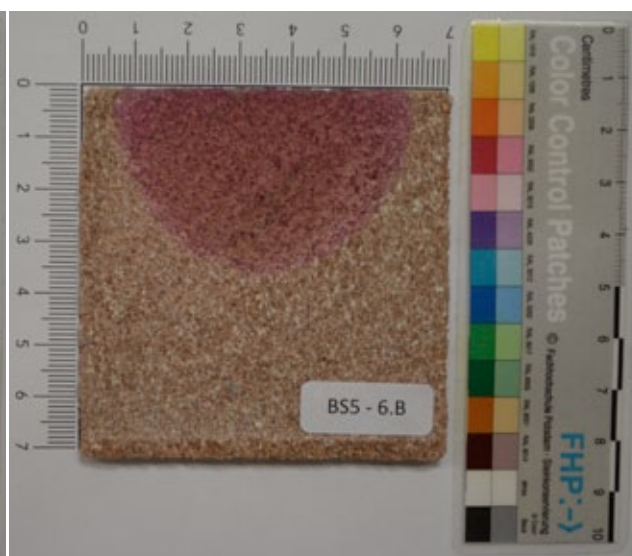


Abb. 241: BS5 - 6.B

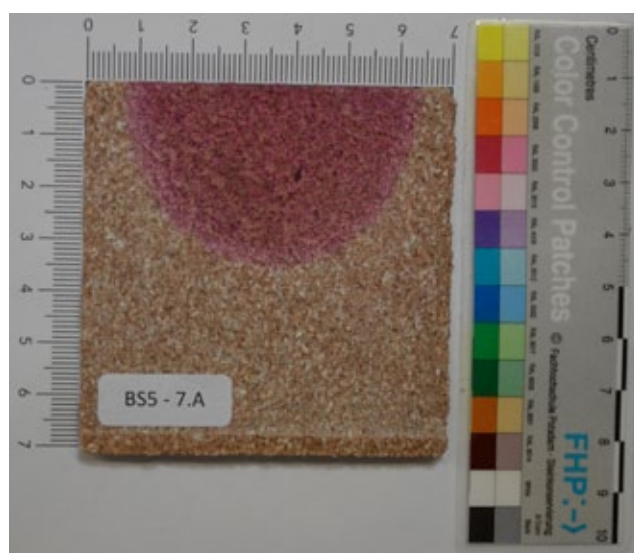


Abb. 242: BS5 - 7.A

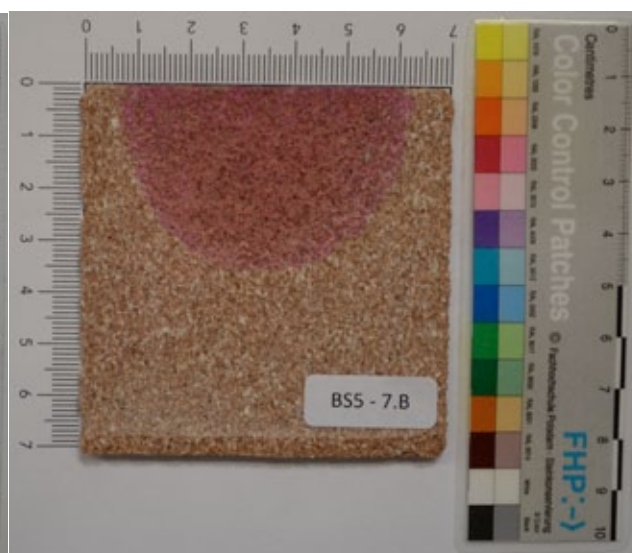


Abb. 243: BS5 - 7.B

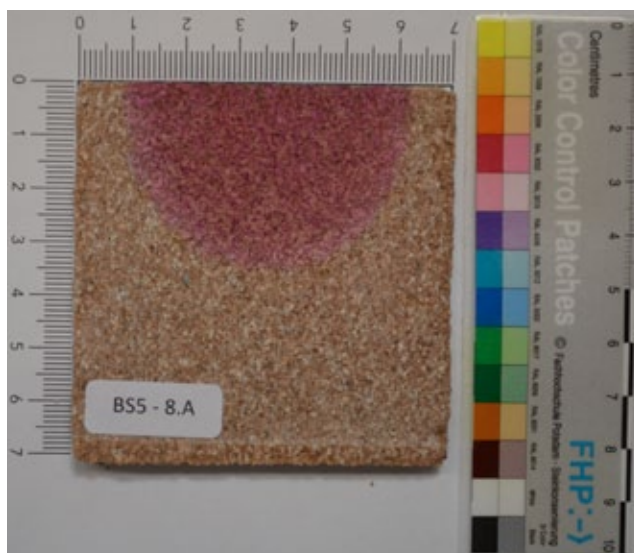


Abb. 244: BS5 - 8.A

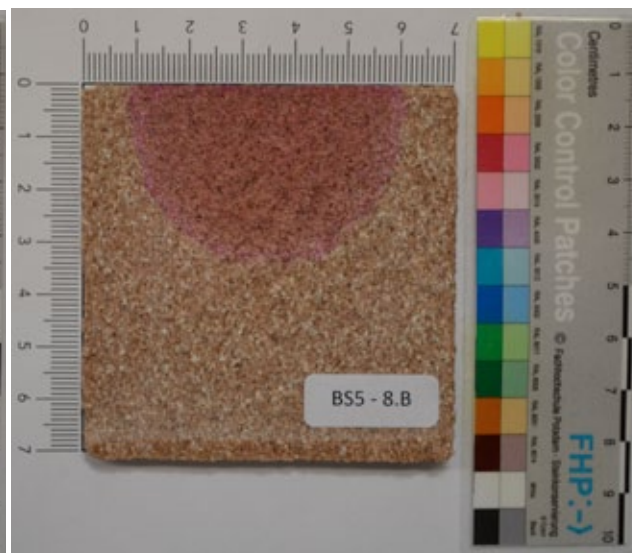


Abb. 245: BS5 - 8.B

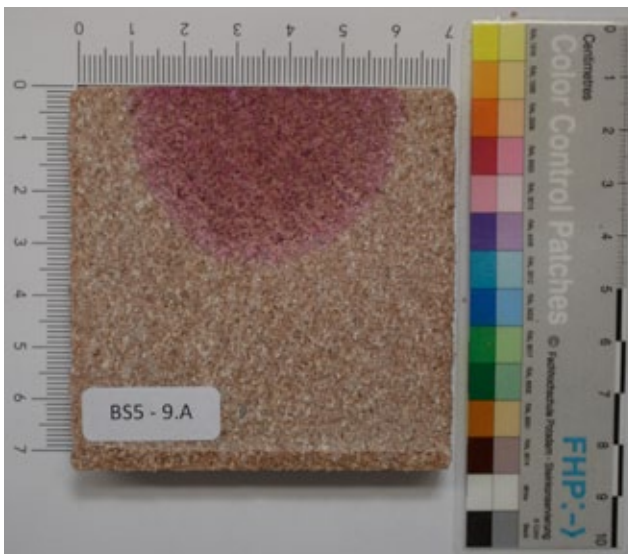


Abb. 246: BS5 - 9.A

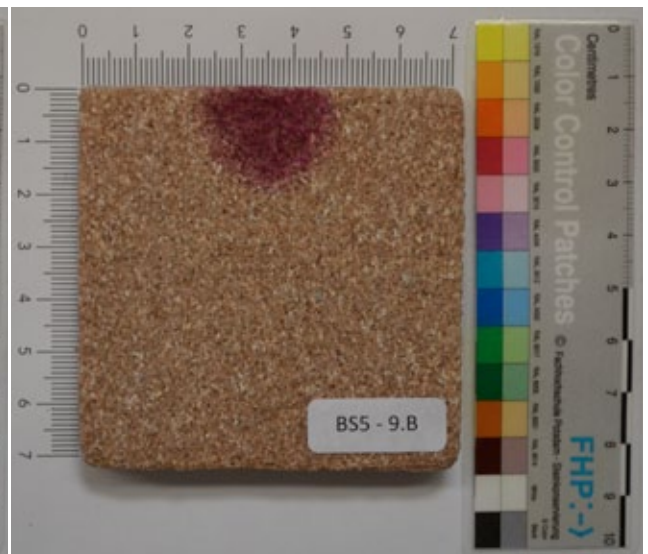


Abb. 247: BS5 - 9.B



Abb. 248: BS5 - Sägeschnitte seitlich 1



Abb. 249: BS5 - Sägeschnitte seitlich 2

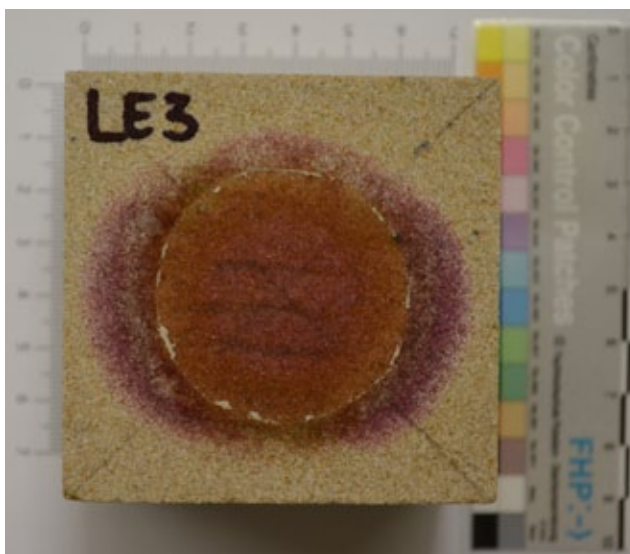


Abb. 250: LE3 - Oberfläche angefärbt

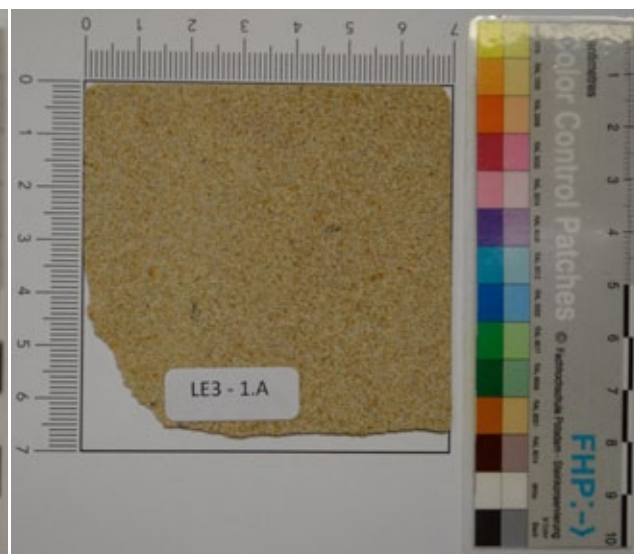


Abb. 251: LE3 - 1.A

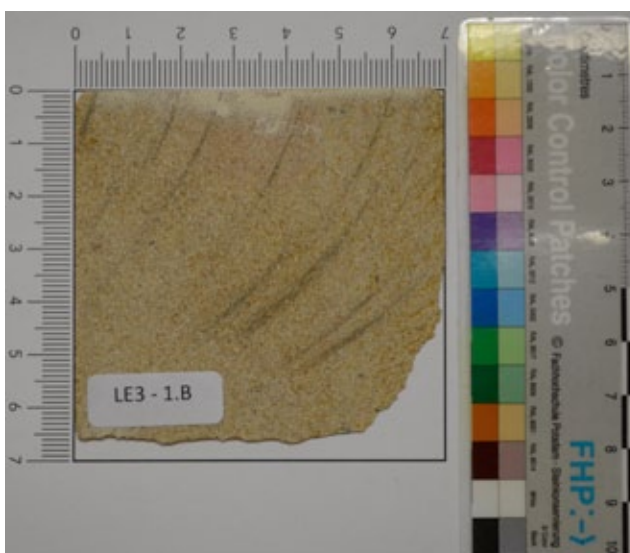


Abb. 252: LE3 - 1.B

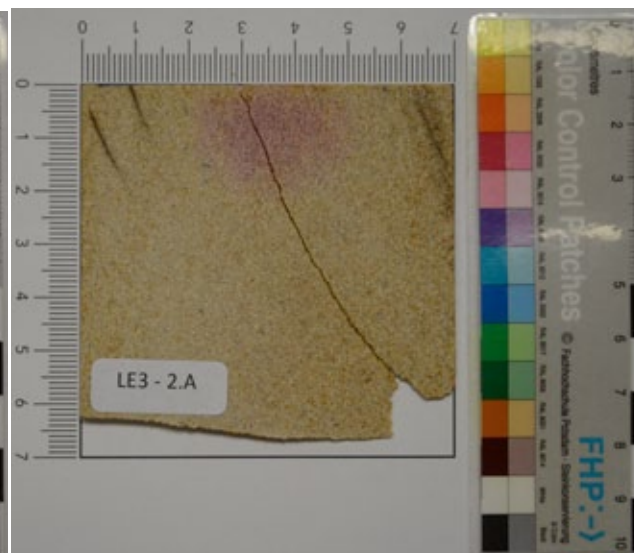


Abb. 253: LE3 - 2.A

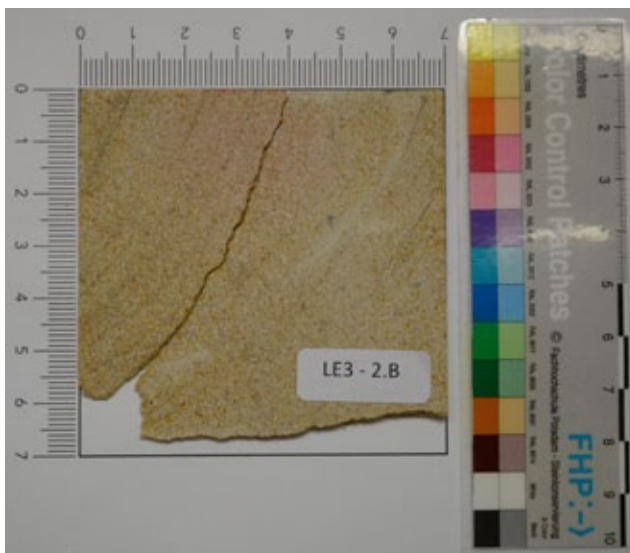


Abb. 254: LE3 - 2.B

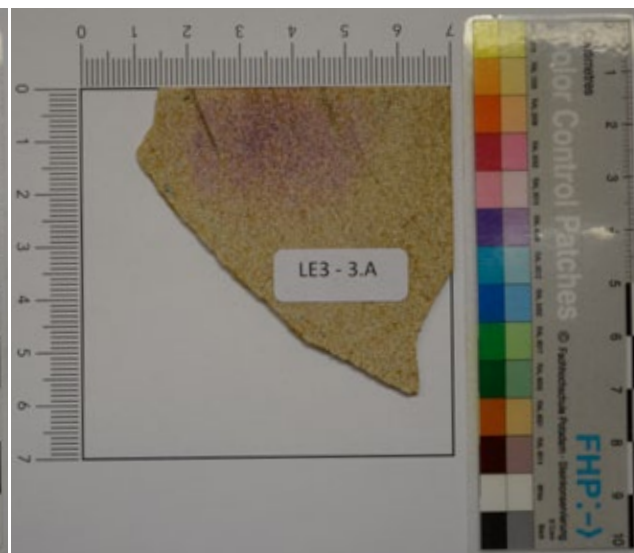


Abb. 255: LE3 - 3.A

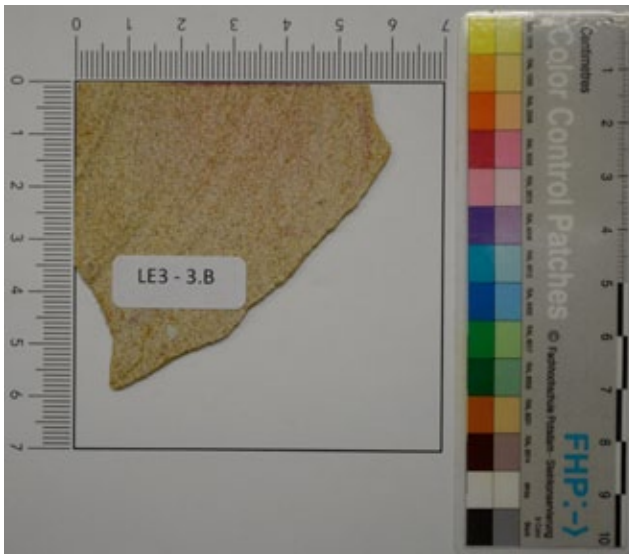


Abb. 256: LE3 - 3.B

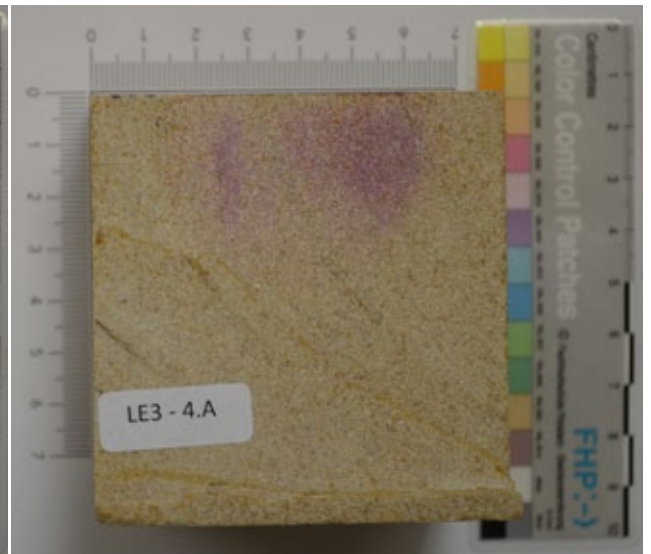


Abb. 257: LE3 - 4.A

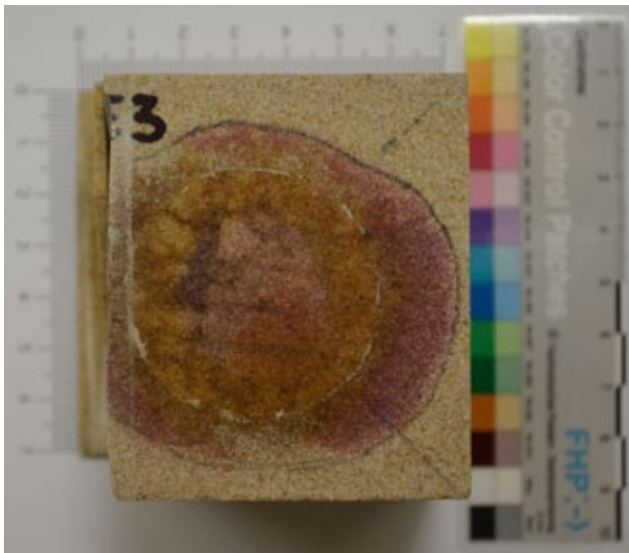


Abb. 258: LE3 - Oberfläche nach Sägeversuchen

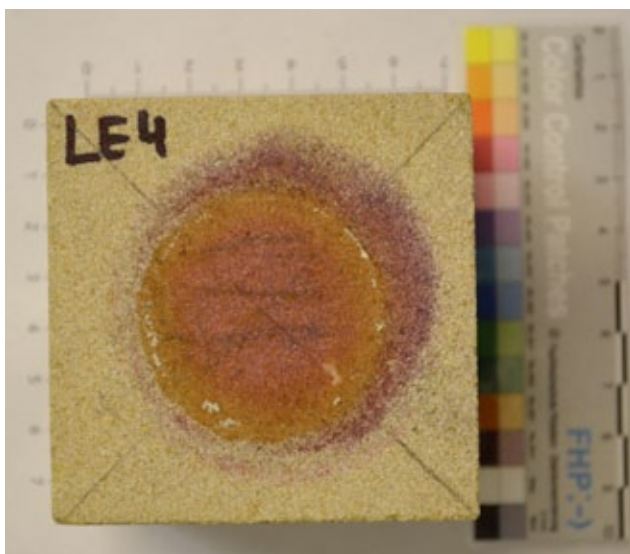


Abb. 259: LE4 - Oberfläche angefärbt

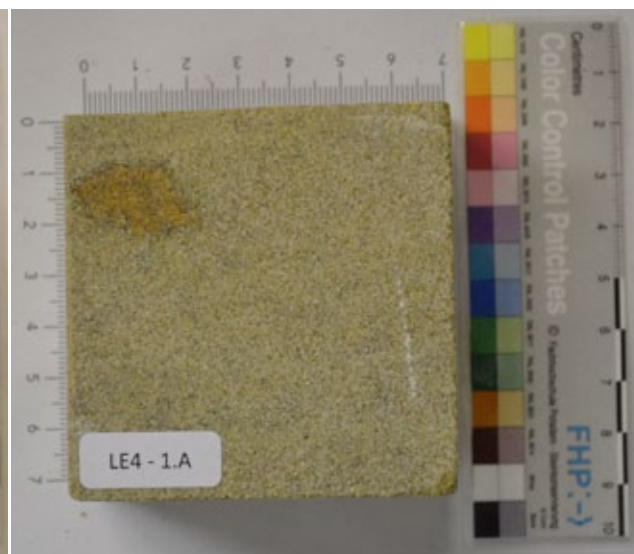


Abb. 260: LE4 - 1.A

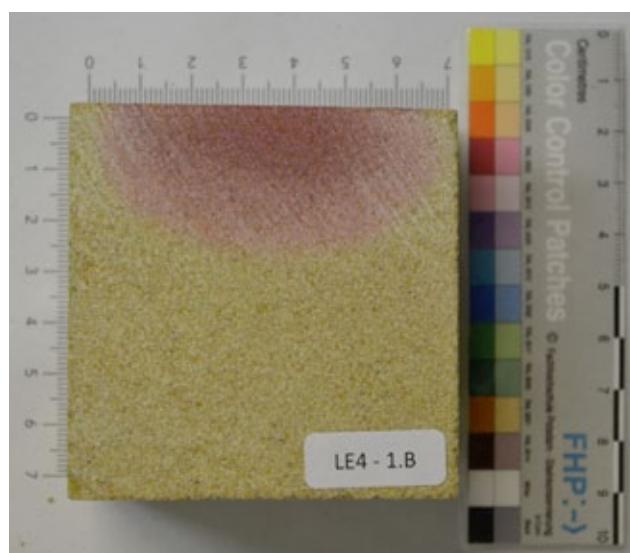


Abb. 261: LE4 - 1.B (Mitte)

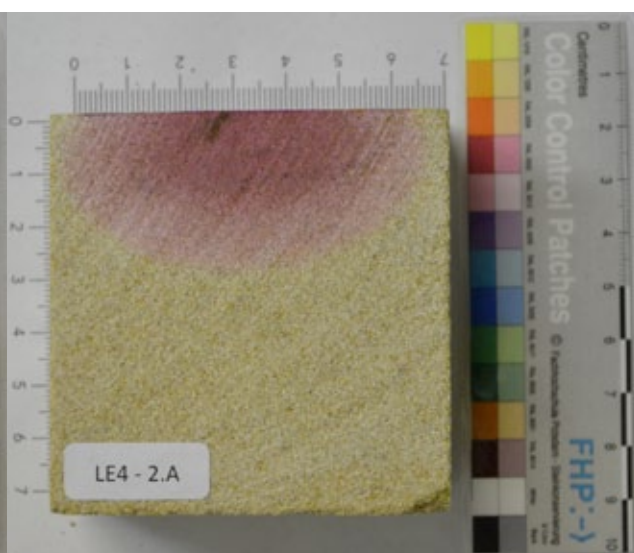


Abb. 262: LE4 - 2.A

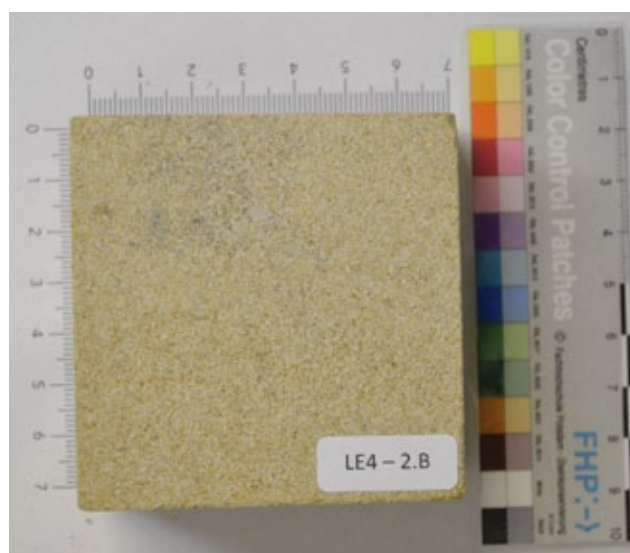


Abb. 263: LE4 - 2.B

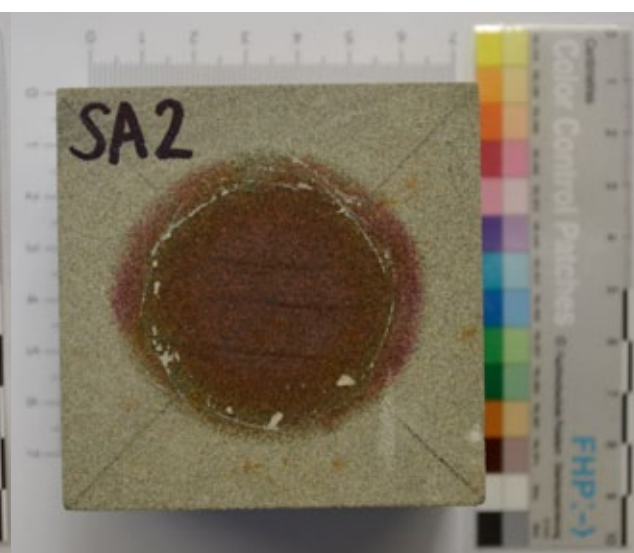


Abb. 264: SA2 - Oberfläche angefärbt

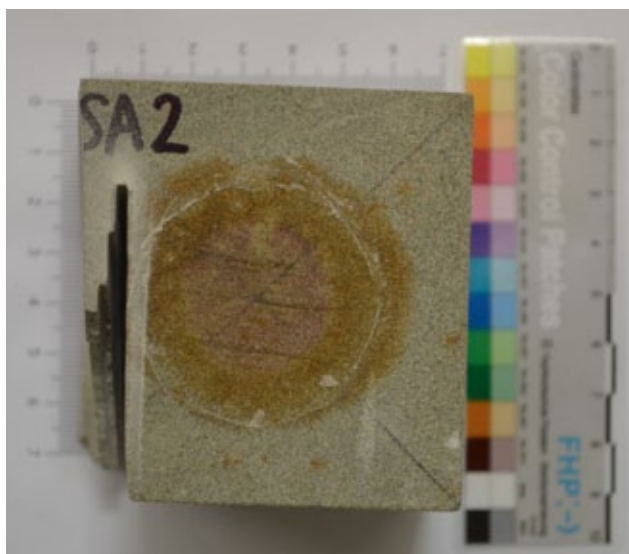


Abb. 265: SA2 - Oberfläche nach Sägeversuchen

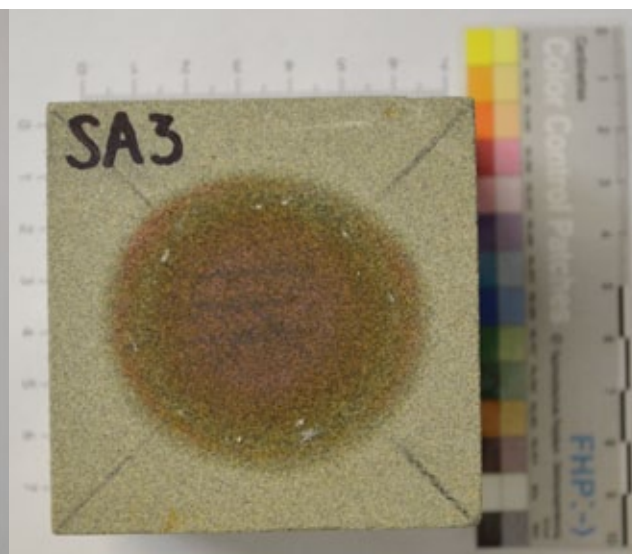


Abb. 266: SA3 - Oberfläche angefärbt

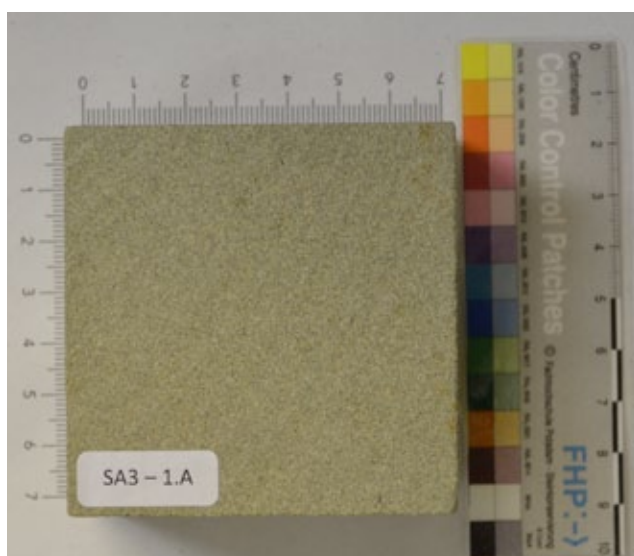


Abb. 267: SA3 - 1.A

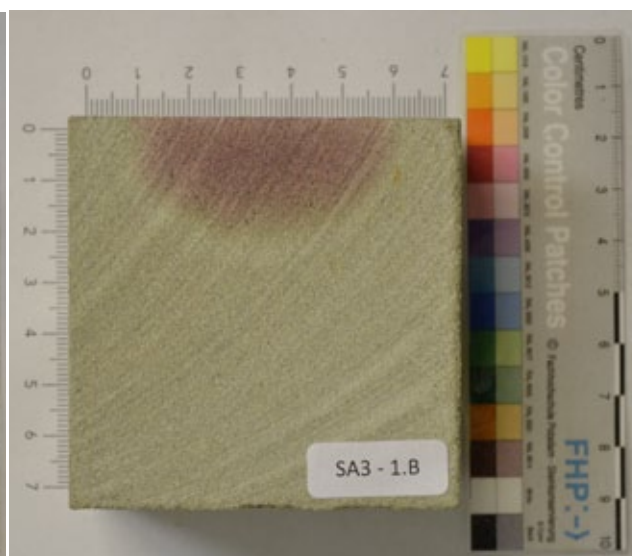


Abb. 268: SA3 - 1.B

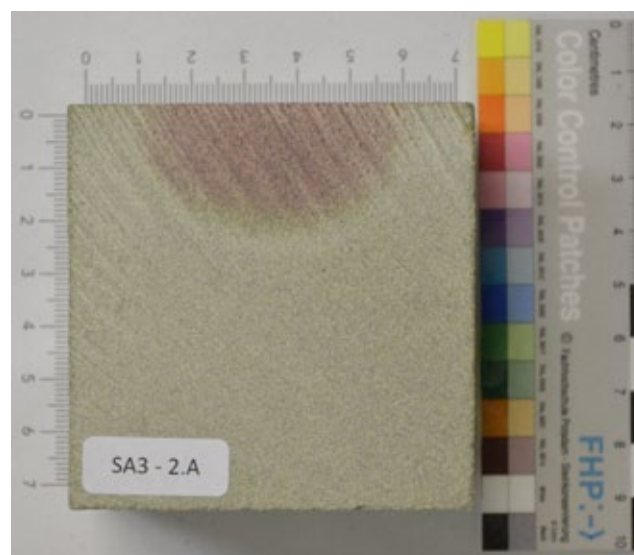


Abb. 269: SA3 - 2.A (Mitte)

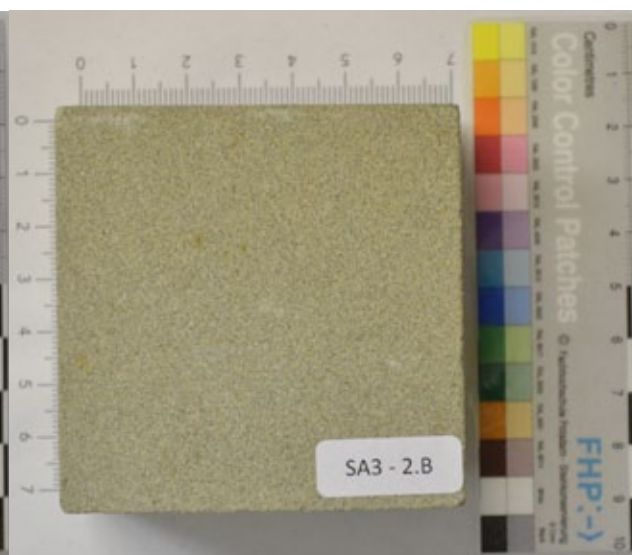


Abb. 270: SA3 - 2.B

Tabellen

Tab. 3: Zusammenfassung der petrophysikalische Kennwerte der Probegesteine

		Bucher Sandstein	Nürberger Bursandstein	Leistädter Sandstein	Sander Sandstein
Probenbezeichnung		BU	BS	LE	SA
Dichte, rein	[g/cm ³]	2,64	2,64	2,64	2,66
Dichte, roh	[g/cm ³]	2,05	2,04	2,12	2,13
Porosität	[Vol. %]	22,48	22,58	19,5	19,99
Wasseraufnahme (atm)	[Gew. %]	6,27	6,41	5,7	6,45
Wasseraufnahme (vak)	[Gew. %]	10,96	11,07		9,39
Sättigungsgrad	[-]	0,58	0,58	0,63	0,69
w-Wert (Lit.)	[kg/m ² ·√h]			5	
Quelle		GRIMM	GRIMM	LEGRUM	GRIMM
w-Werte	[kg/m ² ·√h]				
Probekörper 1		40,4	25,1	3,9	1,9
Probekörper 2		32,5	23,9	4,8	2
Probekörper 3		39,6	20	3,5	1,6
Probekörper 4		44	28,2	3	1,6
Probekörper 5		26	26,9	2,6	1,5
i.A.a DIN		9,5	6	3,6	4
WAK	[Gew.-%]	5,9	6,5	4	5,5
WAK	[Vol.-%]	11,9	12,9	8,7	12

(Literaturwerte im oberen Tabellenabschnitt aus: GRIMM 2018, LEGRUM 1991)

Tab. 4: Bemaßung der einzelnen Probekörper, daraus ermittelt: Volumen und Rohdichte (in Annäherung)

Probekörper	Trockengewicht	Kantenlängen			Volumen	Dichte, roh (Annäherung)
	m_r	a	b	c	V	($=m_r/V$)
	[g]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm ³]	[%]
BU 1	706,4	7,1	7,05	7	350,4	2,02
BU 2	718,11	7,1	7,062	7,08	355,0	2,02
BU 3	708,53	7,05	7	7,1	350,4	2,02
BU 4	705,03	7,05	7,05	7,05	350,4	2,01
BU 5	707,24	7,05	7,1	7,05	352,9	2,00
BS 1	691,86	7,1	7,1	7,05	355,4	1,95
BS 2	686,9	7,05	6,95	7,05	345,4	1,99
BS 3	694,46	7,05	7,1	7,05	352,9	1,97
BS 4	728,42	7,26	7,128	7,072	366,0	1,99
BS 5	685,7	7,1	7	7,1	352,9	1,94
LE 1	768,52	7	7,05	7	345,5	2,22
LE 2	759,18	6,95	7	7,05	343,0	2,21
LE 3	749,21	6,9	7	7	338,1	2,22
LE 4	750,15	7	7,1	6,95	345,4	2,17
LE 5	767,39	7,1	7,065	7,047	353,5	2,17
SA 1	772,57	7,2	7,1	7,1	363,0	2,13
SA 2	754,03	7,1	7	7,1	352,9	2,14
SA 3	769,82	7,3	7	7	357,7	2,15
SA 4	757,25	7,15	7,15	7,3	373,2	2,03
SA 5	769,84	7,144	7,115	7,016	356,6	2,16

Kapillare Wasseraufnahme am Prisma

Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadruzilus	
Kürzel:	BU2	
Gestein:	Bucher Sandstein	
Datum:	24.12.18	
Bearbeiter:	JMQ	

Probe:		
m0	718,11	g
l	7,08	cm
b	7,1	cm
h	7,062	cm
Fläche [m ²]	0,0050	m ²

w-Wert Start:	19
w-Wert Verlauf:	9,5
Achsenabschnitt:	1

t [sec]	Wurzel [sec]	m [g]	[kg/m ²]	w [kg/m ² h ^{0.5}]	Annäherung Start [kg/m ²]	Annäherung Verlauf [kg/m ²]
	0		0,0	0	0,0	
15	4	726,26	1,6	25,1	1,2	
30	5	728,37	2,0	22,4	1,7	
60	8	730,62	2,5	19,3	2,5	
120	11	733,62	3,1	16,9	3,5	
180	13	735,94	3,5	15,9	4,2	
240	15	737,94	3,9	15,3		3,5
480	22	739,6	4,3	11,7		4,5
600	24	743,53	5,1	12,4		4,9
900	30	750,61	6,5	12,9		5,8
1200	35	754,51	7,2	12,5		6,5
1800	42	759,33	8,2	11,6		7,7
2379	49	760,52	8,4	10,4		8,7
WAK						
2379		760,52				

Tab. 5: Wasseraufnahme am Prisma (BU2)

Kapillare Wasseraufnahme am Prisma

Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadrius		
Kürzel:	BS4		
Gestein:	Nürnberger Burgsandstein		
Datum:	24.12.18		
Bearbeiter:	JMQ		

Probe:		
m0	728,42	g
l	7,26	cm
b	7,072	cm
h	7,128	cm
Fläche [m ²]	0,0051	m ²

w-Wert Start:	20
w-Wert Verlauf:	6
Achsenabschnitt:	1,1

t [sec]	Wurzel [sec]	m [g]	[kg/m ²]	w [kg/m ² h ^{0.5}]	Annäherung Start [kg/m ²]	Annäherung Verlauf [kg/m ²]
	0		0,0	0	0,0	
15	4	734,74	1,2	19,1	1,3	
30	5	736,37	1,5	17,0	1,8	
60	8	737,68	1,8	14,0		1,9
120	11	739,71	2,2	12,0		2,2
180	13	741,05	2,5	11,0		2,4
240	15	742,23	2,7	10,4		2,6
306	17	743,07	2,9	9,8		2,8
480	22	745,96	3,4	9,4		3,3
600	24	747,14	3,6	8,9		3,5
900	30	749,84	4,2	8,3		4,1
1200	35	752,01	4,6	8,0		4,6
2400	49	758,94	5,9	7,3		6,0
3604	60	765	7,1	7,1		7,1
10904	104	775,8	9,2	5,3		11,5
WAK						
10904		775,8				

Tab. 6: Wasseraufnahme am Prisma (BS4)

Kapillare Wasseraufnahme am Prisma

Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadruzius		
Kürzel:	LE5		
Gestein:	Leistädter Sandstein		
Datum:	24.12.18		
Bearbeiter:	JMQ		

Probe:		
m0	767,39	g
l	7,1	cm
b	7,065	cm
h	7,047	cm
Fläche [m ²]	0,0050	m ²

w-Wert Start:	7
w-Wert Verlauf:	3,6
Achsenabschnitt:	0,5

t [sec]	[Wurzel (sec)]	m [g]	[kg/m ²]	w [kg/m ² h ^{0.5}]	Annäherung Start [kg/m ²]	Annäherung Verlauf [kg/m ²]
0	0		0,0	0	0,0	
30	5	771	0,7	7,9	0,6	
60	8	772	0,9	7,1	0,9	
120	11	773,1	1,1	6,2	1,3	
307	18	775,26	1,6	5,4		1,6
480	22	776,65	1,8	5,1		1,8
610	25	777,65	2,0	5,0		2,0
1200	35	780,51	2,6	4,5		2,6
1800	42	782,78	3,1	4,3		3,0
3600	60	787,56	4,0	4,0		4,1
13726	117	797,97	6,1	3,1		7,5
WAK						
13726		797,97				

Tab. 7: Wasseraufnahme am Prisma (LE5)

Kapillare Wasseraufnahme am Prisma

Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadrius	
Küzel:	SA5	
Gestein:	Sander Sandstein	
Datum:	24.12.18	
Bearbeiter:	JMQ	

Probe:		
m0	769,84	g
l	7,115	cm
b	7,144	cm
h	7,016	cm
Fläche [m ²]	0,0051	m ²

w-Wert Start:	4,6
w-Wert Verlauf:	4
Achsenabschnitt:	0,25

t [sec]	Wurzel [sec]	m [g]	[kg/m ²]	w [kg/m ² h ^{0.5}]	Annäherung Start [kg/m ²]	Annäherung Verlauf [kg/m ²]
0	0		0,0	0	0,0	
30	5	772,26	0,5	5,2	0,4	
60	8	773	0,6	4,8	0,6	
120	11	774,09	0,8	4,6	0,8	
300	17	776,16	1,2	4,3	1,3	
600	24	778,8	1,8	4,3		1,9
1200	35	782,51	2,5	4,3		2,6
1800	42	785,4	3,1	4,3		3,1
3600	60	791,72	4,3	4,3		4,3
21293	146	812,46	8,4	3,4		10,0
WAK						
21293		812,46				

Tab. 8: Wasseraufnahme am Prisma (SA5)

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht				
Probenbezeichnung	BU1			
Material	Bucher Sandstein			
Probeflüssigkeit	aqua dest.			
Datum	18.12.18			
Durchmesser Saugfläche [mm]	26			
	aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
	ml	min,sec	sec	
	0,5	0,02	2	
	1,5	0,06	6	
	2,5	0,12	12	
	3,2	0,16	16	
	3,6	0,19	19	
	4	0,23	23	

Tab. 9: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr BU1 - destilliertes Wasser

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht				
Probenbezeichnung	BU2			
Material	Bucher Sandstein			
Probeflüssigkeit	aqua dest.			
Datum	04.12.18			
Durchmesser Saugfläche [mm]	26			
	aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
	ml	min,sec	sec	
	0,3	0,03	3	
	0,9	0,09	9	
	1,2	0,13	13	
	1,4	0,16	16	
	1,6	0,20	20	
	1,9	0,25	25	
	2,1	0,29	29	
	2,3	0,33	33	
	2,6	0,39	39	
	2,8	0,42	42	
	3	0,48	48	
	3,2	0,52	52	
	3,5	1,00	60	
	3,7	1,07	67	
	4	1,14	74	

Tab. 10: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr BU2 - destilliertes Wasser

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht				
Probenbezeichnung	BU3			
Material	Bucher Sandstein			
Probeflüssigkeit	aqua dest.			
Datum	04.12.18			
Durchmesser Saugfläche [mm]	26			
	aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
	ml	min,sec	sec	
	0,5	0,03	3	
	1,2	0,09	9	
	1,7	0,13	13	
	2,1	0,18	18	
	2,4	0,22	22	
	2,6	0,26	26	
	3	0,30	30	
	3,2	0,34	34	
	3,5	0,39	39	
	3,7	0,42	42	
	3,9	0,47	47	
	4	0,49	49	

Tab. 12: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr BU3 - destilliertes Wasser

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht				
Probenbezeichnung	BU4			
Material	Bucher Sandstein			
Probeflüssigkeit	aqua dest.			
Datum	04.12.18			
Durchmesser Saugfläche [mm]	26			
	aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
	ml	min,sec	sec	
	0,6	0,06	6	
	1,5	0,08	8	
	2	0,15	15	
	2,5	0,21	21	
	3	0,27	27	
	3,3	0,31	31	
	3,8	0,36	36	
	4	0,40	40	

Tab. 11: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr BU4 - destilliertes Wasser

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht			
Probenbezeichnung	BU5		
Material	Bucher Sandstein		
Probeflüssigkeit	aqua dest.		
Datum	10.12.18		
Durchmesser Saugfläche [mm]	26		
aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
ml	min,sec	sec	
0,2	0,04	4	
0,4	0,07	7	
0,6	0,11	11	
0,9	0,17	17	
1,1	0,22	22	
1,3	0,26	26	
1,4	0,30	30	
1,6	0,34	34	
1,8	0,41	41	
2	0,47	47	
2,2	0,54	54	
2,5	1,03	63	
2,7	1,10	70	
2,8	1,14	74	
2,9	1,18	78	
3	1,22	82	
3,1	1,26	86	
3,2	1,30	90	
3,3	1,33	93	
3,4	1,39	99	
3,6	1,46	106	
3,7	1,51	111	
3,8	1,55	115	
3,9	2,00	120	
4	2,04	124	

Tab. 13: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr BU5 - destilliertes Wasser

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht			
Probenbezeichnung	BS1		
Material	Nürnberger Burgsandstein		
Probeflüssigkeit	aqua dest.		
Datum	14.12.18		
Durchmesser Saugfläche [mm]	26		
aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
ml	min,sec	sec	
0,2	0,03	3	
0,4	0,06	6	
0,6	0,09	9	
0,7	0,13	13	
0,9	0,18	18	
1,1	0,25	25	
1,2	0,28	28	
1,3	0,31	31	
1,4	0,35	35	
1,5	0,39	39	
1,6	0,43	43	
1,7	0,48	48	
1,8	0,53	53	
1,9	0,58	58	
2	1,03	63	
2,1	1,09	69	
2,2	1,13	73	
2,3	1,19	79	
2,4	1,25	85	
2,5	1,32	92	
2,6	1,39	99	
2,7	1,46	106	
2,8	1,52	112	
2,9	1,59	119	
3	2,09	129	
3,1	2,15	135	
3,2	2,24	144	
3,3	2,34	154	
3,4	2,41	161	
3,5	2,52	172	
3,6	3,00	180	
3,7	3,11	191	
3,8	3,20	200	
3,9	3,33	213	
4	3,43	223	

Tab. 14: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr BS1 - destilliertes Wasser

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht			
Probenbezeichnung	BS2		
Material	Nürnberger Burgsandstein		
Probeflüssigkeit	aqua dest.		
Datum	03.12.18		
Durchmesser Saugfläche [mm]	26		
aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
ml	min,sec	sec	
0,4	0,06	6	
0,5	0,09	9	
0,7	0,12	12	
0,9	0,15	15	
1	0,19	19	
1,2	0,23	23	
1,4	0,28	28	
1,6	0,35	35	
1,8	0,40	40	
2	0,45	45	
2,1	0,49	49	
2,2	0,53	53	
2,3	0,56	56	
2,4	1,00	60	
2,5	1,04	64	
2,7	1,11	71	
3	1,23	83	
3,2	1,32	92	
3,4	1,42	102	
3,6	1,52	112	
3,8	2,05	125	
4	2,16	136	

Tab. 15: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr BS2 - destilliertes Wasser

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht			
Probenbezeichnung	BS3		
Material	Nürnberger Burgsandstein		
Probeflüssigkeit	aqua dest.		
Datum	14.12.18		
Durchmesser Saugfläche [mm]	26		
aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
ml	min,sec	sec	
0,1	0,03	3	
0,4	0,07	7	
0,5	0,08	8	
0,6	0,16	16	
0,7	0,21	21	
0,8	0,26	26	
0,9	0,31	31	
1	0,36	36	
1,1	0,43	43	
1,2	0,50	50	
1,3	0,57	57	
1,4	1,06	66	
1,5	1,14	74	
1,6	1,22	82	
1,7	1,33	93	
1,8	1,43	103	
1,9	1,53	113	
2	2,04	124	
2,2	2,29	149	
2,3	2,40	160	
2,4	2,55	175	
2,5	3,09	189	
2,6	3,25	205	
2,7	3,44	224	
2,9	4,21	261	
3	4,33	273	
3,1	4,52	292	
3,2	5,09	309	
3,3	5,40	340	
3,4	5,59	359	
3,6	6,35	395	
3,7	7,04	424	
3,8	7,3	450	
3,9	7,51	471	
4	8,19	499	

Tab. 16: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr BS3 - destilliertes Wasser

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht			
Probenbezeichnung	BS4		
Material	Nürnberger Burgsandstein		
Probeflüssigkeit	aqua dest.		
Datum	12.12.18		
Durchmesser Saugfläche [mm]	26		
aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
ml	min,sec	sec	
0,3	0,05	5	
0,4	0,07	7	
0,5	0,08	8	
0,6	0,10	10	
0,8	0,15	15	
0,9	0,18	18	
1	0,21	21	
1,1	0,24	24	
1,2	0,30	30	
1,7	0,42	42	
1,9	0,45	45	
2	0,49	49	
2,1	0,54	54	
2,2	0,58	58	
2,3	1,04	64	
2,4	1,10	70	
2,5	1,16	76	
2,8	1,32	92	
2,9	1,38	98	
3,1	1,53	113	
3,3	2,07	127	
3,4	2,15	135	
3,5	2,22	142	
3,6	2,31	151	
3,7	2,37	157	
3,8	2,47	167	
3,9	2,57	177	
4	3,07	187	

Tab. 17: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr BS4 - destilliertes Wasser

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht				
Probenbezeichnung	BS5			
Material	Nürnberger Burgsandstein			
Probeflüssigkeit	aqua dest.			
Datum	03.12.18			
Durchmesser Saugfläche [mm]	26			
	aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
	ml	min,sec	sec	
	0,5	0,05	5	
	0,8	0,10	10	
	1	0,14	14	
	1,4	0,22	22	
	1,6	0,27	27	
	1,9	0,36	36	
	2,5	0,56	56	
	2,8	1,05	65	
	3	1,14	74	
	3,4	1,29	89	
	3,6	1,35	95	
	3,8	1,44	104	
	4	1,54	114	

Tab. 18: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr BS5 - destilliertes Wasser

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht			
Probenbezeichnung	LE1		
Material	Leistädter Sandstein		
Probeflüssigkeit	aqua dest.		
Datum	04.12.18		
Durchmesser Saugfläche [mm]	26		
aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
ml	min,sec	sec	
0,1	0,02	2	
0,2	0,14	14	
0,3	0,44	44	
0,4	1,22	82	Hofbildung <1mm 10-11h
0,5	2,12	132	
0,6	3,18	198	Hof ca. 1mm
0,7	4,31	271	
0,8	6,03	363	ca. 1,5mm
0,9	7,58	478	
1	9,57	597	
1,2	14,20	860	Hofbildung <1mm 2-4h
1,5	21,58	1318	
1,7	28,04	1684	
2,1	40,52	2452	
2,3	49,02	2942	
2,4	56,09	3369	
2,6	60,02	3602	Abbruch nach 60min

Tab. 19: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr LE1 - destilliertes Wasser

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht			
Probenbezeichnung	LE2		
Material	Leistädter Sandstein		
Probeflüssigkeit	aqua dest.		
Datum	14.12.18		
Durchmesser Saugfläche [mm]	26		
aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
ml	min,sec	sec	
0,1	0,14	14	
0,2	0,33	33	
0,3	1,07	67	
0,4	1,38	98	
0,5	2,31	151	
0,6	3,23	203	
0,7	4,23	263	
0,8	5,35	335	
0,9	7,09	429	
1	8,30	510	
1,1	9,59	599	
1,2	12,02	722	
1,3	13,40	820	
1,4	15,54	954	
1,5	17,49	1069	
1,6	19,47	1187	
1,7	22,20	1340	
1,8	24,26	1466	
1,9	26,54	1614	
2	29,16	1756	
2,1	31,46	1906	
2,2	34,32	2072	
2,3	37,31	2251	
2,5	43,21	2601	
2,6	46,33	2793	
2,7	49,37	2977	
2,8	52,53	3173	
2,9	55,51	3351	
3	59,43	3583	Abbruch nach 60min

Tab. 20: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr LE2 - destilliertes Wasser

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht			
Probenbezeichnung	LE3		
Material	Leistädter Sandstein		
Probeflüssigkeit	aqua dest.		
Datum	12.12.18		
Durchmesser Saugfläche [mm]	26		
aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
ml	min,sec	sec	
0,1	0,05	5	
0,2	0,29	29	
0,3	1,00	60	
0,4	1,46	106	
0,5	2,41	161	
0,6	3,44	224	
0,7	5,01	301	Hof ca 1mm 9-11h
0,8	6,36	396	
0,9	8,12	492	
1	9,49	589	
1,1	11,48	708	
1,2	13,47	827	
1,3	15,44	944	
1,4	18,31	1111	
1,5	20,46	1246	
1,6	23,28	1408	
1,8	29,29	1769	
2	36,02	2162	
2,2	42,22	2542	
2,4	46,04	2764	
2,5	53,32	3212	
2,6	57,47	3467	Abbruch nach 60min

Tab. 21: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr LE3 - destilliertes Wasser

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht			
Probenbezeichnung	LE4		
Material	Leistädter Sandstein		
Probeflüssigkeit	aqua dest.		
Datum	20.12.18		
Durchmesser Saugfläche [mm]	26		
aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
ml	min,sec	sec	
0,1	0,12	12	
0,2	0,55	55	
0,3	2,09	129	
0,4	3,39	219	
0,5	5,57	357	
0,6	8,58	538	
0,8	15,27	927	
1,2	34,13	2053	
1,5	52,09	3129	
1,8	73,13	4393	
2,6	135,48	8148	
2,9	164,56	9896	
3,2	190,18	11418	
3,3	200,54	12054	
3,5	221,49	13309	
4	272,02	16322	

Tab. 22: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr LE4 - destilliertes Wasser

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht			
Probenbezeichnung	LE5		
Material	Leistädter Sandstein		
Probeflüssigkeit	aqua dest.		
Datum	14.12.18		
Durchmesser Saugfläche [mm]	26		
aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
ml	min,sec	sec	
0,1	0,14	14	
0,2	0,34	34	
0,3	1,08	68	
0,4	1,45	105	
0,5	2,40	160	
0,6	3,31	211	
0,7	4,37	277	
0,8	5,52	352	
0,9	7,16	436	
1	8,58	538	
1,1	10,29	629	
1,2	11,58	718	
1,3	14,09	849	
1,4	15,27	927	
1,5	17,20	1040	
1,6	19,16	1156	
1,7	20,53	1253	
1,8	22,48	1368	
1,9	24,47	1487	
2	26,26	1586	
2,1	27,52	1672	
2,2	29,21	1761	
2,3	30,52	1852	
2,4	32,44	1964	
2,5	34,20	2060	Abbruch undicht

Tab. 23: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr LE5 - destilliertes Wasser

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht			
Probenbezeichnung	SA1		
Material	Sander Sandstein		
Probeflüssigkeit	aqua dest.		
Datum	03.12.18		
Durchmesser Saugfläche [mm]	26		
aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
ml	min,sec	sec	
0,1	0,45	45	
0,2	2,20	140	
0,3	4,10	250	
0,4	6,18	378	
0,5	8,58	538	
0,6	12,06	726	
0,7	14,56	896	
0,8	17,46	1066	
0,9	21,04	1264	
1	24,58	1498	
1,1	28,38	1718	
1,2	31,54	1914	
1,3	34,46	2086	
1,4	38,14	2294	Hof <1mm kompl
1,5	42,24	2544	
1,6	45,56	2756	
1,7	49,13	2953	Hof ca.1mm
1,8	52,44	3164	
1,9	56,32	3392	
2	60,02	3602	

Tab. 24: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr SA1 - destilliertes Wasser

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht			
Probenbezeichnung	SA2		
Material	Sander Sandstein		
Probeflüssigkeit	aqua dest.		
Datum	05.12.18		
Durchmesser Saugfläche [mm]	26		
aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
ml	min,sec	sec	
0,1	0,12	12	
0,2	1,21	81	
0,3	3,04	184	
0,4	5,20	320	
0,5	8,06	486	
0,6	11,26	686	
0,7	13,41	821	
0,8	17,36	1056	
0,9	20,08	1208	
1	23,36	1416	
1,1	26,56	1616	
1,2	31,23	1883	
1,3	34,25	2065	
1,4	38,14	2294	
1,5	43,05	2585	
1,7	50,09	3009	
1,8	54,51	3291	
1,9	59,10	3550	

Tab. 25: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr SA2 - destilliertes Wasser

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht				
Probenbezeichnung	SA3			
Material	Sander Sandstein			
Probeflüssigkeit	aqua dest.			
Datum	14.12.18			
Durchmesser Saugfläche [mm]	26			
	aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
	ml	min,sec	sec	
	0,1	1,15	75	
	0,2	2,57	177	
	0,3	4,26	266	
	0,4	7,22	442	
	0,5	9,35	575	
	0,6	13,20	800	
	0,8	18,40	1120	
	0,9	22,10	1330	
	1	25,24	1524	
	1,1	29,03	1743	
	1,2	33,23	2003	
	1,3	36,33	2193	
	1,4	40,16	2416	
	1,5	43,28	2608	
	1,6	47,18	2838	
	1,7	51,19	3079	
	1,8	55,31	3331	
	1,9	58,49	3529	
	2	60,00	3600	

Tab. 26: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr SA3 - destilliertes Wasser

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht				
Probenbezeichnung	SA4			
Material	Sander Sandstein			
Probeflüssigkeit	aqua dest.			
Datum	10.01.19			
Durchmesser Saugfläche [mm]	26			
	aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
	ml	min,sec	sec	
	0,2	2,44	164	
	0,3	6,14	374	
	0,6	18,18	1098	
	0,7	22,47	1367	
	1	38,14	2294	
	1,5	68,21	4101	
	1,7	80,56	4856	
	2,2	111,20	6680	
	2,8	149,02	8942	
	3	160,21	9621	
	3,2	173,22	10402	

Tab. 27: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr SA4 - destilliertes Wasser

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht				
Probenbezeichnung	SA5			
Material	Sander Sandstein			
Probeflüssigkeit	aqua dest.			
Datum	20.12.18			
Durchmesser Saugfläche [mm]	26			
	aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
	ml	min,sec	sec	
	0,1	0,58	58	
	0,2	2,33	153	
	0,3	5,28	328	
	0,4	7,54	474	
	0,6	14,59	899	
	1	31,26	1886	
	1,4	50,37	3037	
	3	131,58	7918	
	3,3	148,12	8892	
	3,6	163,58	9838	
	4	185,35	11135	

Tab. 28: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr SA5 - destilliertes Wasser

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht				
Probenbezeichnung	BU1			
Material	Bucher Sandstein			
Probeflüssigkeit	KMnO ₄ -Lsg. 0,04M			
Datum	31.12.18			
Durchmesser Saugfläche [mm]	26			
	aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
	ml	min,sec	sec	
	0,5	0,03	3	
	1	0,06	6	
	1,5	0,09	9	
	2	0,12	12	

Tab. 29: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr BU1 - KMnO₄-Lösung

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht				
Probenbezeichnung	BU3			
Material	Bucher Sandstein			
Probeflüssigkeit	KMnO ₄ -Lsg. 0,04M			
Datum	31.12.18			
Durchmesser Saugfläche [mm]	26			
	aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
	ml	min,sec	sec	
	0,3	0,03	3	
	1	0,08	8	
	1,2	0,10	10	
	1,5	0,14	14	
	1,9	0,18	18	
	2	0,22	22	

Tab. 30: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr BU3 - KMnO₄-Lösung

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht				
Probenbezeichnung	BU2			
Material	Bucher Sandstein			
Probeflüssigkeit	KMnO ₄ -Lsg. 0,04M			
Datum	31.12.18			
Durchmesser Saugfläche [mm]	26			
	aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
	ml	min,sec	sec	
	0,1	0,03	3	
	0,2	0,05	5	
	0,3	0,08	8	
	0,4	0,11	11	
	0,5	0,13	13	
	0,6	0,17	17	
	0,7	0,20	20	
	0,8	0,23	23	
	0,9	0,27	27	
	1	0,30	30	
	1,1	0,33	33	
	1,2	0,37	37	
	1,3	0,41	41	
	1,4	0,44	44	
	1,5	0,49	49	
	1,6	0,52	52	
	1,7	0,56	56	
	1,8	1,01	61	
	1,9	1,05	65	
	2	1,09	69	

Tab. 31: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr BU2 - KMnO₄-Lösung

Karsten'sches Prüfröhrchen, senkrecht				
Probenbezeichnung	BU4			
Material	Bucher Sandstein			
Probeflüssigkeit	KMnO ₄ -Lsg. 0,04M			
Datum	24.12.18			
Durchmesser Saugfläche [mm]	26			
	aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
	ml	min,sec	sec	
	0	0	0	
	0,2	0,01	1	
	0,3	0,05	5	
	0,9	0,09	9	
	1,2	0,12	12	
	1,4	0,18	18	
	1,7	0,21	21	
	2,5	0,31	31	
	3	0,41	41	
	3,2	0,45	45	
	3,3	0,47	47	
	3,4	0,50	50	
	3,5	0,52	52	
	3,7	0,57	57	
	3,8	1,00	60	
	3,9	1,02	62	
	4	1,05	65	

Tab. 32: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr BU4 - KMnO₄-Lösung

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht			
Probenbezeichnung	BS1		
Material	Nürnberger Burgsandstein		
Probeflüssigkeit	KMnO ₄ -Lsg. 0,04M		
Datum	29.12.18		
Durchmesser Saugfläche [mm]	26		
aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
ml	min,sec	sec	
0,3	0,05	5	
0,4	0,10	10	
0,5	0,14	14	
0,7	0,21	21	
0,8	0,27	27	
1	0,35	35	
1,2	0,47	47	
1,3	0,54	54	
1,4	1,02	62	
1,5	1,09	69	
1,6	1,16	76	
1,7	1,24	84	
1,8	1,33	93	
2	1,50	110	
2,1	2,00	120	
2,4	2,28	148	
2,5	2,39	159	
2,7	3,00	180	
3	3,33	213	
3,2	3,57	237	
3,4	4,27	267	
3,8	5,18	318	
3,9	5,35	335	Durchbricht Seiten
4	5,46	346	im Nachsaugen

Tab. 33: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr BS1 - KMnO₄-Lösung

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht			
Probenbezeichnung	BS2		
Material	Nürnberger Burgsandstein		
Probeflüssigkeit	KMnO ₄ -Lsg. 0,04M		
Datum	30.12.18		
Durchmesser Saugfläche [mm]	26		
aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
ml	min,sec	sec	
0,1	0,02	2	
0,3	0,06	6	
0,5	0,10	10	
0,7	0,15	15	
0,9	0,21	21	
1,1	0,27	27	
1,2	0,30	30	
1,3	0,34	34	
1,5	0,41	41	
1,6	0,45	45	
1,7	0,49	49	
1,8	0,54	54	
1,9	0,57	57	
2	1,01	61	
2,1	1,06	66	
2,2	1,11	71	
2,3	1,15	75	
2,4	1,21	81	
2,6	1,30	90	
2,7	1,37	97	
2,8	1,42	102	
3	1,50	110	
3,1	1,58	118	
3,3	2,10	130	
3,4	2,16	136	
3,6	2,30	150	
3,7	2,36	156	
3,8	2,44	164	
3,9	2,49	169	
4	2,55	175	

Tab. 34: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr BS2 - KMnO₄-Lösung

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht			
Probenbezeichnung	BS5		
Material	Nürnberger Burgsandstein		
Probeflüssigkeit	KMnO ₄ -Lsg. 0,04M		
Datum	30.12.18		
Durchmesser Saugfläche [mm]	26		
aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
ml	min,sec	sec	
0,3	0,07	7	
0,5	0,10	10	
0,6	0,13	13	
0,7	0,16	16	
0,9	0,21	21	
1,1	0,27	27	
1,2	0,31	31	
1,4	0,38	38	
1,6	0,45	45	
1,8	0,54	54	
1,9	0,58	58	
2,1	1,07	67	
2,3	1,16	76	
2,5	1,26	86	
2,7	1,36	96	
2,9	1,47	107	
3,1	1,58	118	
3,2	2,04	124	
3,3	2,10	130	
3,4	2,17	137	
3,5	2,23	143	
3,7	2,35	155	
3,9	2,48	168	
4	2,55	175	

Tab. 35: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr BS5 - KMnO₄-Lösung

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht				
Probenbezeichnung	LE3			
Material	Leistädter Sandstein			
Probeflüssigkeit	KMnO ₄ -Lsg. 0,04M			
Datum	29.12.18			
Durchmesser Saugfläche [mm]	26			
	aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
	ml	min,sec	sec	
	0,1	1,05	65	
	0,2	2,36	156	
	0,3	4,10	250	
	0,4	5,51	351	
	0,5	8,12	492	
	0,6	10,09	609	
	1	21,35	1295	
	1,5	40,16	2416	
	2	62,00	3720	
	2,5	86,00	5160	
	3	112,12	6732	
	3,5	141,55	8515	
	4	171,41	10301	

Tab. 37: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr LE3 - KMnO₄-Lösung

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht				
Probenbezeichnung	SA2			
Material	Sander Sandstein			
Probeflüssigkeit	KMnO ₄ -Lsg. 0,04M			
Datum	30.12.18			
Durchmesser Saugfläche [mm]	26			
	aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
	ml	min,sec	sec	
	0,1	1,35	95	
	0,2	4,01	241	
	0,3	6,35	395	
	0,5	11,46	706	
	1,7	51,12	3072	
	2,4	76,22	4582	
	3,2	105,49	6349	
	4	136,21	8181	

Tab. 36: Messwerte Karsten'sches Prüfröhr SA2 - KMnO₄-Lösung

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht				
Probenbezeichnung	LE4			
Material	Leistädter Sandstein			
Probeflüssigkeit	KMnO ₄ -Lsg. 0,04M			
Datum	08.01.19			
Durchmesser Saugfläche [mm]	26			
	aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
	ml	min,sec	sec	
	0,1	0,35	35	
	0,2	2,44	164	
	0,3	6,36	396	
	0,4	12,13	733	
	0,5	17,55	1075	
	0,6	25,51	1551	
	0,7	31,44	1904	
	0,8	41,06	2466	
	0,9	48,50	2930	
	1	59,56	3596	
	1,2	76,36	4596	
	1,5	103,11	6191	
	1,9	152,49	9169	
	2,6	238,26	14306	
	2,8	266,01	15961	
	3	293,38	17618	

Tab. 38: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr LE4 - KMnO₄-Lösung

Karsten'sches Prüfröhrchen, waagrecht				
Probenbezeichnung	SA3			
Material	Sander Sandstein			
Probeflüssigkeit	KMnO ₄ -Lsg. 0,04M			
Datum	08.01.19			
Durchmesser Saugfläche [mm]	26			
	aufgenommene Menge	Zeit		Kommentar
	ml	min,sec	sec	
	0,1	1,33	93	
	0,2	3,54	234	
	0,3	6,43	403	
	0,4	10,19	619	
	0,5	13,51	831	
	0,7	20,57	1257	
	1,1	36,30	2190	
	1,2	44,05	2645	
	1,5	52,10	3130	
	2,6	97,48	5868	
	2,7	102,30	6150	
	2,9	110,25	6625	
	3	115,34	6934	
	3,2	123,48	7428	
	3,3	128,48	7728	
	3,5	136,42	8202	
	3,6	140,48	8448	
	3,8	149,28	8968	
	4	157,51	9471	

Tab. 39: Messwerte Karsten'sches Prüfrohr SA3 - KMnO₄-Lösung

Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen nach WENDLER (VERSION 3.22)			
Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:			
Probenbezeichnung:	BU1		
Datum der Messung:	18.12.18		
Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadrius		
Gestein:	Bucher Sandstein		
Besonderheiten:	"schnellste" Kurve		
Meßdaten und Auswertung:			
Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]:	2,60		
Saugfläche (cm²):	5,31		
Abschätzung des B-Wertes			
Untere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	0,50		
Obere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	28,00		
Schrittweite:	2,75		
Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen
1	0,00	0,00	
2	0,02	0,5	
3	0,06	1,5	
4	0,12	2,5	
5	0,16	3,2	
6	0,19	3,6	
7	0,23	4	
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
Wassereindringverhalten mit dem Prüfröhrchen nach KARSTEN			
Korrelationskoeffizient			
Auswertungsergebnisse			
max. Korrelationskoeffizient: 0,99774 Optimierter w-Wert: 40,42 [l/(m ² h ^{0,5})] Zugehöriger B-Wert: 11,50 [cm/h ^{0,5}] Wasseraufnahmekapazität: 35,14 [%]			

Tab. 40: Auswertungsmaske Calkarow (BU1)

Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen nach WENDLER (VERSION 3.22)			
Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:			
Probenbezeichnung:	BU2		
Datum der Messung:	04.12.18		
Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadrizius		
Gestein:	Bucher Sandstein		
Besonderheiten:			
Meßdaten und Auswertung:			
Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]:	2,60		
Saugfläche [cm ²):	5,31		
Abschätzung des B-Wertes			
Untere Grenze [cm/h ^{0,5}):	0,20		
Obere Grenze [cm/h ^{0,5}):	7,00		
Schrittweite:	0,68		
Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen
1	0,00	0,00	
2	0,03	0,30	
3	0,09	0,90	
4	0,13	1,20	
5	0,16	1,40	
6	0,20	1,60	
7	0,25	1,90	
8	0,29	2,10	
9	0,33	2,30	
10	0,39	2,60	
11	0,42	2,80	
12	0,48	3,00	
13	0,52	3,20	
14	1,00	3,50	
15	1,14	4,00	
Wassereindringverhalten mit dem Prüfröhrchen nach KARSTEN			
Korrelationskoeffizient			
Auswertungsergebnisse			
max. Korrelationskoeffizient:	0,99688		
Optimierter w-Wert:	32,51 [l/(m²h^{0,5})]		
Zugehöriger B-Wert:	3,60 [cm/h^{0,5})]		
Wasseraufnahmekapazität:	90,31 [%]		

Tab. 41: Auswertungsmaske Calkarow (BU2)

Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen nach WENDLER (VERSION 3.22)																																																																	
Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:																																																																	
Probenbezeichnung:	BU3																																																																
Datum der Messung:	04.12.18																																																																
Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadrizius																																																																
Gestein:	Bucher Sandstein																																																																
Besonderheiten:	"mittlere" Kurve																																																																
Meßdaten und Auswertung:																																																																	
Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]:	2,60																																																																
Saugfläche (cm ²):	5,31																																																																
Abschätzung des B-Wertes																																																																	
Untere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	0,50																																																																
Obere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	8,00																																																																
Schrittweite:	0,75																																																																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Nr. der Ablesung</th> <th>Eindringzeit [min,sec]</th> <th>Volumen [ml]</th> <th>Notizen</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>0,03</td><td>0,5</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>0,09</td><td>1,2</td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>0,13</td><td>1,7</td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td>0,18</td><td>2,1</td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td>0,22</td><td>2,4</td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td>0,26</td><td>2,6</td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td>0,30</td><td>3</td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td>0,34</td><td>3,2</td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td>0,39</td><td>3,5</td><td></td></tr> <tr><td>11</td><td>0,42</td><td>3,7</td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td>0,47</td><td>3,9</td><td></td></tr> <tr><td>13</td><td>0,49</td><td>4</td><td></td></tr> <tr><td>14</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>15</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen	1	0,00	0,00		2	0,03	0,5		3	0,09	1,2		4	0,13	1,7		5	0,18	2,1		6	0,22	2,4		7	0,26	2,6		8	0,30	3		9	0,34	3,2		10	0,39	3,5		11	0,42	3,7		12	0,47	3,9		13	0,49	4		14				15				<div style="text-align: center;"> Wassereindringverhalten mit dem Prüfröhrchen nach KARSTEN </div>
Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen																																																														
1	0,00	0,00																																																															
2	0,03	0,5																																																															
3	0,09	1,2																																																															
4	0,13	1,7																																																															
5	0,18	2,1																																																															
6	0,22	2,4																																																															
7	0,26	2,6																																																															
8	0,30	3																																																															
9	0,34	3,2																																																															
10	0,39	3,5																																																															
11	0,42	3,7																																																															
12	0,47	3,9																																																															
13	0,49	4																																																															
14																																																																	
15																																																																	
<div style="text-align: center;"> Korrelationskoeff. </div>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 60%;">max. Korrelationskoeffizient:</td> <td style="color: red;">0,99777</td> </tr> <tr> <td>Optimierter w-Wert:</td> <td style="color: red;">39,55 [l/(m²h^{0,5})]</td> </tr> <tr> <td>Zugehöriger B-Wert:</td> <td style="color: red;">4,25 [cm/h^{0,5}]</td> </tr> <tr> <td>Wasseraufnahmekapazität:</td> <td style="color: red;">93,07 [%]</td> </tr> </table>	max. Korrelationskoeffizient:	0,99777	Optimierter w-Wert:	39,55 [l/(m²h^{0,5})]	Zugehöriger B-Wert:	4,25 [cm/h^{0,5}]	Wasseraufnahmekapazität:	93,07 [%]																																																								
max. Korrelationskoeffizient:	0,99777																																																																
Optimierter w-Wert:	39,55 [l/(m²h^{0,5})]																																																																
Zugehöriger B-Wert:	4,25 [cm/h^{0,5}]																																																																
Wasseraufnahmekapazität:	93,07 [%]																																																																
Auswertungsergebnisse																																																																	

Tab. 42: Auswertungsmaske Calkarow (BU3)

Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen nach WENDLER (VERSION 3.22)			
Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:			
Probenbezeichnung:	BU4		
Datum der Messung:	04.12.18		
Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadrizius		
Gestein:	Bucher Sandstein		
Besonderheiten:			
Meßdaten und Auswertung:			
Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]:	2,60		
Saugfläche (cm²):	5,31		
Abschätzung des B-Wertes			
Untere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	0,50		
Obere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	8,00		
Schrittweite:	0,75		
Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen
1	0,00	0,00	
2	0,08	1,5	
3	0,15	2	
4	0,21	2,5	
5	0,27	3	
6	0,31	3,3	
7	0,36	3,8	
8	0,40	4	
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
Wassereindringverhalten mit dem Prüfröhrchen nach KARSTEN			
Korrelationskoeff.			
Auswertungsergebnisse			
max. Korrelationskoeffizient: 0,99947 Optimierter w-Wert: 44,02 [l/(m²·h^{0,5})] Zugehöriger B-Wert: 4,25 [cm/h^{0,5}] Wasseraufnahmekapazität: 103,57 [%]			

Tab. 43: Auswertungsmaske Calkarow (BU4)

Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen nach WENDLER (VERSION 3.22)

Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:

Probenbezeichnung:	BU5
Datum der Messung:	10.12.18
Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadruzius
Gestein:	Bucher Sandstein
Besonderheiten:	"langsamste" Kurve

Meßdaten und Auswertung:

Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]:	2,60
Saugfläche (cm²):	5,31

Abschätzung des B-Wertes

Untere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	0,80
Obere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	5,50
Schrittweite:	0,47

Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen
1	0,00	0,00	
2	0,04	0,20	
3	0,07	0,40	
4	0,11	0,60	
5	0,22	1,10	
6	0,34	1,60	
7	0,41	1,80	
8	0,47	2,00	
9	0,54	2,20	
10	1,03	2,50	
11	1,10	2,70	
12	1,22	3,00	
13	1,39	3,40	
14	1,46	3,60	
15	2,04	4,00	

Wassereindringverhalten mit dem Prüfröhrchen nach KARSTEN

The graph plots volume V [ml] on the y-axis (0.0 to 5.0) against time t [min] on the x-axis (0 to 3). Data points are shown as black circles connected by a line, and a pink line represents the ideal curve fit. The data points follow a curve that starts linearly and then levels off slightly.

The graph plots the correlation coefficient on the y-axis (0.992 to 0.997) against the B-value [cm/h^{0,5}] on the x-axis (0 to 6). The data points are black circles connected by a line, showing a peak correlation coefficient of approximately 0.9967 at a B-value of about 2.68.

Auswertungsergebnisse	max. Korrelationskoeffizient: 0,99607 Optimierter w-Wert: 26,02 [l/(m ² *h ^{0,5})] Zugehöriger B-Wert: 2,68 [cm/h ^{0,5}] Wasseraufnahmekapazität: 97,08 [%]
------------------------------	---

Tab. 44: Auswertungsmaske Calkarow (BU5)

Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen nach WENDLER (VERSION 3.22)			
Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:			
Probenbezeichnung:	BS1		
Datum der Messung:	14.12.18		
Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadrizius		
Gestein:	Nürnberger Burgsandstein		
Besonderheiten:			
Meßdaten und Auswertung:			
Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]:	2,60		
Saugfläche (cm ²):	5,31		
Abschätzung des B-Wertes			
Untere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	0,05		
Obere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	1,45		
Schrittweite:	0,14		
Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen
1	0,00	0,00	
2	0,06	0,40	
3	0,13	0,70	
4	0,31	1,30	
5	0,48	1,70	
6	1,09	2,10	
7	1,59	2,90	
8	2,24	3,20	
9	3,00	3,60	
10	3,20	3,80	
11	3,43	4,00	
12			
13			
14			
15			
Wassereindringverhalten mit dem Prüfröhrchen nach KARSTEN			
Korrelationskoeff.			
Auswertungsergebnisse			
max. Korrelationskoeffizient: 0,99895 Optimierter w-Wert: 25,14 [l/(m ² h ^{0,5})] Zugehöriger B-Wert: 0,75 [cm/h ^{0,5}] Wasseraufnahmekapazität: 335,17 [%]			

Tab. 45: Auswertungsmaske Calkarow (BS1)

Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen nach WENDLER (VERSION 3.22)											
Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:											
Probenbezeichnung:	BS2										
Datum der Messung:	03.12.18										
Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadrius										
Gestein:	Nürnberger Burgsandstein										
Besonderheiten:											
Meßdaten und Auswertung:											
Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]:	2,60										
Saugfläche (cm²):	5,31										
Abschätzung des B-Wertes											
Untere Grenze [cm/h^{0,5}):	0,50										
Obere Grenze [cm/h^{0,5}):	5,50										
Schrittweite:	0,50										
Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen								
1	0,00	0,00									
2	0,06	0,40									
3	0,12	0,70									
4	0,28	1,40									
5	0,45	2,00									
6	1,00	2,40									
7	1,32	3,20									
8	1,52	3,60									
9	2,16	4,00									
10											
11											
12											
13											
14											
15											
Wassereindringverhalten mit dem Prüfröhrchen nach KARSTEN											
Korrelationskoeff.											
Auswertungsergebnisse											
<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td>max. Korrelationskoeffizient:</td> <td style="color: red;">0,99779</td> </tr> <tr> <td>Optimierter w-Wert:</td> <td style="color: red;">23,93 [l/(m²h^{0,5})]</td> </tr> <tr> <td>Zugehöriger B-Wert:</td> <td style="color: red;">2,50 [cm/h^{0,5}]</td> </tr> <tr> <td>Wasseraufnahmekapazität:</td> <td style="color: red;">95,71 [%]</td> </tr> </table>				max. Korrelationskoeffizient:	0,99779	Optimierter w-Wert:	23,93 [l/(m ² h ^{0,5})]	Zugehöriger B-Wert:	2,50 [cm/h ^{0,5}]	Wasseraufnahmekapazität:	95,71 [%]
max. Korrelationskoeffizient:	0,99779										
Optimierter w-Wert:	23,93 [l/(m ² h ^{0,5})]										
Zugehöriger B-Wert:	2,50 [cm/h ^{0,5}]										
Wasseraufnahmekapazität:	95,71 [%]										

Tab. 46: Auswertungsmaske Calkarow (BS2)

Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen nach WENDLER (VERSION 3.22)			
Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:			
Probenbezeichnung:	BS3		
Datum der Messung:	14.12.18		
Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadrius		
Gestein:	Nürnberger Burgsandstein		
Besonderheiten:			
Meßdaten und Auswertung:			
Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]:	2,60		
Saugfläche (cm²):	5,31		
Abschätzung des B-Wertes			
Untere Grenze [cm/h^{0,5}):	0,07		
Obere Grenze [cm/h^{0,5}):	1,00		
Schrittweite:	0,09		
Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen
1	0,00	0,00	
2	0,07	0,40	
3	0,16	0,60	
4	0,36	1,00	
5	0,57	1,30	
6	1,14	1,50	
7	1,43	1,80	
8	2,04	2,00	
9	2,29	2,20	
10	3,25	2,60	
11	4,52	3,10	
12	6,35	3,60	
13	8,19	4,00	
14			
15			
Wassereindringverhalten mit dem Prüfröhrchen nach KARSTEN			
Korrelationskoeff.			
Auswertungsergebnisse			
max. Korrelationskoeffizient: 0,99956 Optimierter w-Wert: 20,03 [l/(m²h^{0,5})] Zugehöriger B-Wert: 0,07 [cm/h^{0,5}] Wasseraufnahmekapazität: 2861,69 [%]			

Tab. 47: Auswertungsmaske Calkarow (BS3)

Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen nach WENDLER (VERSION 3.22)			
Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:			
Probenbezeichnung:	BS4		
Datum der Messung:	12.12.18		
Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadruzius		
Gestein:	Nürnberger Burgsandstein		
Besonderheiten:	"mittlere" Kurve		
Meßdaten und Auswertung:			
Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]:	2,60		
Saugfläche (cm²):	5,31		
Abschätzung des B-Wertes			
Untere Grenze [cm/h^{0,5}]:	0,90		
Obere Grenze [cm/h^{0,5}]:	7,00		
Schrittweite:	0,61		
Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen
1	0,00	0,00	
2	0,05	0,30	
3	0,07	0,40	
4	0,08	0,50	
5	0,10	0,60	
6	0,15	0,80	
7	0,21	1,00	
8	0,42	1,70	
9	0,49	2,00	
10	1,16	2,50	
11	1,32	2,80	
12	1,53	3,10	
13	2,15	3,40	
14	2,31	3,60	
15	3,07	4,00	
Wassereindringverhalten mit dem Prüfröhrchen nach KARSTEN			
Korrelationskoeffizient			
Auswertungsergebnisse			
max. Korrelationskoeffizient:		0,99559	
Optimierter w-Wert:		28,81 [l/(m²h^{0,5})]	
Zugehöriger B-Wert:		0,90 [cm/h^{0,5}]	
Wasseraufnahmekapazität:		320,07 [%]	

Tab. 48: Auswertungsmaske Calkarow (BS4)

Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen nach WENDLER (VERSION 3.22)			
Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:			
Probenbezeichnung:	BS5		
Datum der Messung:	03.12.18		
Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadrius		
Gestein:	Nürnberger Burgsandstein		
Besonderheiten:	"schnellste" Kurve		
Meßdaten und Auswertung:			
Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]:	2,60		
Saugfläche (cm ²):	5,31		
Abschätzung des B-Wertes			
Untere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	0,50		
Obere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	4,50		
Schrittweite:	0,40		
Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen
1	0,00	0,00	
2	0,05	0,5	
3	0,10	0,8	
4	0,14	1	
5	0,22	1,4	
6	0,27	1,6	
7	0,36	1,9	
8	0,56	2,5	
9	1,05	2,8	
10	1,14	3	
11	1,29	3,4	
12	1,35	3,6	
13	1,44	3,8	
14	1,54	4	
15			
Wassereindringverhalten mit dem Prüfröhrchen nach KARSTEN			
Korrelationskoeff.			
Auswertungsergebnisse			
max. Korrelationskoeffizient: 0,99932 Optimierter w-Wert: 26,88 [l/(m ² h ^{0,5})] Zugehöriger B-Wert: 2,50 [cm/h ^{0,5}] Wasseraufnahmekapazität: 107,53 [%]			

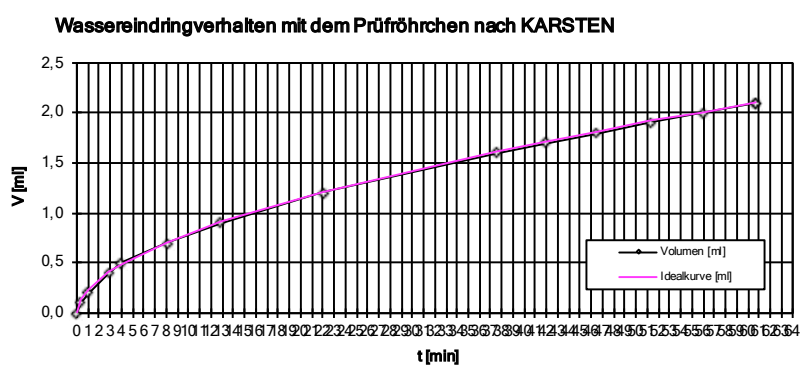
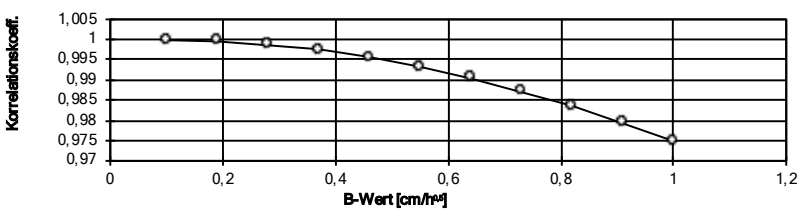
Tab. 49: Auswertungsmaske Calkarow (BS5)

Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen nach WENDLER (VERSION 3.22)																																																																	
Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:																																																																	
Probenbezeichnung:	LE1																																																																
Datum der Messung:	04.12.18																																																																
Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadrius																																																																
Gestein:	Leistädter Sandstein																																																																
Besonderheiten:																																																																	
Meßdaten und Auswertung:																																																																	
Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]:	2,60																																																																
Saugfläche (cm ²):	5,31																																																																
Abschätzung des B-Wertes																																																																	
Untere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	0,20																																																																
Obere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	2,00																																																																
Schrittweite:	0,18																																																																
	Wassereindringverhalten mit dem Prüfröhrchen nach KARSTEN																																																																
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Nr. der Ablesung</th> <th>Eindringzeit [min,sec]</th> <th>Volumen [ml]</th> <th>Notizen</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>0,02</td><td>0,10</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>0,44</td><td>0,30</td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>1,22</td><td>0,40</td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td>3,18</td><td>0,60</td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td>6,03</td><td>0,80</td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td>9,57</td><td>1,00</td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td>14,20</td><td>1,20</td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td>21,58</td><td>1,50</td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td>28,04</td><td>1,70</td><td></td></tr> <tr><td>11</td><td>40,52</td><td>2,10</td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td>49,02</td><td>2,30</td><td></td></tr> <tr><td>13</td><td>60,02</td><td>2,60</td><td></td></tr> <tr><td>14</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>15</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen	1	0,00	0,00		2	0,02	0,10		3	0,44	0,30		4	1,22	0,40		5	3,18	0,60		6	6,03	0,80		7	9,57	1,00		8	14,20	1,20		9	21,58	1,50		10	28,04	1,70		11	40,52	2,10		12	49,02	2,30		13	60,02	2,60		14				15			
Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen																																																														
1	0,00	0,00																																																															
2	0,02	0,10																																																															
3	0,44	0,30																																																															
4	1,22	0,40																																																															
5	3,18	0,60																																																															
6	6,03	0,80																																																															
7	9,57	1,00																																																															
8	14,20	1,20																																																															
9	21,58	1,50																																																															
10	28,04	1,70																																																															
11	40,52	2,10																																																															
12	49,02	2,30																																																															
13	60,02	2,60																																																															
14																																																																	
15																																																																	
Auswertungsergebnisse																																																																	
	<table style="width: 100%;"> <tr> <td>max. Korrelationskoeffizient:</td> <td style="color: red;">0,99899</td> </tr> <tr> <td>Optimierter w-Wert:</td> <td style="color: red;">3,86 [l/(m²h^{0,5})]</td> </tr> <tr> <td>Zugehöriger B-Wert:</td> <td style="color: red;">0,20 [cm/h^{0,5}]</td> </tr> <tr> <td>Wasseraufnahmekapazität:</td> <td style="color: red;">193,12 [%]</td> </tr> </table>	max. Korrelationskoeffizient:	0,99899	Optimierter w-Wert:	3,86 [l/(m ² h ^{0,5})]	Zugehöriger B-Wert:	0,20 [cm/h ^{0,5}]	Wasseraufnahmekapazität:	193,12 [%]																																																								
max. Korrelationskoeffizient:	0,99899																																																																
Optimierter w-Wert:	3,86 [l/(m ² h ^{0,5})]																																																																
Zugehöriger B-Wert:	0,20 [cm/h ^{0,5}]																																																																
Wasseraufnahmekapazität:	193,12 [%]																																																																

Tab. 50: Auswertungsmaske Calkarow (LE1)

Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen nach WENDLER (VERSION 3.22)			
Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:			
Probenbezeichnung:	LE2		
Datum der Messung:	14.12.18		
Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadruzis		
Gestein:	Leistädter Sandstein		
Besonderheiten:			
Meßdaten und Auswertung:			
Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]:	2,60		
Saugfläche (cm²):	5,31		
Abschätzung des B-Wertes			
Untere Grenze [cm/h^{0,5}]:	0,05		
Obere Grenze [cm/h^{0,5}]:	1,20		
Schrittweite:	0,12		
Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen
1	0,00	0,00	
2	0,14	0,1	
3	0,33	0,2	
4	1,38	0,4	
5	4,23	0,7	
6	5,35	0,8	
7	7,09	0,9	
8	8,30	1	
9	15,54	1,4	
10	24,26	1,8	
11	34,32	2,2	
12	43,21	2,50	
13	52,53	2,80	
14	59,43	3,00	
15			
Wassereindringverhalten mit dem Prüfröhrchen nach KARSTEN			
Korrelationskoeffizient			
Auswertungsergebnisse			
max. Korrelationskoeffizient:		0,99984	
Optimierter w-Wert:		4,75 [l/(m²h^{0,5})]	
Zugehöriger B-Wert:		0,17 [cm/h^{0,5}]	
Wasseraufnahmekapazität:		287,61 [%]	

Tab. 51: Auswertungsmaske Calkarow (LE2)

Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen nach WENDLER (VERSION 3.22)																																																																			
Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:																																																																			
Probenbezeichnung:	LE3																																																																		
Datum der Messung:	12.12.18																																																																		
Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadruzis																																																																		
Gestein:	Leistädter Sandstein																																																																		
Besonderheiten:																																																																			
Meßdaten und Auswertung:																																																																			
Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]:		2,60																																																																	
Saugfläche (cm²):		5,31																																																																	
Abschätzung des B-Wertes																																																																			
Untere Grenze [cm/h ^{0,5}]:		0,10																																																																	
Obere Grenze [cm/h ^{0,5}]:		1,00																																																																	
Schrittweite:		0,09																																																																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: small;"> <thead> <tr> <th>Nr. der Ablesung</th> <th>Eindringzeit [min,sec]</th> <th>Volumen [ml]</th> <th>Notizen</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>0,17</td><td>0,10</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>1,00</td><td>0,20</td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>2,48</td><td>0,40</td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td>3,58</td><td>0,50</td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td>8,02</td><td>0,70</td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td>12,53</td><td>0,90</td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td>22,00</td><td>1,20</td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td>37,35</td><td>1,60</td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td>41,55</td><td>1,70</td><td></td></tr> <tr><td>11</td><td>46,26</td><td>1,80</td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td>51,21</td><td>1,90</td><td></td></tr> <tr><td>13</td><td>56,00</td><td>2,00</td><td></td></tr> <tr><td>14</td><td>60,42</td><td>2,10</td><td></td></tr> <tr><td>15</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen	1	0,00	0,00		2	0,17	0,10		3	1,00	0,20		4	2,48	0,40		5	3,58	0,50		6	8,02	0,70		7	12,53	0,90		8	22,00	1,20		9	37,35	1,60		10	41,55	1,70		11	46,26	1,80		12	51,21	1,90		13	56,00	2,00		14	60,42	2,10		15						
Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen																																																																
1	0,00	0,00																																																																	
2	0,17	0,10																																																																	
3	1,00	0,20																																																																	
4	2,48	0,40																																																																	
5	3,58	0,50																																																																	
6	8,02	0,70																																																																	
7	12,53	0,90																																																																	
8	22,00	1,20																																																																	
9	37,35	1,60																																																																	
10	41,55	1,70																																																																	
11	46,26	1,80																																																																	
12	51,21	1,90																																																																	
13	56,00	2,00																																																																	
14	60,42	2,10																																																																	
15																																																																			
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;">  <p style="font-size: x-small;">Wassereindringverhalten mit dem Prüfröhrchen nach KARSTEN</p> </div> <div style="width: 45%;">  <p style="font-size: x-small;">Korrelationskoeff. vs B-Wert [cm/h^{0,5}]</p> </div> </div>																																																																			
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">max. Korrelationskoeffizient:</td> <td style="text-align: right; color: red;">0,99986</td> </tr> <tr> <td>Optimierter w-Wert:</td> <td style="text-align: right; color: red;">3,50 [l/(m²·h^{0,5})]</td> </tr> <tr> <td>Zugehöriger B-Wert:</td> <td style="text-align: right; color: red;">0,10 [cm/h^{0,5}]</td> </tr> <tr> <td>Wasseraufnahmekapazität:</td> <td style="text-align: right; color: red;">350,46 [%]</td> </tr> </table>				max. Korrelationskoeffizient:	0,99986	Optimierter w-Wert:	3,50 [l/(m²·h^{0,5})]	Zugehöriger B-Wert:	0,10 [cm/h^{0,5}]	Wasseraufnahmekapazität:	350,46 [%]																																																								
max. Korrelationskoeffizient:	0,99986																																																																		
Optimierter w-Wert:	3,50 [l/(m²·h^{0,5})]																																																																		
Zugehöriger B-Wert:	0,10 [cm/h^{0,5}]																																																																		
Wasseraufnahmekapazität:	350,46 [%]																																																																		
Auswertungsergebnisse																																																																			

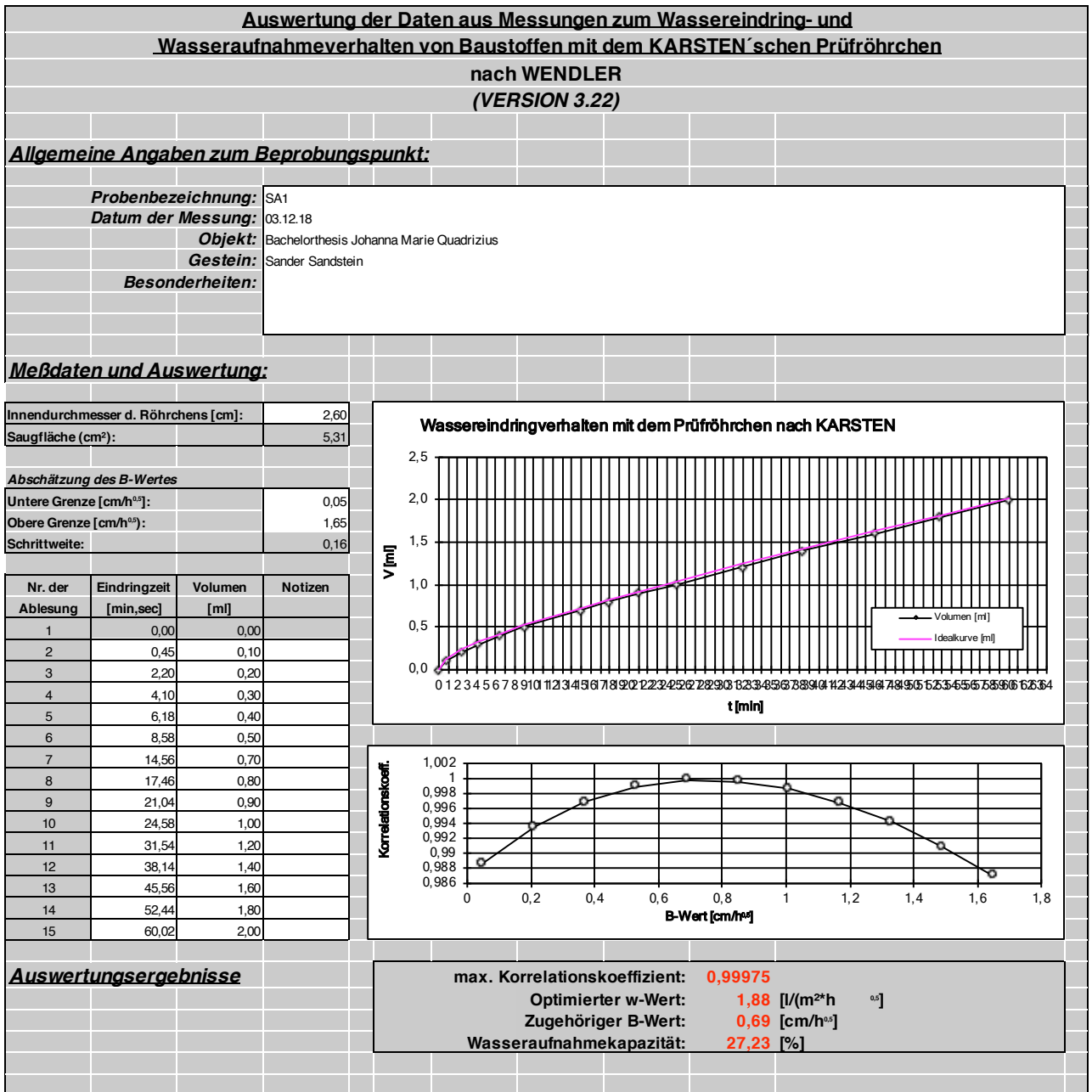
Tab. 52: Auswertungsmaske Calkarow (LE3)

Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen nach WENDLER (VERSION 3.22)																																																																	
Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:																																																																	
Probenbezeichnung:	LE4																																																																
Datum der Messung:	20.12.18																																																																
Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadrizius																																																																
Gestein:	Leistädter Sandstein																																																																
Besonderheiten:																																																																	
Meßdaten und Auswertung:																																																																	
Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]:	2,60																																																																
Saugfläche (cm²):	5,31																																																																
Abschätzung des B-Wertes																																																																	
Untere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	0,01																																																																
Obere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	1,00																																																																
Schrittweite:	0,10																																																																
	Wassereindringverhalten mit dem Prüfröhrchen nach KARSTEN																																																																
	<p>The graph plots water volume V [ml] on the y-axis (0.0 to 1.6) against time t [min] on the x-axis (0 to 55). Data points for 'Volumen [ml]' are shown as black diamonds, and a pink line represents the 'Idealkurve [ml]'. The data points follow a curve that starts at (0,0) and increases, reaching approximately 1.5 ml at 55 minutes.</p>																																																																
	<p>The graph plots the correlation coefficient 'Korrelationskoeff.' on the y-axis (0.96 to 1.01) against the B-value 'B-Wert [cm/h^{0,5}]' on the x-axis (0 to 1.2). The data points, shown as black circles, show a decreasing trend from approximately 1.00 at B=0 to about 0.965 at B=1.0.</p>																																																																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Nr. der Ablesung</th> <th>Eindringzeit [min,sec]</th> <th>Volumen [ml]</th> <th>Notizen</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>0,12</td><td>0,10</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>0,55</td><td>0,20</td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>2,09</td><td>0,30</td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td>3,39</td><td>0,40</td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td>5,57</td><td>0,50</td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td>8,58</td><td>0,60</td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td>15,27</td><td>0,80</td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td>34,13</td><td>1,20</td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td>52,09</td><td>1,50</td><td></td></tr> <tr><td>11</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>13</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>14</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>15</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen	1	0,00	0,00		2	0,12	0,10		3	0,55	0,20		4	2,09	0,30		5	3,39	0,40		6	5,57	0,50		7	8,58	0,60		8	15,27	0,80		9	34,13	1,20		10	52,09	1,50		11				12				13				14				15				
Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen																																																														
1	0,00	0,00																																																															
2	0,12	0,10																																																															
3	0,55	0,20																																																															
4	2,09	0,30																																																															
5	3,39	0,40																																																															
6	5,57	0,50																																																															
7	8,58	0,60																																																															
8	15,27	0,80																																																															
9	34,13	1,20																																																															
10	52,09	1,50																																																															
11																																																																	
12																																																																	
13																																																																	
14																																																																	
15																																																																	
Auswertungsergebnisse																																																																	
	max. Korrelationskoeffizient: 0,99992 Optimierter w-Wert: 2,97 [l/(m ² h ^{0,5})] Zugehöriger B-Wert: 0,01 [cm/h ^{0,5}] Wasseraufnahmekapazität: 2974,80 [%]																																																																

Tab. 53: Auswertungsmaske Calkarow (LE4)

Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen nach WENDLER (VERSION 3.22)			
Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:			
Probenbezeichnung:	LE4		
Datum der Messung:	14.12.18		
Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadruzis		
Gestein:	Leistädter Sandstein		
Besonderheiten:			
Meßdaten und Auswertung:			
Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]:	2,60		
Saugfläche (cm²):	5,31		
Abschätzung des B-Wertes			
Untere Grenze [cm/h^{0,5}]:	0,15		
Obere Grenze [cm/h^{0,5}]:	0,90		
Schrittweite:	0,08		
Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen
1	0,00	0,00	
2	0,12	0,10	
3	0,55	0,20	
4	2,09	0,30	
5	3,39	0,40	
6	5,57	0,50	
7	15,27	0,80	
8	34,13	1,20	
9	52,09	1,50	
10			
11			
12			
13			
14			
15			
Wassereindringverhalten mit dem Prüfröhrchen nach KARSTEN			
Korrelationskoeff.			
Auswertungsergebnisse			
max. Korrelationskoeffizient:		0,99917	
Optimierter w-Wert:		2,61 [l/(m²*h^{0,5})]	
Zugehöriger B-Wert:		0,15 [cm/h^{0,5}]	
Wasseraufnahmekapazität:		173,83 [%]	

Tab. 54: Auswertungsmaske Calkarow (LE5)



Tab. 55: Auswertungsmaske Calkarow (SA1)

Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen nach WENDLER (VERSION 3.22)			
Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:			
Probenbezeichnung:	SA2		
Datum der Messung:	05.12.18		
Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadrius		
Gestein:	Sander Sandstein		
Besonderheiten:			
Meßdaten und Auswertung:			
Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]:	2,60		
Saugfläche (cm²):	5,31		
Abschätzung des B-Wertes			
Untere Grenze [cm/h^{0,5}]:	0,10		
Obere Grenze [cm/h^{0,5}]:	1,00		
Schrittweite:	0,09		
Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen
1	0,00	0,00	
2	1,21	0,20	
3	3,04	0,30	
4	8,06	0,50	
5	17,36	0,80	
6	23,36	1,00	
7	31,23	1,20	
8	43,05	1,50	
9	59,10	1,90	
10			
11			
12			
13			
14			
15			
Wassereindringverhalten mit dem Prüfröhrchen nach KARSTEN			
<p>The graph plots water absorption volume V [ml] on the y-axis (0.0 to 2.0) against time t [min] on the x-axis (0 to 65). Data points are shown as black circles connected by a line, and a pink line represents the ideal curve fit. The data points are approximately: (0,0), (1.21, 0.20), (3.04, 0.30), (8.06, 0.50), (17.36, 0.80), (23.36, 1.00), (31.23, 1.20), (43.05, 1.50), (59.10, 1.90).</p>			
Korrelationskoeffizient			
<p>The graph plots the correlation coefficient on the y-axis (0.995 to 1.001) against the B-Wert [cm/h^{0.5}] on the x-axis (0 to 1.2). The data points are shown as black circles connected by a line, forming a parabolic shape that peaks at a B-Wert of approximately 0.55.</p>			
Auswertungsergebnisse			
max. Korrelationskoeffizient:		0,99982	
Optimierter w-Wert:		2,02 [l/(m ² ·h ^{0,5})]	
Zugehöriger B-Wert:		0,55 [cm/h ^{0,5}]	
Wasseraufnahmekapazität:		36,76 [%]	

Tab. 56: Auswertungsmaske Calkarow (SA2)

Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen nach WENDLER (VERSION 3.22)

Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:

Probenbezeichnung:	SA3
Datum der Messung:	14.12.18
Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadrizius
Gestein:	Sander Sandstein
Besonderheiten:	

Meßdaten und Auswertung:

Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]:	2,60
Saugfläche (cm ²):	5,31
Abschätzung des B-Wertes	
Untere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	0,10
Obere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	2,00
Schrittweite:	0,19

Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen
1	0,00	0,00	
2	2,57	0,20	
3	7,22	0,40	
4	13,20	0,60	
5	18,40	0,80	
6	25,24	1,00	
7	33,23	1,20	
8	40,16	1,40	
9	47,18	1,60	
10	55,31	1,80	
11	60,00	2,00	
12			
13			
14			
15			

Wassereindringverhalten mit dem Prüfröhrchen nach KARSTEN

The graph plots water uptake V [ml] on the y-axis (0.0 to 2.5) against time t [min] on the x-axis (0 to 60). Data points are shown as black diamonds connected by a line, and a magenta line represents the ideal curve. The data points are approximately: (0,0), (2.57, 0.2), (7.22, 0.4), (13.2, 0.6), (18.4, 0.8), (25.24, 1.0), (33.23, 1.2), (40.16, 1.4), (47.18, 1.6), (55.31, 1.8), (60, 2.0).

Korrelationskoeffizient

The graph plots the correlation coefficient on the y-axis (0.986 to 1.002) against the B-value [cm/h^{0.5}] on the x-axis (0 to 2.5). The curve shows a peak correlation coefficient of approximately 0.99949 at a B-value of 0.86 cm/h^{0.5}.

Auswertungsergebnisse	max. Korrelationskoeffizient: 0,99949
	Optimierter w-Wert: 1,59 [l/(m²h^{0,5})]
	Zugehöriger B-Wert: 0,86 [cm/h^{0,5}]
	Wasseraufnahmekapazität: 18,47 [%]

Tab. 57: Auswertungsmaske Calkarow (SA3)

Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen
nach WENDLER
(VERSION 3.22)

Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:

Probenbezeichnung:	SA4
Datum der Messung:	10.01.19
Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadruzio
Gestein:	Sander Sandstein
Besonderheiten:	

Meßdaten und Auswertung:

Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]:	2,60
Saugfläche (cm ²):	5,31
Abschätzung des B-Wertes	
Untere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	0,15
Obere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	0,94
Schrittweite:	0,08

Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen
1	0,00	0,00	
2	2,44	0,20	
3	6,14	0,30	
4	18,18	0,60	
5	22,47	0,70	
6	38,14	1,00	
7	68,21	1,50	
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			

Wassereindringverhalten mit dem Prüfröhrchen nach KARSTEN

Korrelationskoeffizient

Auswertungsergebnisse	max. Korrelationskoeffizient: 0,99988
	Optimierter w-Wert: 1,56 [l/(m ² h ^{0,5})]
	Zugehöriger B-Wert: 0,47 [cm/h ^{0,5}]
	Wasseraufnahmekapazität: 33,39 [%]

Tab. 58: Auswertungsmaske Calkarow (SA4)

Auswertung der Daten aus Messungen zum Wassereindring- und Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen mit dem KARSTEN'schen Prüfröhrchen nach WENDLER (VERSION 3.22)			
Allgemeine Angaben zum Beprobungspunkt:			
Probenbezeichnung:	SA5		
Datum der Messung:	20.12.18		
Objekt:	Bachelorthesis Johanna Marie Quadrizius		
Gestein:	Sander Sandstein		
Besonderheiten:			
Meßdaten und Auswertung:			
Innendurchmesser d. Röhrchens [cm]:	2,60		
Saugfläche (cm²):	5,31		
Abschätzung des B-Wertes			
Untere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	0,10		
Obere Grenze [cm/h ^{0,5}]:	1,27		
Schrittweite:	0,12		
Nr. der Ablesung	Eindringzeit [min,sec]	Volumen [ml]	Notizen
1	0,00	0,00	
2	0,58	0,10	
3	2,33	0,20	
4	5,28	0,30	
5	7,54	0,40	
6	14,59	0,60	
7	31,26	1,00	
8	50,37	1,40	
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
Wassereindringverhalten mit dem Prüfröhrchen nach KARSTEN			
Korrelationskoeff.			
Auswertungsergebnisse			
max. Korrelationskoeffizient:	0,9997		
Optimierter w-Wert:	1,52 [l/(m²h^{0,5})]		
Zugehöriger B-Wert:	0,69 [cm/h^{0,5}]		
Wasseraufnahmekapazität:	22,17 [%]		

Tab. 59: Auswertungsmaske Calkarow (SA5)

Bucher Sandstein (GRIMM 2018)

Probenbezeichnung: BU

Abbauort:

Buch bei Ebern, Haßberge (Bayern).

Kurzbeschreibung:

graugelber, mittelsandiger, poröser Sandstein mit Schrägschichtungsstruktur. Wechsel von etwas feineren zu etwas größeren Lagen innerhalb der Mittelsandfraktion führt zur Schichtung.

Bindemittel:

überwiegend kieselige Kornbindung über punktuellen, selten länglichen Kontakt; kaum Quarzanwachssäume erkennbar. Teils kaolinitisches Bindemittel in Kornzwickeln und als dünne Häutchen um die Körner; Kaolinit limonitisch gefärbt.

Porenraum:

häufigste Porengröße 0,3 mm, Intergranularporen. Teils Porenwandauskleidung aus Kaolinit, teils Poren limonitverfüllt.

Porenradienverteilung:

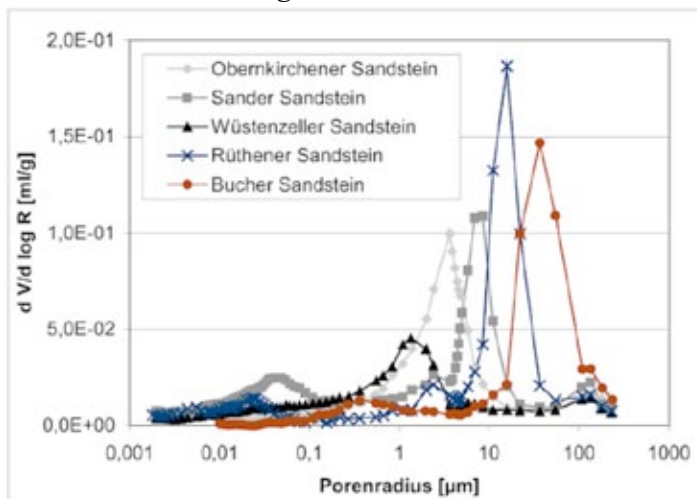


Abb. 271: Porenradienverteilung Bucher Sandstein (rote Kurve)

Struktur:

mittelsandig; gut bis mäßig sortiert; grobporig homogen.

Korngröße 0,1 – 0,4 mm; gut bis mäßig sortiert; Rundung/Sphärizität I-II (HI)/2-3; Kornkontakte punktuell, teils länglich.

Textur:

Schrägschichtung durch lagigen Korngrößenwechsel innerhalb der Mittelsandfraktion.

Nürnberger Burgsandstein (GRIMM 2018)

Probenbezeichnung: BS

Abbauort:

Cadolzburg westlich von Fürth (Bayern).

Kurzbeschreibung:

blass- bis grauroter, mittel- bis grobsandiger Sandstein mit gut erkennbaren Quarzkörnern. Farbe durch Eisenverbindungen. Homogene Grobporigkeit des Gesteins.

Bindemittel:

einerseits kieselige Kornkontakte durch die direkte Bindung über die Komponenten; andererseits tonig-ferritisches Zwischenmittel als dünne Häutchen um die Komponenten herum.

Porenraum:

häufigste Porengröße 0,5 μm , Interpartikelporen. Porenwandauskleidung durch eisenoxidhaltige Tonminerale.

Porenradienverteilung:

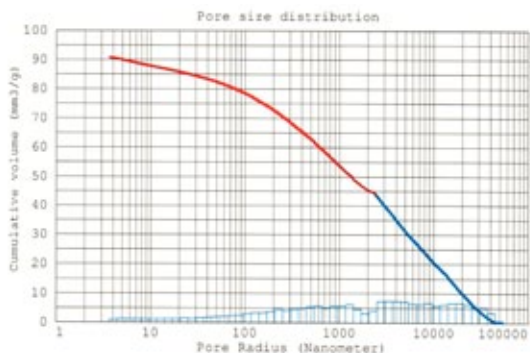


Abb. 272: Porenradienverteilung feine Varietät

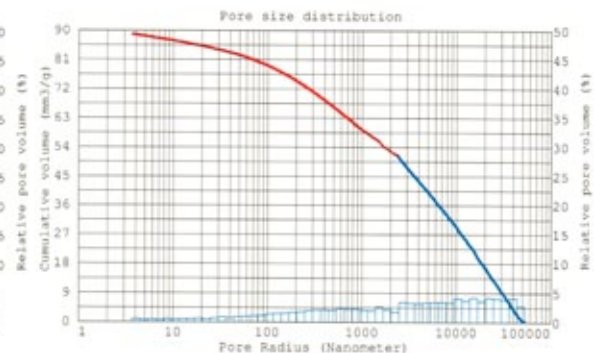


Abb. 273: Porenradienverteilung grobe Varietät

Struktur:

mittel- bis grobsandig; mäßig sortiert; grobporig homogen.

Korngröße 0,2 – 2,0 mm; Rundung/Sphärizität II/2; Kornkontakte über länglichen, punktuellen und suturierten Kontakt.

Textur:

Schräg- (Parallel-) Schichtung.

Im Dünnschliff nicht erkennbar.

Leistädter Sandstein (LEGRUM 1991; BAMBERGER NATURSTEINWERK 2017)

Probenbezeichnung: LE

Abbauort:

Leistadt bei Bad Dürkheim/Rheinland-Pfalz

Kurzbeschreibung:

Beigefarbener bis gelblichgrauer, fein- bis mittelsandiger Buntsandstein. Teils mit braunen Einschlüssen.

Bindemittel:

Tonig, häufig limonitische Tonhäutchen um die Komponenten.

Porenraum:

Mittlerer Porendurchmesser um 0,3 mm (von 0,2 – 0,5 mm), Interpartikelpore; z.T. tonig-ferritische Porenwandauskleidungen und Zwickelfüllungen.

Porenradienverteilung:

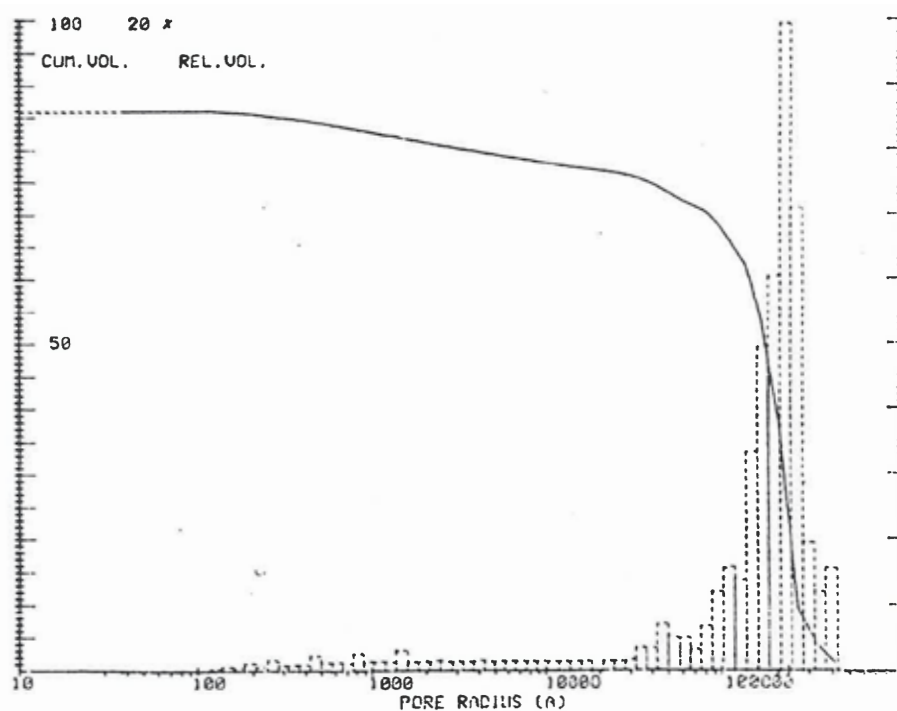


Abb. 274: Porenradienverteilung leistädter Sandstein

Struktur:

fein- bis mittelsandig; mäßig bis gut sortiert.

Korngrößen von 0,2 bis 0,6 mm, häufigsten Korngröße um 0,4 mm; vorwiegend Längskontakte, z.T. Suturekontakte.

Textur:

Parallel- und Schrägschichtung

Im Dünnschliff nicht erkennbar.

Sander Sandstein (GRIMM 2018)

Probenbezeichnung: SA

Abbauort:

Sand am Main, Haßberge, 8 km südöstlich von Haßfurt (Bayern).

Kurzbeschreibung:

braun- bis olivgrüner, homogener, fein- bis mittelsandiger Schilfsandstein mit fein verteilten, schwarzen Pünktchen und Hellglimmer.

Bindemittel:

Komponenten meist über tonig-chloritische Kornhüllen in Kontakt (indirekte Kornbindung zw. den Körnern). Teilweise kieselige Bindung (direkter Korn-zu-Korn-Kontakt); Quarzanwachssäume nicht erkennbar.

Porenraum:

häufigste Porengröße 0,15 mm, Interpartikelporen. Poren partiell mit authigenem Chlorit ausgekleidet. Teils vollständige Verfüllung der Poren mit Chlorit.

Porenradienverteilung:

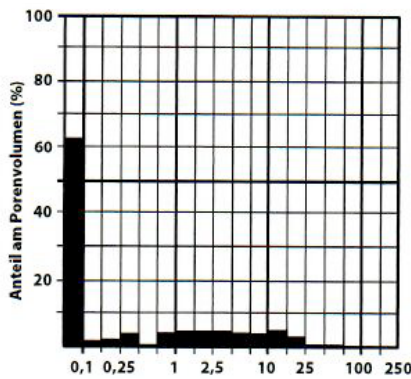


Abb. 275: Porenhals-Durchmesser-Verteilung Sander Sandstein

Struktur:

fein- bis mittelsandig; mäßig sortiert; feinporig homogen.

Korngröße 0,1 – 0,4 mm; mäßig sortiert, Rundung/Sphärizität III/3; meist längliche und punktuelle, selten suturierte Kornkontakte.

Textur:

Parallel-, Schrägschichtung, keine Schichtung.

Im Dünnschliff nicht erkennbar.

Postaer Sandstein (GRIMM 2018)

Probenbezeichnung: PO

Abbauort:

Wehlen bei Pirna, Mühlleite bei Lohmen, früher auch Posta und andere Orte/Elbtal (Sachsen)

Kurzbeschreibung:

weißgrauer oder gelblicher, mittel- bis stellenweise grobsandiger, mittelporiger Sandstein; teilweise braun geflammt.

Fast nur aus Quarz bestehend mit wenigen schwarzen Erzkörnchen: dickbankig bis massig.

Bindemittel:

kieslig; schwach ferritisch (Limonit); wenig Kaolinit ohne Bindemittelfunktion in Porenräumen.

Porenraum:

Porengröße durchschnittlich 0,2 mm bis 1 mm. Intergranularporen von unregelmäßiger Gestalt.

Porenradienverteilung:

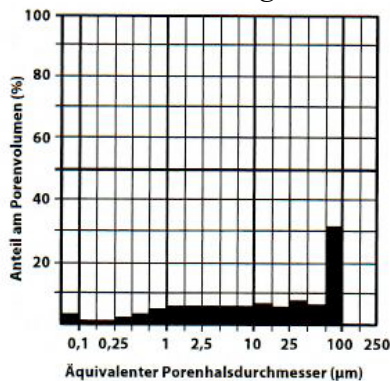


Abb. 276: Porenhals-Durchmesser-Verteilung Postaer Sandstein

Struktur:

Korngrößen im Mittel 0,35 mm; mäßig sortiert; Rundung/Sphärizität II-IV/ 2-4; Punkt-, Längs-, Konkav- Konvex- suturierte Kornkontakte.

Textur:

Schichtung durch Sortierung nach Korngröße erkennbar.

Unter dem Mikroskop keine Schichtung erkennbar.

Kurzzusammenfassung EN ISO 15148

Vollständiger Titel

DIN EN ISO 15148:2016-12, Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen, (ISO 15148:2002 + Amd 1:2016).
(früher: DIN 52617)

Prüfkörper

- Regelmäßige Form mit konstantem Querschnitt
- Saugfläche mind. 50 cm² groß
- Repräsentative Dicke, im Bestfall Dicke des tatsächlichen Produkts; bei Zuschlägen oder anderen Inhomogenitäten Dicke mind. 5-mal, besser 10-mal größer als das größte Teilchen sein.
- Mind. 3 Probekörper, bei Saugfläche unter 100 cm² mindestens 6 Probekörper
- Bei 18 – 28 °C, 0,4 – 0,6 rH bis zur Massekonstante konditioniert
- Seiten wasser- und dampfundurchlässig abgedichtet

Prüfanordnung

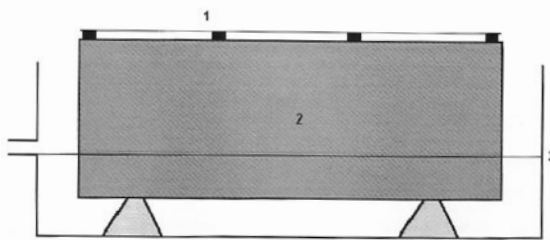


Abb. 277: Beispiel der Prüfanordnung DIN EN ISO 15148. 1: Gitter mit Auflast gegen Probenauftrieb (falls erforderlich), 2: Probekörper, 3: Wasserspiegel

Prüfablauf

Anfangsmasse m_i nach der Konditionierung bestimmen.

Wasserbehälter mit Leitungswasser bei Prüftemperatur (18 – 28 °C) füllen.

Probekörper in Wasserbehälter auf Punktauflagen stellen, dass er den Behälter nicht berührt.

Der Wasserpegel muss konstant auf 5 ± 2 mm über der Unterkante des Probekörpers liegen.

Mit dem Eintauchen beginnt die Zeitspanne der Prüfdauer.

Nach etwa 5 min ist die erste Massewägung durchzuführen. Der Probekörper wird aus dem Wasser genommen, an einem feuchten ausgewrungenen Schwamm abgetupft, gewogen und so schnell wie möglich, aber unter 1 min, zurück ins Wasser gestellt. Diese Wägungen, welche zu den Werten m_t führen, sind zu weiteren Zeiten t zu wiederholen (z.B. 20 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, .. bis 24 h).

Abbruch der Prüfung sobald Wasser auf der Oberfläche des Prüfkörpers erscheint oder bei Massezunahme unter 1 g/m^2 nach 8 h.

Auswertung

Differenz der Masse jeder Wägung und der Ausgangsmasse bezogen auf die Saugfläche A

$$\Delta m_t = \frac{(m_t - m_i)}{A}$$

Δm_t über der Wurzel aus der Wägezeit t in Kurven aufzutragen

anschließend Auswertung nach Typ A oder Typ B

Berechnung bei Kurventyp A

Der Wasseraufnahmekoeffizient, A_w bzw. W_w wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$A_w = \frac{\Delta m'_{t_f} - \Delta m'_0}{\sqrt{t_f}}$$

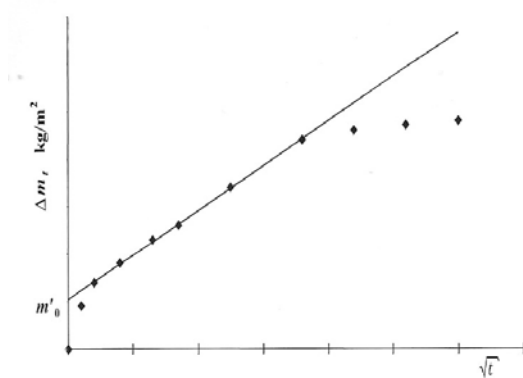


Abb. 278: Kurve Typ A - Wasser an der Oberfläche

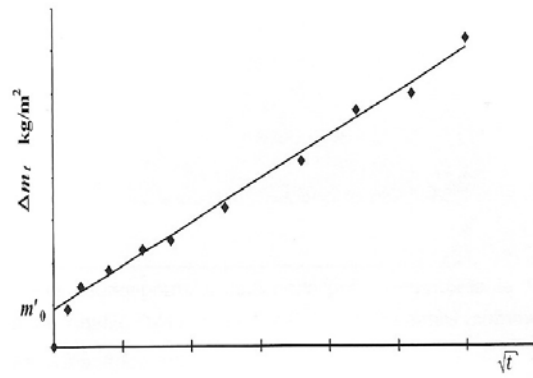


Abb. 279: Kurve Typ A - kein Wasser an der Oberfläche

Dabei ist

$\Delta m'_{t_f}$ der Wert von Δm auf der Geraden zur Zeit t_f [kg/m^2]
 t_f die Prüfdauer (im Allgemeinen 24h) [s]

ODER

Dabei ist

$$W_w = \frac{\Delta m'_{t_f} - \Delta m'_0}{\sqrt{t_f}}$$

t_f die Prüfdauer (im Allgemeinen 24h) [h]

Berechnung bei Kurventyp B

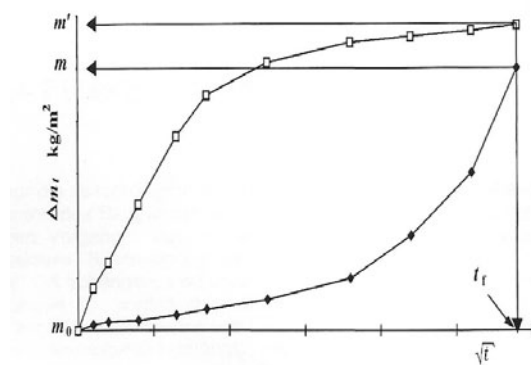


Abb. 280: Kurve Typ B

„Kurve von Δm_t keine gerade Linie, sondern beliebiger Verlauf“

Wert für Δm_t zum Zeitpunkt 24h nach Prüfbeginn als Δm_{t_f} angenommen und A_w bzw. W_w müssen nach folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$A_{w,24} = \frac{\Delta m_{t_f}}{\sqrt{86400}}$$

$$W_{w,24} = \frac{\Delta m_{t_f}}{\sqrt{24}}$$

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, alle Ausführungen, die anderen Schriften wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, kenntlich gemacht sind und die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung war.

Berlin, 21.01.2019 Johanna Marie Quadrizius