



Sergiu - Mihai Dan, BSc

**Bestimmung der Wasseraufnahme von feinkörnigen Böden:  
Gegenüberstellung der Versuchsgeräte  
nach Enslin und Enslin-Neff und  
von pulvrigen Proben und Presspillen**

**MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Umwelt und Verkehr

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Marte Roman

Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik

Betreuer:

Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

---

Datum

---

Unterschrift

# Vorwort

Der Wasseraufnahmeversuch nach Enslin gibt Hinweise auf die (ton)mineralogische Zusammensetzung von feinkörnigen Proben und findet daher in zahlreichen Bereichen Anwendung:

- Wasseraufnahme nach DIN 18132 (1995)
- Straßenbau gemäß RVS 11.06.26 :1987
- Qualitätskontrolle von Bentoniten
- Untersuchung mineralischer Dichtungsmaterialien im Deponiebau
- Bestimmung der Plastizität von Tonen in der Grobkeramik
- Kluffüllungen im Tunnelbau

Aus der Praxis ist allerdings bekannt, dass die Versuchsdurchführung mit Unsicherheiten hinsichtlich Aussagekraft, Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit verschiedener Geräte und Labore behaftet ist. Insbesondere unterschiedliche Geräte und Normen, sowie unklar definierte und voneinander abweichende Prüfverfahren sind dafür verantwortlich.

Ziel dieser Arbeit ist es, durch Untersuchung von 3 unterschiedlichen Proben, 2 Prüfverfahren und 2 Probenvorbereitungen gegenüberzustellen, um festzulegen welche am besten geeignet ist und ihre Verwendung daher empfohlen werden kann.

Graz, im März 2019

Sergiu - Mihai Dan

# Kurzfassung

In dieser Arbeit werden die Versuche für Wasseraufnahmevermögen nach Enslin und Wasseraufnahmevermögen nach Enslin – Neff untersucht und einander gegenübergestellt. 1959 wurden aufgrund der Forschungsarbeiten von Neff (1955 bis 1958) Änderungen zu dem Enslin Versuch und dem Prüfgerät durchgeführt. Es wurde die Probenmenge auf 1,0 g vergrößert und die Ansaughöhe der Filterplatte von 0 auf 50 mm erhöht. Für den Vergleich der 2 Prüfgeräte wird in dieser Arbeit ein modifiziertes Prüfverfahren (Kugler, 2003) verwendet. Es werden drei unterschiedliche Proben mit jedem Prüfgerät untersucht und zwei Probenvorbereitungen, pulvrige Proben und Presspillen, einander gegenübergestellt.

Abschließend werden, anhand der Auswertung der Ergebnisse, die Vor- und Nachteile jedes Prüfverfahren, Prüfgerät und Probenvorbereitung aufgezeigt.

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Masterarbeit beigetragen haben.

Ganz besonders gilt dieser Dank an meine Betreuer Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte und Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz für die Geduld und Mühe, aber auch für das regelmäßige konstruktive Feedback sowie dem Einbringen des notwendigen Know-hows, welches mir bei der Erstellung dieser Arbeit sehr geholfen hat.

Auch möchte ich der Firma Dipl.-Ing. Kurt Ströhle Ziviltechniker GmbH danken, da die mir ihre Labor und Geräte zur Verfügung gestellt hat und somit die Durchführung der Versuche nach Enslin ermöglicht hat.

Ein großer Dank gilt meinem Arbeitgeber, Abes Wagner und Partner ZT GmbH, der mich während meiner Studienjahre unterstützt hat.

Mein besonderer Dank gilt meiner gesamten Familie, insbesondere meinen Eltern welche mich immer unterstützt haben und auch dieses Studium ermöglicht haben.

# **Abstract**

In this thesis the experiments for water absorption capacity according to Enslin and water absorption capacity according to Enslin – Neff are investigated and compared. In 1959, due to research by Neff (1955-1958), changes were made to the Enslin experiment and testing device. The sample volume was increased to 1.0 g and the suction height of the filter plate was increased from 0 to 50 mm. A modified test method (Kugler, 2003) is used in this thesis to compare the two experiments. Three different samples are being researched with each testing device and two different sample preparations are being compared.

Finally, based on the evaluation of the results, the advantages and disadvantages of each test method, test device and sample preparation are shown.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Wasseraufnahmevermögen</b>	<b>1</b>
1.1	Allgemeines	1
1.2	Wasseraufnahmevermögen nach Enslin (Enslin, 1933)	2
1.3	Wasseraufnahmevermögen nach Enslin-Neff (Neff, 1959)	3
<b>2</b>	<b>Materialien</b>	<b>4</b>
2.1	Allgemeines	4
2.2	Bentonit	5
2.2.1	Eigenschaften	6
2.2.2	Verwendung	6
2.3	Kaolinit	8
2.3.1	Eigenschaften	8
2.3.2	Verwendung	9
2.4	Talk	10
2.4.1	Eigenschaften	11
2.4.2	Verwendung	11
<b>3</b>	<b>Versuche</b>	<b>12</b>
3.1	Versuchsbeschreibung	12
3.2	Verdunstungskorrektur	13

3.3 Versuch nach Enslin	19
3.3.1 Versuche mit pulvrigen Proben	20
3.4 Versuch nach Enslin-Neff	29
3.4.1 Versuche mit pulvrigen Proben	30
3.4.2 Versuche mit Presspillen	39
<b>4 Zusammenstellung der Ergebnisse</b>	<b>47</b>
<b>5 Schlussfolgerung und Ausblick</b>	<b>53</b>
<b>6 Anhang</b>	<b>54</b>
6.1 Versuche mit Bentonit	55
6.2 Versuche mit Kaolinit	59
6.3 Versuche mit Talk	63

# Formelzeichen und Abkürzungen

## Große Buchstaben

$WV$	[ml]	Wasserverbrauch
$WV_{corr}$	[ml]	korrigierter Wasserverbrauch
$Zeit$	[min]	Versuchsdauer zum Zeitpunkt der Ablesung

## Kleine Buchstaben

$k$	[-]	Steigung der Regressionsgeraden
$m_d$	[g]	Trockenmasse
$m_{wg}$	[g]	angesaugten Wassermasse
$w_A$	[%]	Wasseraufnahmevermögen

# 1 Wasseraufnahmevermögen

## 1.1 Allgemeines

Unter Wasseraufnahme versteht man das Vermögen einer Probe, Wasser aufzunehmen.

Nach DIN 18132:1995 ist das Wasseraufnahmevermögen  $w_A$  das Verhältnis der angesaugten Wassermasse  $m_{wg}$  zur Trockenmasse  $m_d$  der Bodenprobe:

$$w_A = \frac{m_{wg}}{m_d} [\%]$$

$w_A$	[Mass-%]	Wasseraufnahmevermögen
$m_{wg}$	[Mass-g]	angesaugte Wassermasse
$m_d$	[Mass-g]	Trockenmasse

Das Wasseraufnahmevermögen ist nach DIN 18 132 die von einer getrockneten Probe aufgesaugte maximale Wassermasse, bezogen auf die Trockenmasse der Probe. Es ist die Eigenschaft, das Wasser kapillar anzusaugen und zu halten und hängt von der spezifischen Oberfläche des Feinkorns und der Aktivität der Tonminerale ab. Man unterscheidet demnach zwischen der Kapillarität und der Hydratation.

Die Kapillarität ist eine Folge der Molekularkräfte. Diese Kräfte ziehen die an der Oberfläche einer Flüssigkeit liegenden Moleküle nach innen. Die Wasseraufnahme beginnt spontan nach Herstellung eines Kontakts zwischen der freien Flüssigkeit und den Feststoffkörnern. Mit zunehmendem Sättigungsgrad verläuft der Bewegungsvorgang langsamer; je mehr die Poren mit Wasser gefüllt sind, desto geringer ist die Ansauggeschwindigkeit.

Die Hydratation kommt bei quellfähigen Tonmineralen zum Tragen. Hierbei wird die sich zwischen den Silicatschichten der Tonmineralkristalle befindliche innere Oberfläche durch den Quellvorgang zugänglich. Alle anderen Bodenminerale besitzen lediglich eine äußere Oberfläche.

In der Praxis bestimmt man das Wasseraufnahmevermögen bindiger Böden, um zu testen, ob sie quellfähige Tonminerale enthalten. Schon geringe Mengen von ein bis zwei Prozent machen sich bemerkbar.

## 1.2 Wasseraufnahmevermögen nach Enslin (Enslin, 1933)

Durch die Grundlagenforschung mit dem ENSLIN-Gerät von 1933 wurde das Schlämmkorn von 0 bis 0,06 mm, d. h. der Ton-Schluff-Bereich erfasst. Vielfach sind jedoch bei bindigen Böden Beimengungen von Siebkorn bis 2 mm vorhanden. Für die praktische Anwendung war es deshalb erforderlich, den Anwendungsbereich auf 0 bis 2 mm auszudehnen. Die Probemenge betrug damals 0,3 g der zu prüfenden Kornklasse. (Neff, 2005)

Der Versuch ist in der RVS 11.06.26:1987 als Wasseraufnahme der Kornklassen kleiner 0,125 mm bezeichnet und dient zur Bestimmung der Wasseraufnahme der Kornklassen

- < 0,063 mm für bodenmechanische Fragestellungen
- < 0,090 mm für asphalttechnologische Fragestellungen
- < 0,125 mm für ungebundene Tragschichten

Als Prüfgerät wird das Gerät nach Enslin (Abb. 1) verwendet. Die Probemenge beträgt 1 g der zu prüfenden Kornklasse und wird bei  $110 \pm 5$  °C bis zur Massenkonstanz getrocknet.

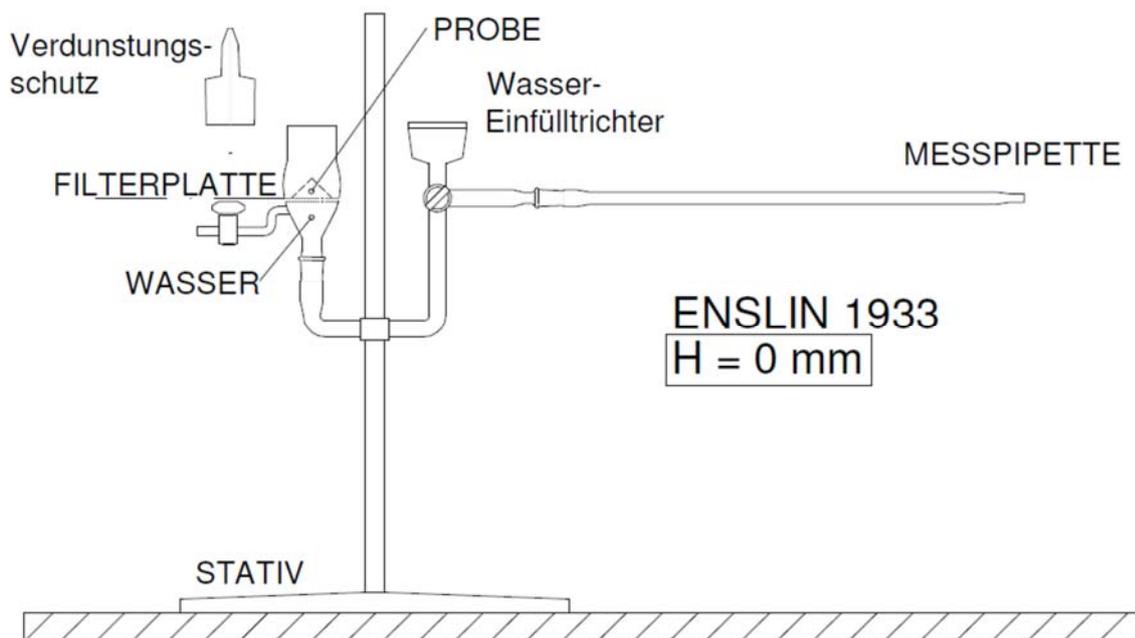


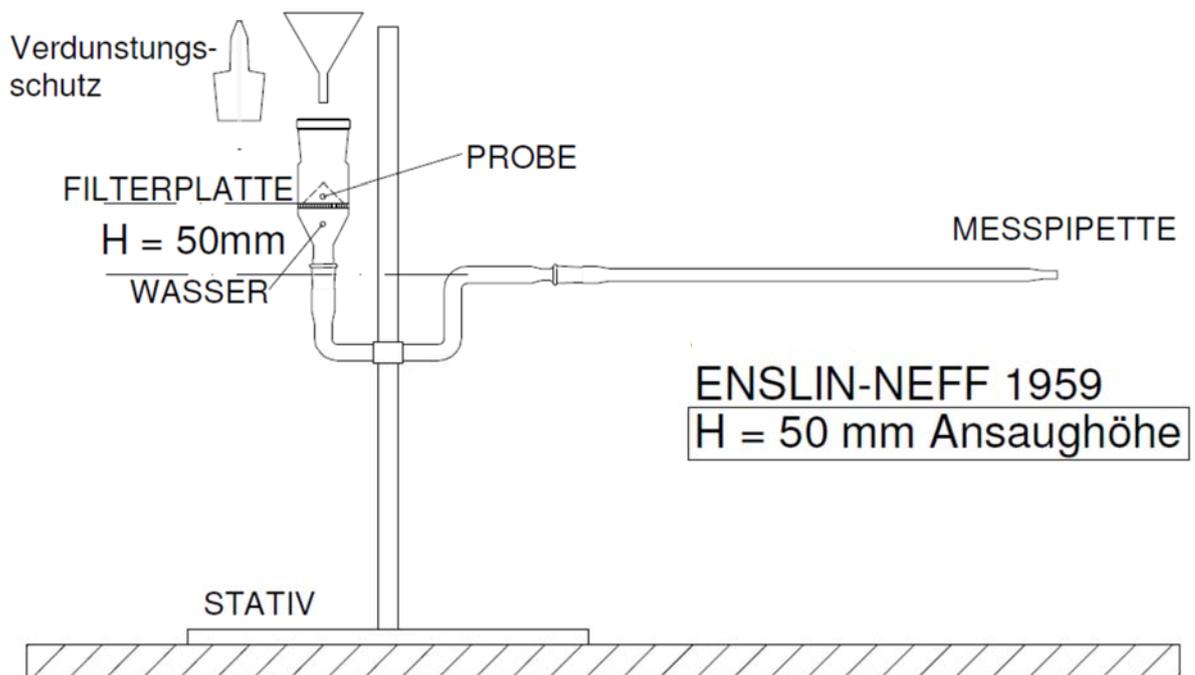
Abb. 1: Gerät nach Enslin 1933 (Neff, 2005)

### 1.3 Wasseraufnahmevermögen nach Enslin-Neff (Neff, 1959)

Um für Wasseraufnahmen  $w_A < 100\%$  eine ausreichende Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse zu erreichen, ist das Enslin-Neff Gerät aufgrund der Forschungsarbeiten von Neff (1955 bis 1958), entstanden. Dazu wurde die Probenmenge von 0,3 g auf 1,0 g vergrößert und die Ansaughöhe der Filterplatte von 0 auf 50 mm erhöht. Dies soll den kapillaren Anteil der Wasseraufnahme und damit den Einfluss der Höhe und der Form des Schüttkegels verringern.

Der Enslin – Neff Versuch ist in der DIN 18132:1995 unter Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens beschrieben.

Als Prüfgerät wird das Gerät nach Enslin - Neff (Abb. 2) verwendet. Die Probemenge beträgt 1 g bei  $w_A < 100\%$ , bzw. 0,2 g bei  $w_A > 100\%$ , der zu prüfenden Kornklasse und wird bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet. Bei 105 °C wird bei einzelnen Mineralien eine Veränderung des Wasseraufnahmevermögens bewirkt. Aufschluß über den Einfluß liefert eine Wiederholung des Versuchs mit einer bei 60 °C getrockneten Probe.



**Abb. 2:** Gerät nach Enslin – Neff 1959 (Neff, 2005)

## 2 Materialien

### 2.1 Allgemeines

Das Wasseraufnahmevermögen hängt von der spezifischen Oberfläche des Feinkorns und der Aktivität der Tonminerale ab. Die spezifische Oberfläche (= Oberfläche je Gewichtseinheit) ist ein Maß für die zu erwartende Wasserbindung und nimmt in Korngemengen mit abnehmendem mittlerem Korndurchmesser sehr stark zu. In der Bodenkunde und Sedimentologie spielt die Korngrößenverteilung eine wichtige Rolle, weil viele Eigenschaften der Böden (genauer der Bodenart) und der Sedimente von dieser Zusammensetzung abhängen.

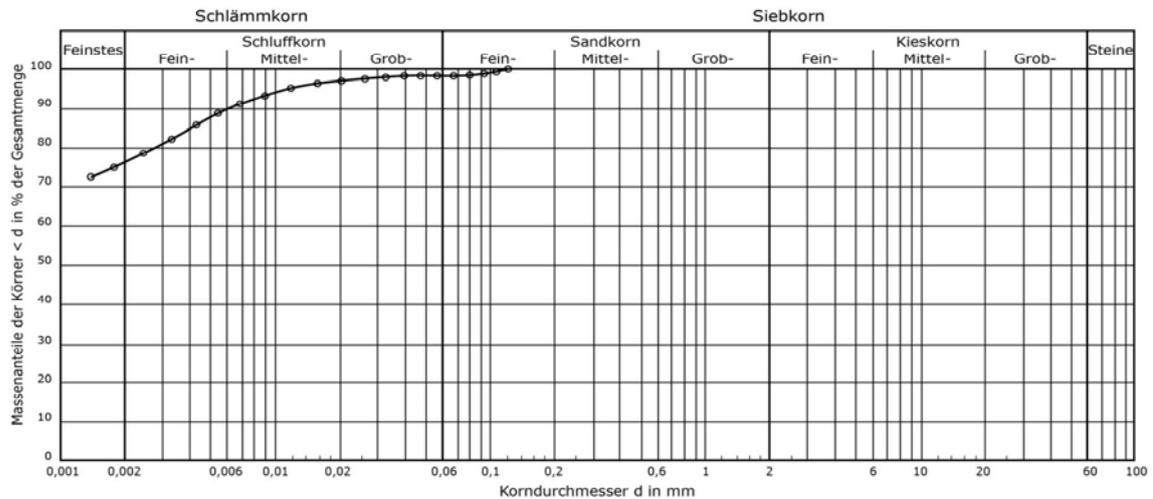
Die Korngrößenverteilung gibt die Massenanteile der in einer Bodenart vorhandenen Körnungsgruppen an. Korngrößen über 0,063 mm werden durch Siebung, Korngrößen unter 0,125 mm durch Sedimentation getrennt. Die durch Siebe ermittelten Korngrößen werden nach der Maschenweite der Siebgewebe benannt, durch die sie zuletzt gefallen sind. Diese Weite wird als Korngröße oder Korndurchmesser bezeichnet. (Leibniz, 2019)

Für die Gegenüberstellung der zwei Prüfverfahren, werden drei unterschiedliche Materialien verwendet, Bentonit, Kaolinit und Talk. Alle drei Materialien haben geringe Korngröße ( $< 63 \mu\text{m}$ ) und sind weiche Materialien mit einer Mohshärte von maximal 2,5.

Die Mohshärte oder auch als Ritzhärte bekannt, wurde von F. Mohs 1822 in die Mineralogie eingeführt und ist auch heute noch die übliche und zweckmäßige Härtebestimmungsmethode (Härte). Unterschieden wird nach zehn Härtegraden, nach der jeder Härtegrad durch ein häufig vorkommendes Mineral vertreten wird.

Die verwendeten Materialien werden im Folgenden im Detail beschrieben.

## 2.2 Bentonit



**Abb. 3:** Korngrößenverteilung Bentonit – Richtwerte

Beschreibung / Anwendung	Description / Application	Description / Application
IBECO SEAL 80 ist ein aktivierter Natrium-Bentonit für den Baubereich. Aufgrund seiner sehr guten Sorptionseigenschaften eignet sich IBECO SEAL 80 insbesondere für Dichtungskerne in Dämmen und Deichen, Basis- und Oberflächenabdichtungen von Deponien sowie für andere Abdichtungs- und Bodenverbesserungsmaßnahmen.	IBECO SEAL 80 is an activated sodium bentonite for civil engineering. Due to its excellent sorption properties IBECO SEAL 80 is especially suitable for cores in dams and dikes, base and surface sealing of landfills and other sealing and soil improvements.	IBECO SEAL 80 est une bentonite de sodium activé pour le secteur de la construction. Grâce à ses excellentes propriétés de sorption IBECO SEAL 80 est particulièrement adapté comme noyau d'étanchéité dans les barrages et les digues, étanchéité de base et de couverture des sites d'enfouissement et d'autres améliorations d'étanchéité et de sol.

Technische Durchschnittswerte	Technical average values	Valeurs techniques moyennes		
Wassergehalt	Water content	Teneur en eau	11 ± 3	%
Korndichte	Specific density	Poids spécifique	2,65	g/cm <sup>3</sup>
Schüttdichte	Bulk density	Densité apparente tassée	800 ± 100	g/l
Siebrückstand auf 0,063 mm	Screen residue on 0,063 mm	Refus au tamis 0,063 mm	20 ± 5	%
Kationenaustauschkapazität	Cation exchange capacity	Capacité d'échange de cations	80 ± 10	mval/100 g
Montmorillonitgehalt	Montmorillonite content	Teneur en montmorillonite	78	%
Wasseraufnahme (Enslin-Neff)	Water absorption (Enslin-Neff)	Absorption d'eau (Enslin-Neff)	500	%
Quellvolumen	Swelling index	Gonflement	28	ml/2 g

**Abb. 4:** Verwendetes Material – Aktiv Bentonit Ibeco Seal 80

Als Bentonit bezeichnet man tonhaltiges Gestein, das durch die Verwitterung vulkanischer Aschen vor etwa 12 - 14 Millionen Jahren entstanden ist. Seinen Namen erhielt Bentonit nach der ersten Fundstätte bei Fort Benton (USA). Seine ungewöhnlichen Eigenschaften (z.B. Quellfähigkeit, Adsorption) werden durch das Tonmineral Montmorillonit (kurz: Mont) bestimmt, was seine starke Wasseraufnahme- und Quellfähigkeit erklärt.

Der Name Montmorillonit leitet sich von der südfranzösischen Stadt Montmorillon ab, wo diese Tone ebenfalls vorkommen. "Montonit" leitet sich ebenfalls aus dem Fundort Montmorillon ab und ist eine eingetragene Marke für quellfähige Schichtsilikate.

Damit ein Ton als "Bentonit" bezeichnet werden kann, muss nach allgemeiner Definition sein Hauptbestandteil (mindestens 50 %) der Smektitgruppe (Dreischicht-Silikat mit Quellfähigkeit) angehören. Üblicherweise ist dieses Mineral Montmorillonit, weshalb man gelegentlich auch die Bezeichnung "Montmorillonit-Bentonit" findet. Neben Montmorillonit enthalten Bentonite Begleitminerale wie Quarz, Glimmer, Feldspat oder Kalk in veränderlichen Anteilen.

### 2.2.1 Eigenschaften

Durch den hohen Anteil an Montmorillonit ist Bentonit ein sehr weiches Gestein. Montmorillonit gehört mit einer Mohshärte von 1 bis 2 zu den Mineralen mit der geringsten Härte, was sich auch auf das Gestein überträgt.

Die innere Oberfläche eines Gramms beträgt 400 m<sup>2</sup> bis 600 m<sup>2</sup> (normaler Ton: 2 m<sup>2</sup>). Er bildet deswegen besonders wertvolle Ton-Humus-Komplexe, so dass unbelasteter Bentonit auch eine gute Zugabe zum Kompost darstellt.

Wasser, das in das Bentonit eingerührt wurde, ist ein Nichtnewtonsches Fluid und weist ein thixotropes Verhalten auf: Es verhält sich wie eine Flüssigkeit, wenn man es schüttelt oder in einem Becherglas umrührt, bildet aber in Ruhe eine feste Struktur, weswegen es sich u. a. auch im Tiefbau gut als Stützflüssigkeit bei der Erstellung von Schlitzwänden, unverrohrten Bohrpfählen oder für den Schildvortrieb im Tunnelbau eignet.

### 2.2.2 Verwendung

Bentonit findet eine wichtige Anwendung in der Bautechnik, unter anderem bei Bauwerksabdichtungen und im Deichbau. Aufgrund ihrer Farbe werden solche Abdichtungen auch als Braune Wanne bezeichnet. Bentonit dient als Gleitmittel beim Vortrieb von Tunneln und Rohren, Einvibrieren von Schmalwänden. Bei der Gewinnung von Wärme aus Erdwärme durch die Verwendung von Wärmepumpen, werden die Kollektorrohre der Erdwärmesonden oft mit Bentonit ummantelt, weil dieser das Wasser bindet und die Entstehung von Hohlräumen beim Gefrieren verhindert. Bentonit ist ein mineralisches Dichtungsmittel mit vielfältigen Einsatzmöglichkeiten[7] wie z. B. die Immobilisierung von Schadstoffen und Einkapselung von Altlasten.

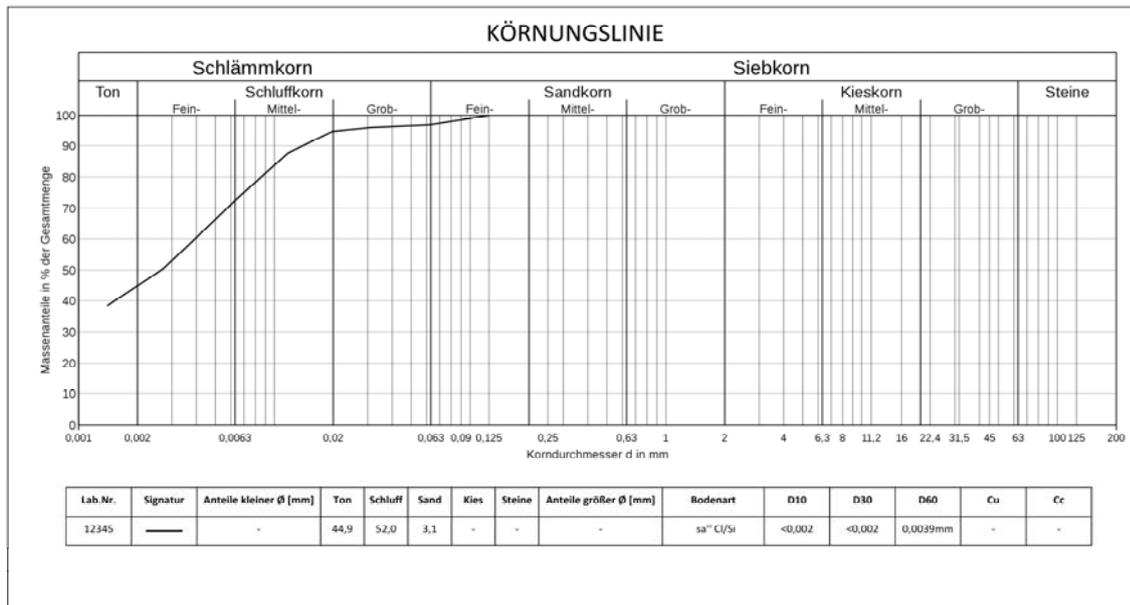
- Bergbau- und Bohrtechnik

In Bohrspülungen bei Bohrungen und in Stützflüssigkeiten bei ungestützten Schlitzwänden.

Weitere Einsatzmöglichkeiten sind durch die Verwendung als Adsorptionsmittel gegeben, wie folgt:

- Öl- und Getränkeaffinierung
- Papieradditive und Spezialitäten
- Gartenbau, zur Verbesserung von sandigen Böden
- Hoch- und Tiefbau
- Abwasserbehandlung

## 2.3 Kaolinit



**Abb. 5:** Korngrößenverteilung Kaolinit – Verwendetes Material

Das Mineral Kaolinit ist ein sehr häufig vorkommendes Schichtsilikat aus der Kaolinit-Serpentin-Gruppe. Es ist ein typischer Vertreter der Zweischicht-Tonminerale. Kaolinit kristallisiert im triklinen Kristallsystem und entwickelt meist blättrige, schuppige, erdige oder massige Aggregate, selten aber auch pseudo-hexagonale Kristalle von überwiegend weißer Farbe.

Durch Verunreinigungen kann seine Farbe aber auch ins rötliche, bräunliche oder bläuliche spielen. Seine Strichfarbe ist weiß. Kaolinit kann gesteinsbildend als Kaolin auftreten.

### 2.3.1 Eigenschaften

Kaolinit hat eine Mohshärte von 2 bis 2,5, eine Dichte von 2,61 bis 2,68 g/cm<sup>3</sup>. Im Wasser wird das Mineral plastisch verformbar.

Kaolinit als Hauptbestandteil von Kaolin ist ein hydratisiertes Aluminiumsilikat. Es ist ein natürliches, feinkörniges und gut kristallisiertes Tonmineral mit einer „buch“artigen Struktur. In jeder dieser „Buchseiten“ wiederholt sich die gleiche Schichtung von oktaedrischen Aluminat- und tetraedrischen Silikatschichten, die über Schichten von Sauerstoffatomen verbunden sind. Durch diese Schichtung ist die Plastizität (Verformbarkeit) zwar gering, aber der chemische Aufbau bringt eine hohe Feuerbeständigkeit und es bildet sich beim Brennen ein fester, dichter Scherben.

### 2.3.2 Verwendung

Kaolinit ist ein Aluminiumsilikat und entsteht bei der Verwitterung von Feldspäten. Seinen Namen erhielt das Mineral von dem südchinesischen Berg Kao-Ling, wo es erstmalig abgebaut wurde. Jahrhundertlang haben die Menschen dort den schneeweißen Ton zur Porzellanherstellung verwendet, bis er im 18. Jahrhundert auch nach Europa kam.

Neben der Porzellanherstellung fand Kaolinit schließlich auch Verwendung als Füllmittel und Trägerstoff in pharmazeutischen und kosmetischen Produkten. Wegen seiner großen Oberfläche eignet sich das Tonmineral aber auch als Klärungsmittel bei der Weinherstellung. Und schließlich ist auch die weiße Bestäubung der Salamihaut nichts anderes als Kaolinit.

## 2.4 Talk

Talk/Chlorit 98,00 %

### Chemische Analyse

■ Glühverlust:	9,00 %
■ SiO <sub>2</sub> :	48,00 %
■ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :	10,50 %
■ Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :	2,00 %
■ MgO:	30,00 %
■ CaO:	0,60 %

### Korngrößenverteilung

■ Siebrückstand > 63µm	1,00 %	Aline-LS
■ d <sub>50</sub>	10,5 µm	Sedigraph 5100

### Physikalische Analyse

Dichte	2,78 g/cm <sup>3</sup>	ISO787/10
Stampfdichte	0,8 g/cm <sup>3</sup>	ISO 787/11
Schüttdichte	0,6 g/cm <sup>3</sup>	EN 1097/3
Härte	1-2	Mohs
pH-wert	9,0	
Ölzahl	31 ml/100 g	ISO 787/5
Spez. Oberfläche	5,5 m <sup>2</sup> /g	BET
Spez. Oberfläche	10500	Blaine

**Abb. 6:** Produktdatenblatt Talk – Richtwerte

Das Mineral Talk (Steatit, Magnesiumsilikathydrat, in pulverisierter Form Talkum) ist ein sehr häufig vorkommendes Schichtsilikat.

Es kristallisiert je nach Modifikation als Talk-1A im triklinen oder als Talk-2M im monoklinen Kristallsystem und entwickelt überwiegend blättrige, massige bzw. derbe Mineral-Aggregate, sehr selten auch makroskopisch erkennbare, tafelige oder pseudotrigonal-pyramidale Kristalle von meist mattweißer oder blassgrüner Farbe. Ebenso findet sich Talk in Form von Pseudomorphosen nach Quarz oder Anthophyllit.

Talk gehört zu den gesteinsbildenden Mineralen in der Epizone der kristallinen Schieferreihe und ist Hauptbestandteil des Specksteins.

### **2.4.1 Eigenschaften**

Reiner Talk ist farblos oder durch Gitterbaufehler bzw. mikrokristalline Ausbildung in massigen Aggregaten weiß. Durch Fremd Beimengungen kann er aber auch von grauer, hell- bis dunkelgrüner oder gelblicher Farbe sein. Als Mineralgemenge im Speckstein sind weitere Farbvarianten möglich.

Talk besitzt die geringstmögliche Mohshärte 1 und ist damit ein Referenzmineral auf der Mohs'schen Härteskala. Aufgrund seiner geringen Härte neigt er häufig zu Stapelfehlern in der Kristallstruktur.

Das Mineral ist wasserabweisend und fühlt sich seifig oder fettig an, daher wird er oft auch synonym als Speckstein bezeichnet.

### **2.4.2 Verwendung**

Talk ist aufgrund seiner besonderen Eigenschaften (weich, wasserabweisend) vielseitig verwendbar und wird bevorzugt in pulverisierter Form als Gleitmittel mit geringer Scheuerwirkung eingesetzt oder Stoffen beigemischt, um ihnen wasserabweisende oder abdichtende Eigenschaften zu verleihen.

Fein gemahlen wird Talk zum einen als Füllstoff in der Papier- und Zellstoffindustrie, der Farben- und Lackindustrie sowie der Gummi-, Kunststoff- und Keramikindustrie verwendet und zum anderen als Trennmittel in Kabeln und zwischen Reifen und Schlauch.

## 3 Versuche

### 3.1 Versuchsbeschreibung

In der RVS 11.06.26 – Wasseraufnahme der Kornklassen kleiner 0,125 mm wird der Enslin-Versuch beschrieben. Als Prüfgerät wird das Enslin Gerät verwendet und eine Probemenge von 1 g angesetzt. Die Probemenge wird bei  $110 \pm 5$  °C bis zur Massenkonstanz getrocknet.

In der DIN 18132:1995 – Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens wird der Enslin-Neff Versuch beschrieben. In diesem Versuch beträgt die Probemenge 1 g bei  $w_A < 100\%$ , bzw. 0,2 g bei  $w_A > 100\%$ , der zu prüfenden Kornklasse und wird bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet. Als Prüfgerät für diesen Versuch wird das Enslin - Neff Gerät verwendet.

In Kugler, 2003 wurde durch zahlreiche Vorversuche eine modifizierte Vorgangsweise nach Enslin-Neff (=Enslin-Neff<sub>mod</sub>) ausgearbeitet.

Die wesentlichen Unterschiede zu den anderen Vorgangsweisen sind folgende:

- Applikation von 0,5 g der Fraktion  $< 0,02$ mm ohne Vormahlen
- Trocknung bei 60°C statt 105°C (Schonung quellbarer Phasen)
- Verdunstungskorrektur

## 3.2 Verdunstungskorrektur

Nach Probenapplikation und rasantem Anstieg des Wasserverbrauches folgt meist nach wenigen Minuten ein deutliches Abflachen der Wasserverbrauchs-Kurve und meist nach einigen Stunden der Beginn der Linearität.

Dies wird in Analogie zu zahlreichen reinen Verdunstungsuntersuchungen im Vorfeld mit nahezu perfekt linearen Verläufen als Hinweis reiner Verdunstung des Wassers über die Probenoberfläche und die nicht bedeckte Frittenoberfläche gewertet. (Kugler, 2002)

Definition Abbruchkriterium und Berechnung der Wasseraufnahme ( $w_A$ ) nach Enslin-Neff<sub>mod</sub>\_Pulver (Kugler, 2011):

- **Beginn Linearität des Wasserverbrauches (WV) = Beginn der reinen Verdunstung ohne Wasseraufnahme ( $w_A$ ) der Probe.**
- **Feststellung des Beginns der Linearität durch lineare Regression z.B. in Excel**
- **Kriterium des Beginns der Linearität wird folgendermaßen festgelegt:**

Zur Objektivierung und Vergleichbarkeit der visuellen Einschätzung des Beginns der Linearität wird das Kriterium  $R^2 \geq 0,9990$  bei linearer Regression herangezogen. Aus den bisherigen Erfahrungen ist dieses Kriterium bei sorgfältiger Versuchsdurchführung in wenigen Stunden bei nicht zu stark quellfähigen Materialien leicht zu erreichen. Im Schnitt werden dabei 99,5 % des Endwertes erreicht, der bei deutlich längeren Messzeiten (bis zum wahrscheinlich tatsächlichen Ende von  $w_A$ ) ermittelt wurde. Dies ist für Routinemessungen völlig ausreichend.

Rahmenbedingungen für dessen Anwendung sind:

- Dauer mind. 4 Std, max. 9 Std. (abhängig vom Erreichen der Linearität)
- Ablesungszeitpunkte: 1, 2, 5, 15, 30, 60 min, danach zu jeder weiteren vollen Std. (Angabe in [min]); Toleranzen zeitl.: 1-5 min:  $\pm 10$  sec, 15-60 min:  $\pm 1$  min, danach  $\pm 5$  min)
- Die lineare Regression wird immer über alle Ablesungen ab 30 min durchgeführt (davor manchmal kaum beeinflussbare unharmonische Schwankungen des Wasserverbrauchs und zufällig lineare Verläufe möglich, die ein Ende der  $w_A$  nur vortäuschen).
- der Beginn der Regression wird dann so lange um eine Ablesung nach hinten versetzt (mindestens 3 Ablesungen), bis letztlich  $R^2 \geq 0,9990$  erreicht ist. Der Beginn der Regression entspricht dann dem gesuchten Beginn der Linearität
- wenn  $R^2 \geq 0,9990$  nach der Mindestdauer von 4 Std. erreicht wird, ist der Versuch beendet. Falls nicht, wird der Versuch solange um eine Stunde (bis max. 9Std.) verlängert, bis das Kriterium erreicht ist.

- Falls  $R^2 \geq 0,9990$  auch nach 9 Std. noch nicht erreicht ist, wird die Regressionsgerade zw. 4-9 Std herangezogen
- **Berechnung: der abgelesene Wasserverbrauch wird nun um die durch die lineare Regression bestimmte Verdunstung über den gesamten Messbereich korrigiert.**

Dies impliziert zwar auch Verdunstung zu Beginn der Versuchsdurchführung, wo sicher die  $w_A$  überwiegt, korrigiert aber den Großteil des Versuches realistischer als wenn nur ab Beginn der Linearität die Verdunstung subtrahiert würde, weil die Verdunstung mit zunehmender Versuchsdauer rasch der dominierende Faktor des Wasserverbrauches wird. Darüber hinaus wird durch die Verdunstungskorrektur über den gesamten Bereich der resultierende Verlauf der  $w_A$ -Kurve harmonischer und damit natürlicher und realistischer. Bei Verdunstungskorrektur ab Beginn der Linearität würde ein unnatürlicher Knick in der  $w_A$ -Kurve entstehen. Überdies wäre bei letzterer Vorgangsweise eine Fehlbeurteilung des Beginns der Linearität von weit größerer Bedeutung für den ermittelten Endwert. Daher wird über den gesamten Versuch der WV über die Verdunstung korrigiert. Dies erfolgt nach folgender Formel:

$$WV_{corr} = WV - (Zeit * k)$$

$w_A$	[Mass-%]	Wasseraufnahmevermögen
$WV_{corr}$	[ml]	korrigierter Wasserverbrauch
$WV$	[ml]	Wasserverbrauch
$Zeit$	[min]	Versuchsdauer zum Zeitpunkt der Ablesung
$k$	[-]	Steigung der Regressionsgeraden

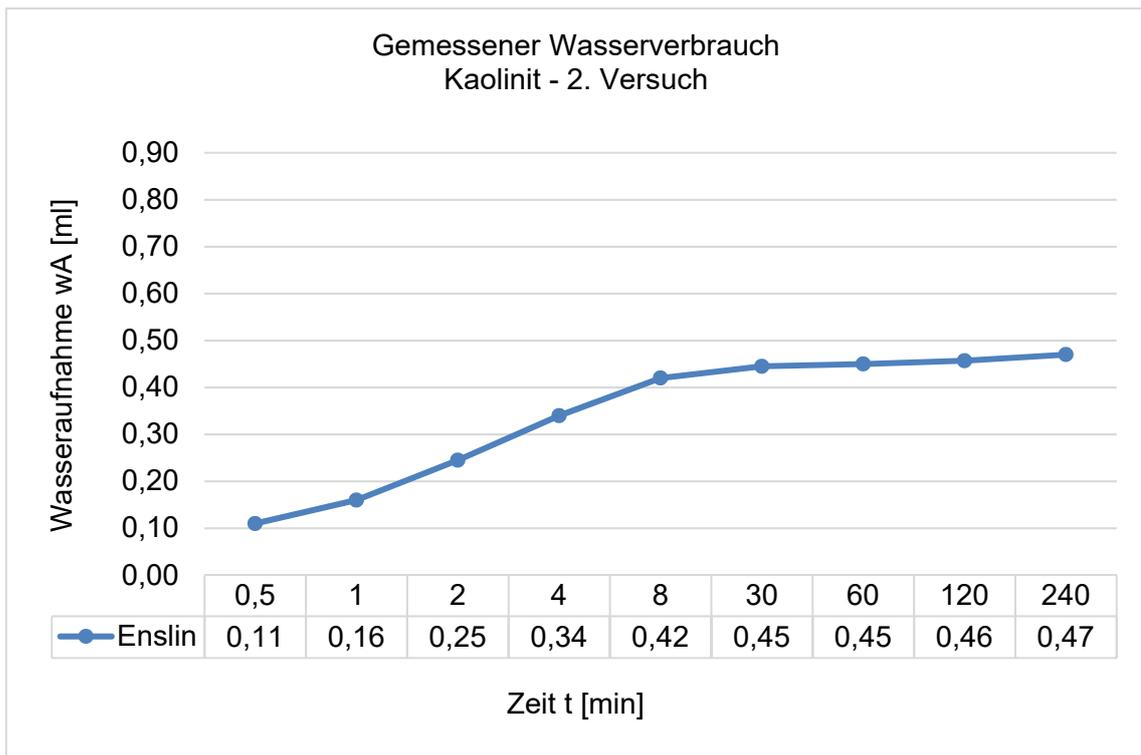
- **Die  $w_A$  ergibt sich aus dem Prozentanteil korrigierter WV an der Einwaage:**

$$w_A = (WV_{corr} / m_d) * 100$$

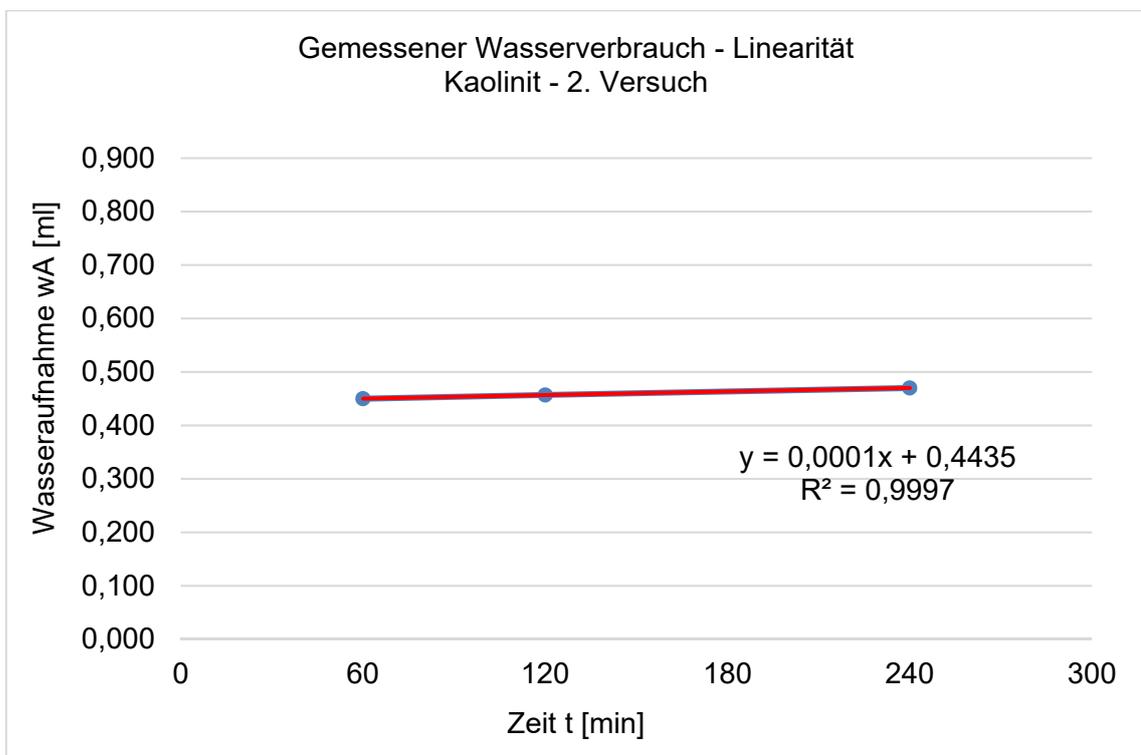
$w_A$	[Mass-%]	Wasseraufnahmevermögen
$WV_{corr}$	[ml]	korrigierter Wasserverbrauch
$m_d$	[Mass-g]	Trockenmasse

In dieser Arbeit wurde die Verdunstungskorrektur erst nach der Durchführung der Versuche berücksichtigt, weil für Vergleichszwecke die Versuchsdauern laut RVS 11.06.26 :1987 und DIN 18132 (1995) bevorzugt wurde.

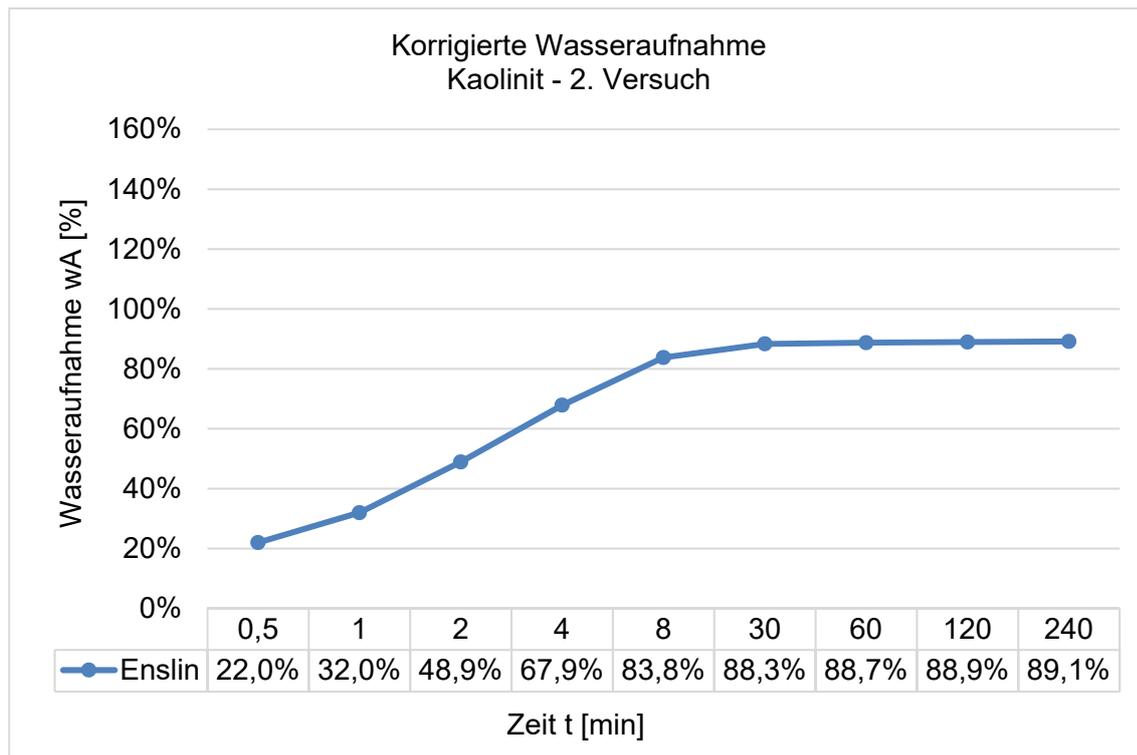
Im Folgenden werden zwei Versuche als Beispiel für die Verdunstungskorrektur dargestellt:



**Abb. 7:** Gemessener Wasserverbrauch – Kaolinit



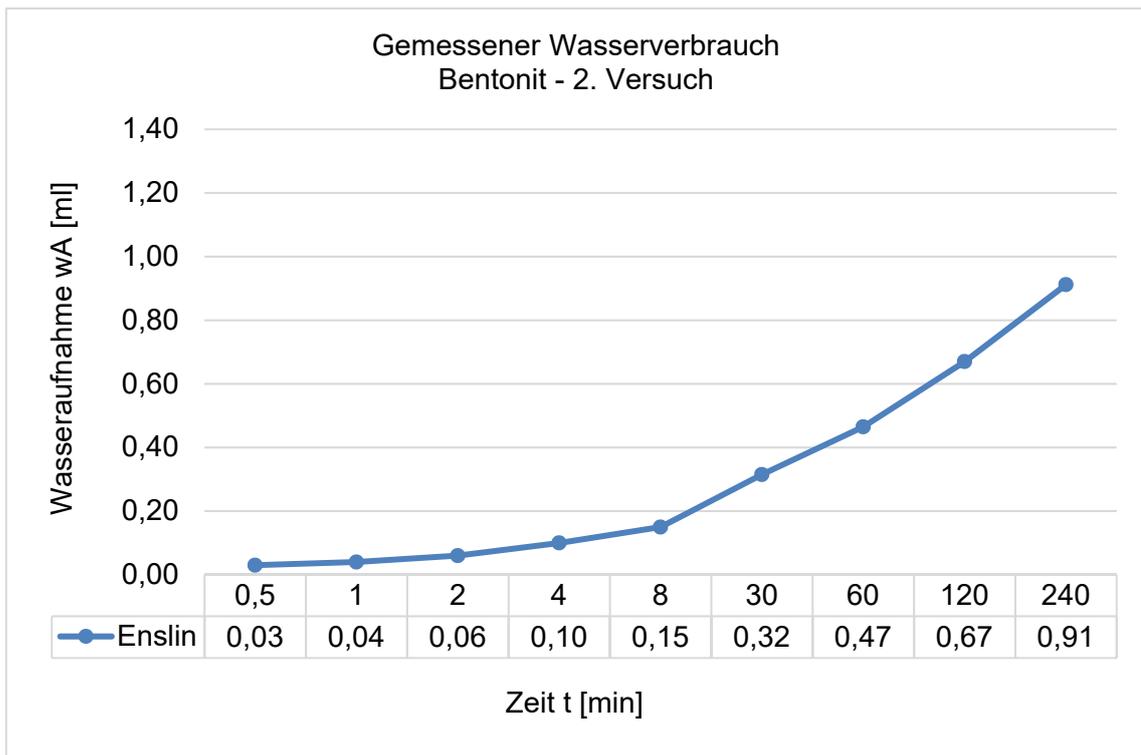
**Abb. 8:** Lineare Regression – Kaolinit



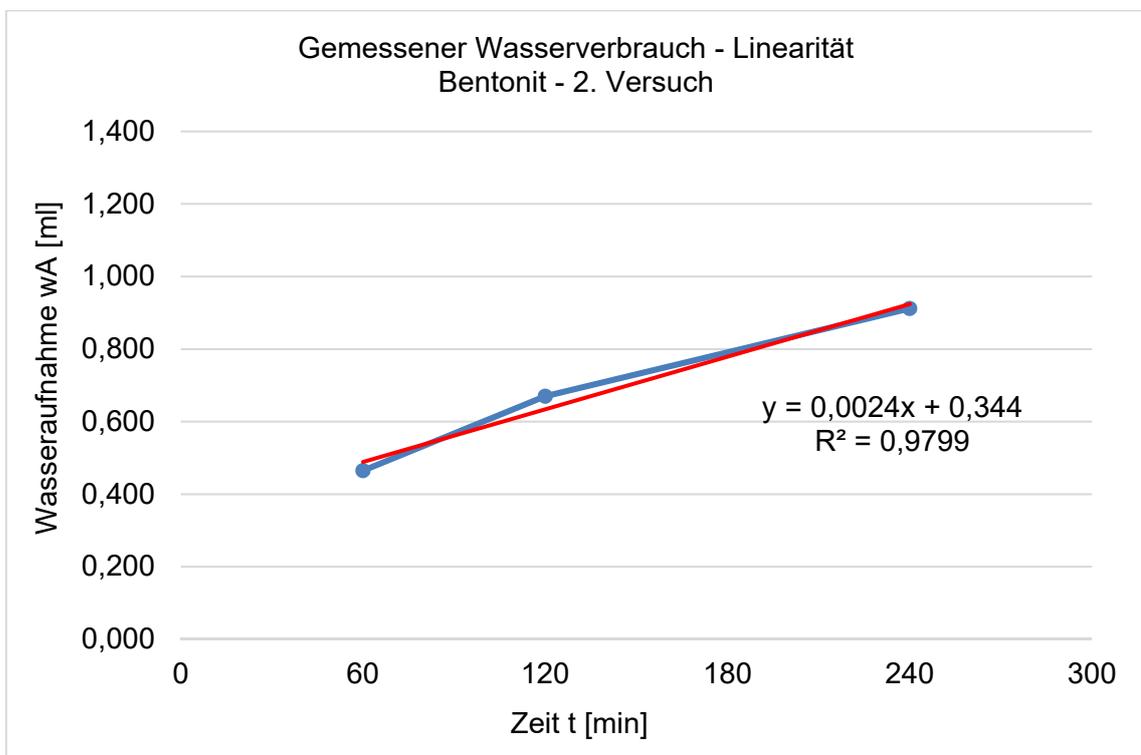
**Abb. 9:** Korrigierte Wasseraufnahme nach Kugler – Kaolinit

Die oben angeführten Diagrammen stellen die Verdunstungskorrektur für Kaolinit dar. Da die lineare Regression das Kriterium  $R^2 \geq 0,9990$  über die letzten drei Ablesungen erreicht, ist die Wasseraufnahme während der Mindestdauer von 4 Std. abgeschlossen. Es wird dadurch die Aussage bestätigt, dass Linearität bei sorgfältiger Versuchsdurchführung in wenigen Stunden bei nicht zu stark quellfähigen Materialien leicht erreicht wird.

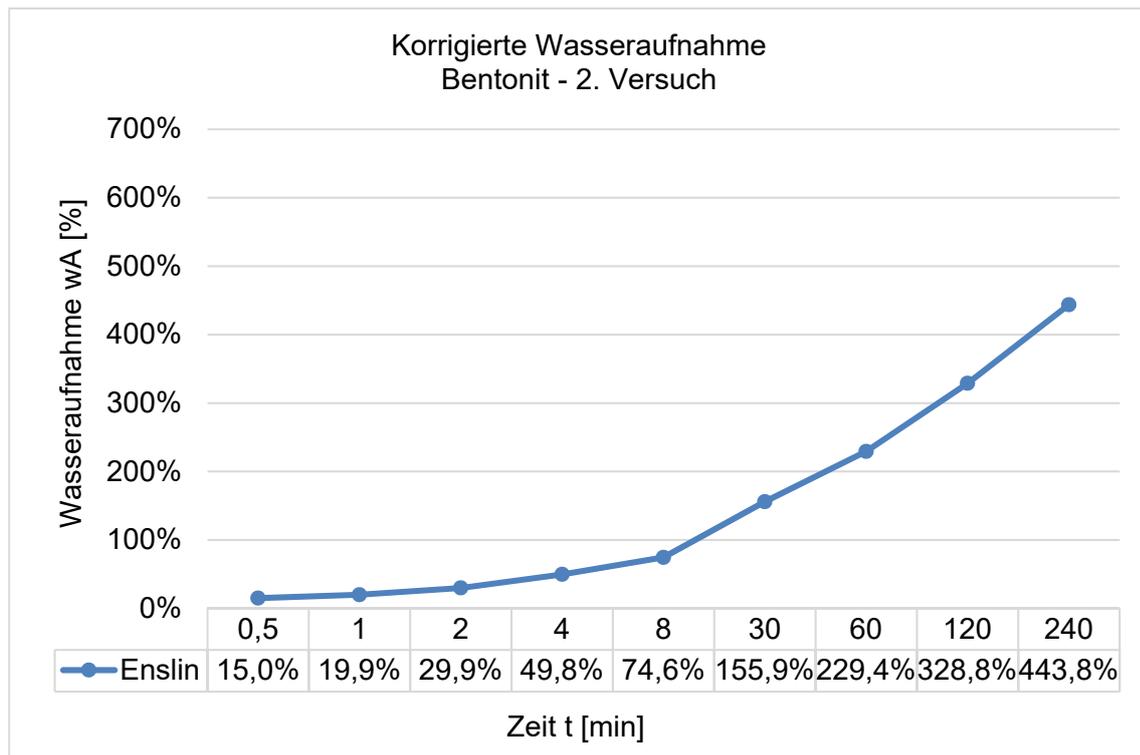
Im Gegensatz zu Kaolinit ist Bentonit ein stark quellfähiges Material. In folgenden Diagrammen ist eine Verdunstungskorrektur für Bentonit dargestellt:



**Abb. 10:** Gemessener Wasserverbrauch – Bentonit



**Abb. 11:** Lineare Regression – Bentonit



**Abb. 12:** Korrigierte Wasseraufnahme nach Kugler – Bentonit

Bei den Bentonit-Diagrammen wird, im Gegensatz zu Kaolinit, das Kriterium  $R^2 \geq 0,9990$ , während der Mindestdauer von 4 Std nicht erreicht. Das bedeutet, dass die Wasseraufnahme beim Abbruch des Versuches noch nicht abgeschlossen war. Dieser Versuch ist ein gutes Beispiel, warum das Abbruchkriterium und die Verdunstungskorrektur nach Kugler, für Routinemessungen, gegenüber den Versuchsdauern laut RVS 11.06.26 :1987 und DIN 18132 (1995) bevorzugt werden sollte.

### 3.3 Versuch nach Enslin

Für die Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens nach Enslin wurde ein Gerät, wie in der RVS 11.062, Blatt 12 beschrieben, verwendet.



**Abb. 13:** Verwendetes Gerät – Enslin (RVS 11.062)

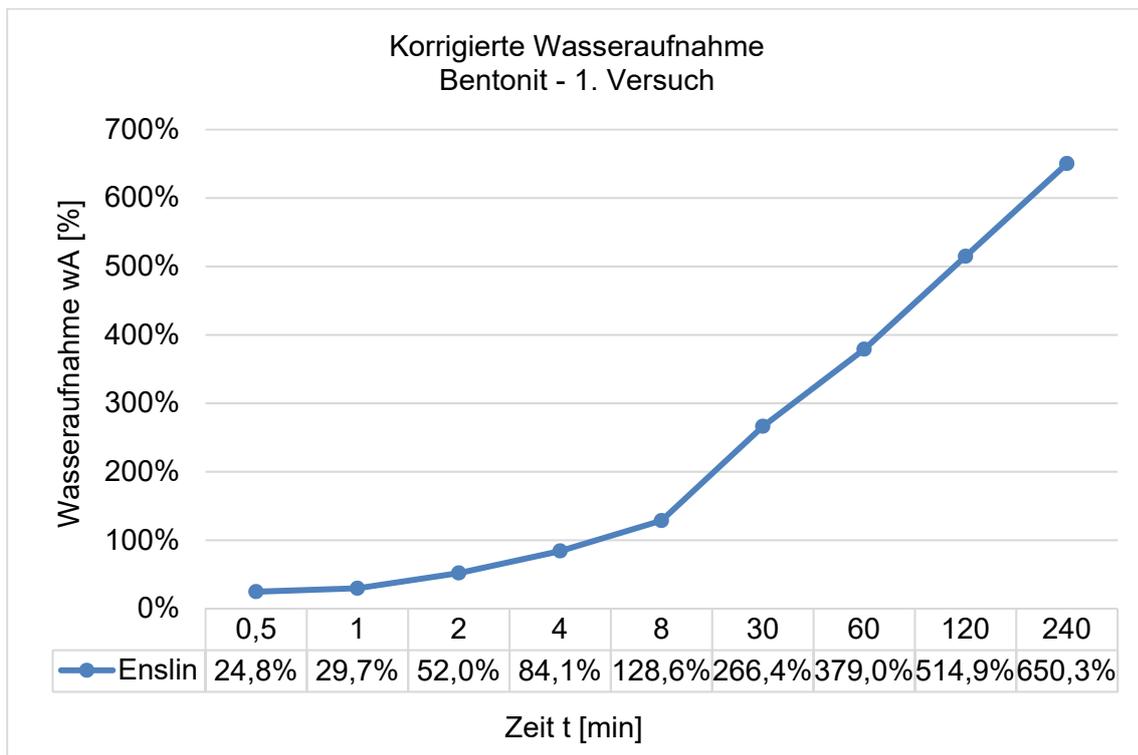
Es wurde jedoch, die modifizierte Vorgangsweise, Enslin – Neff<sub>mod</sub>, verwendet. Unterschiede zur RVS 11.062 sind die eingewogene Probemenge von 0,5 g an Stelle von 1,0 g und die Trocknung der Probemenge bei 60 °C statt 105 °C für die Schonung der quellfähigen Phasen.

Da die Enslin Versuche nur zum Vergleich der Enslin und Enslin-Neff Geräte dienen, sind diese Versuche nur mit pulvrigen Proben durchgeführt worden.

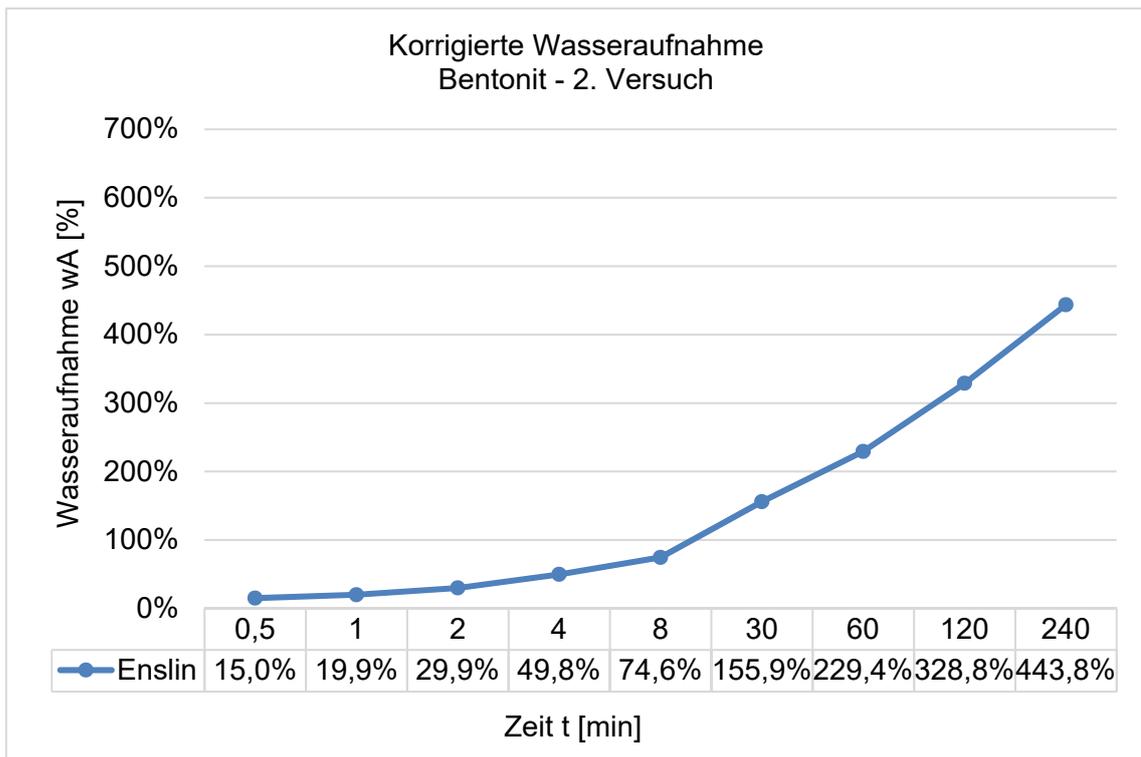
### 3.3.1 Versuche mit pulvrigen Proben

#### 3.3.1.1 Bentonit – Enslin

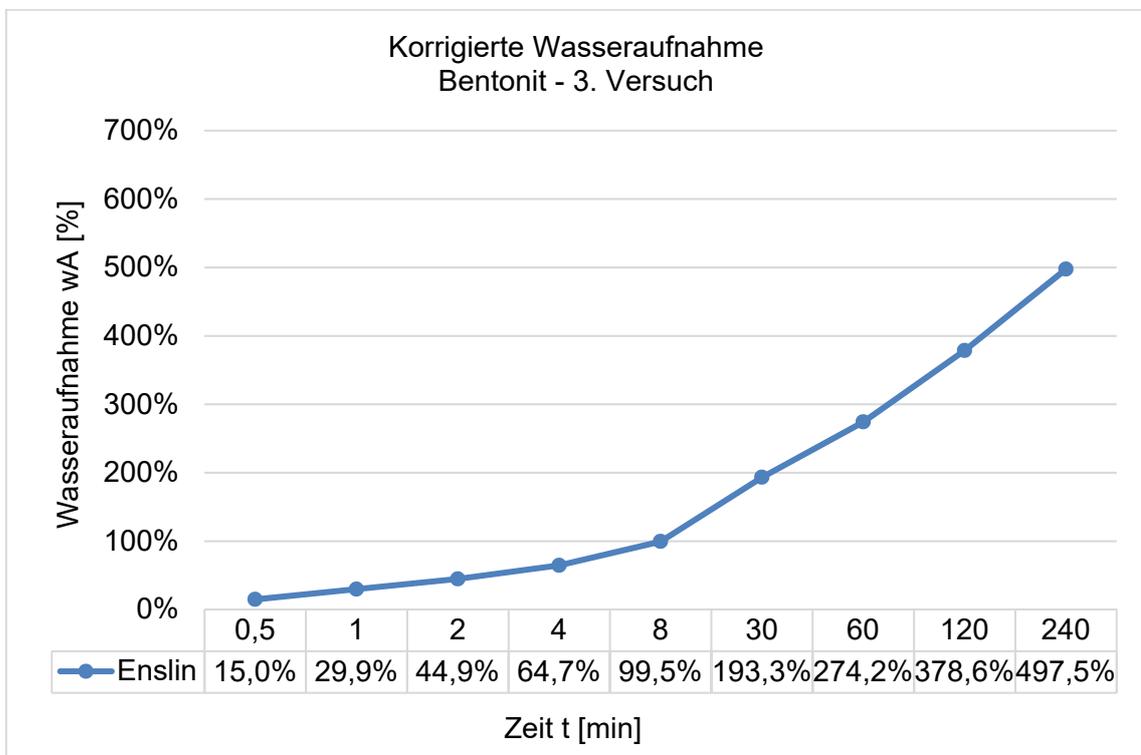
Für Proben mit einem Wasseraufnahmevermögen  $\geq 100\%$ , wie Bentonit, wurde 0,2 g Probenmenge eingesetzt. Der Dreiweghahn wird auf Messposition gedreht und der Probenraum verschlossen. Die Ablesung erfolgt für die Zeitintervalle  $t = 0,5$  min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 30 min, 1h, 2h und 4h. (Siehe Anhang – Wasseraufnahme Enslin – Bentonit)



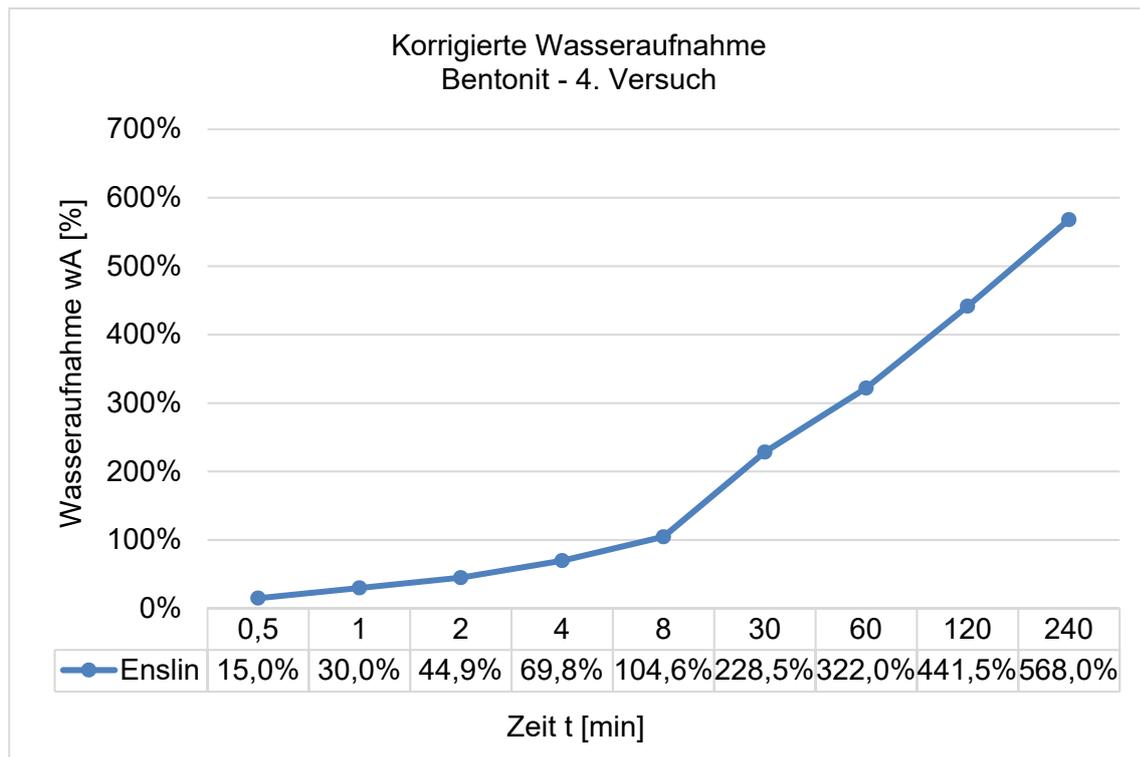
**Abb. 14:** Wasseraufnahme nach Enslin – Bentonit – 1. Versuch



**Abb. 15:** Wasseraufnahme nach Enslin – Bentonit – 2. Versuch



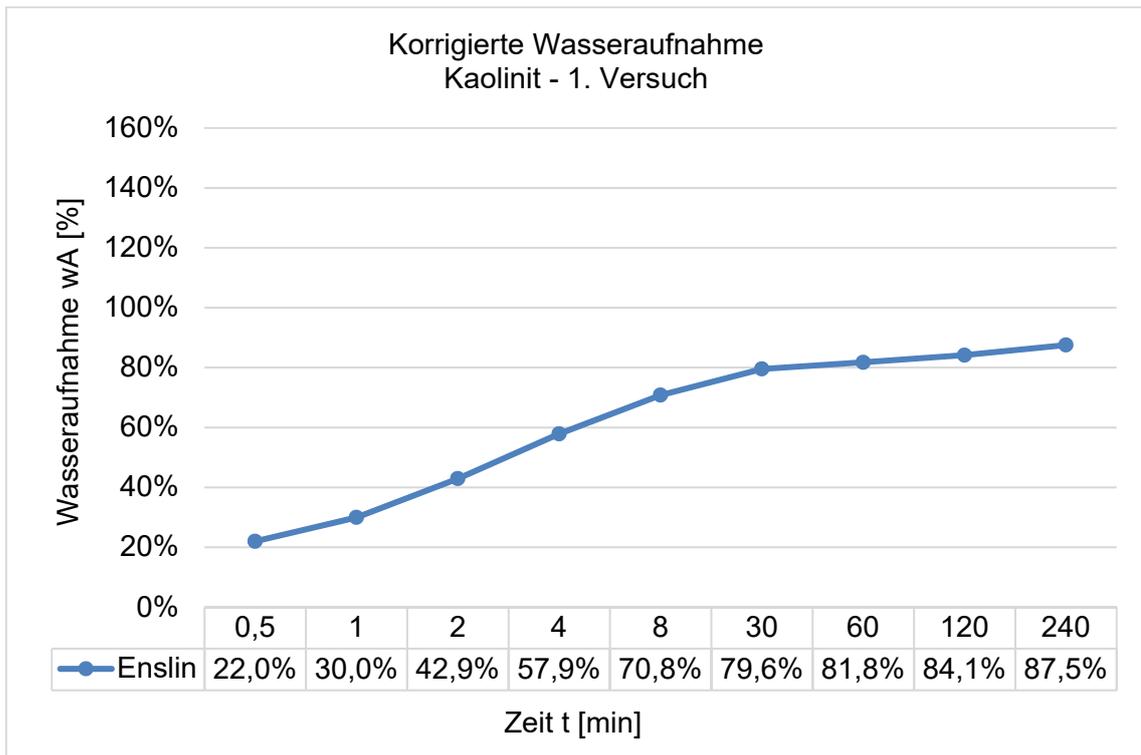
**Abb. 16:** Wasseraufnahme nach Enslin – Bentonit – 3. Versuch



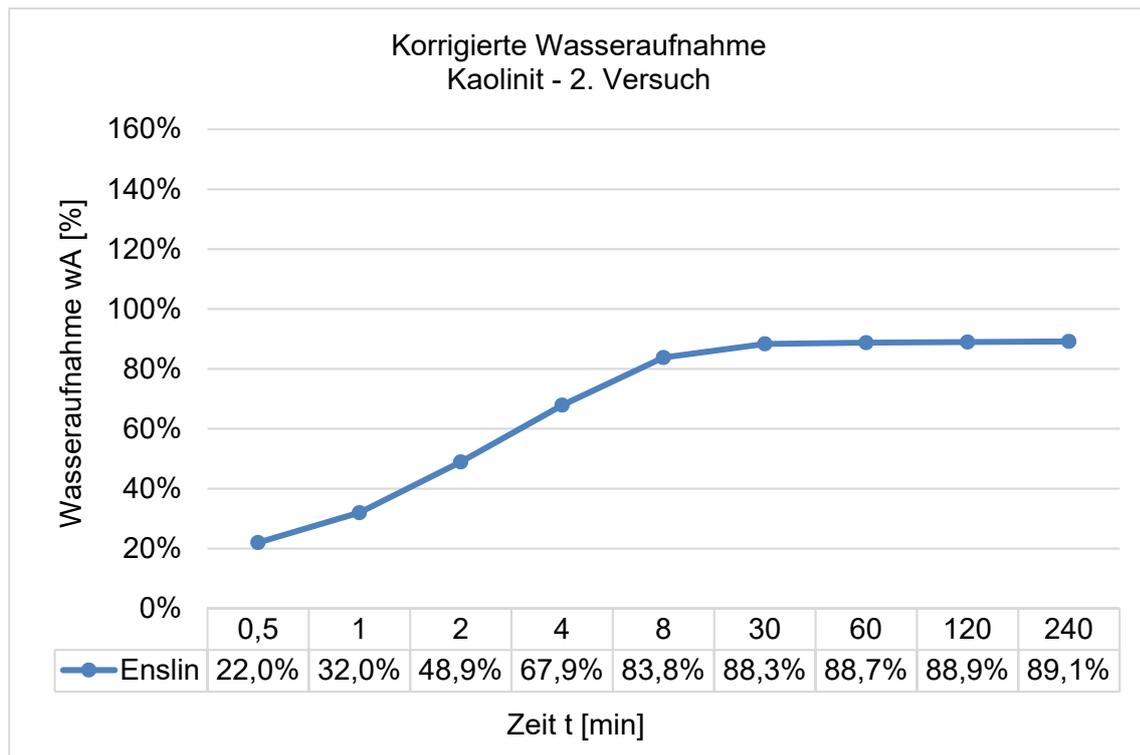
**Abb. 17:** Wasseraufnahme nach Enslin – Bentonit – 4. Versuch

### 3.3.1.2 Kaolinit – Enslin

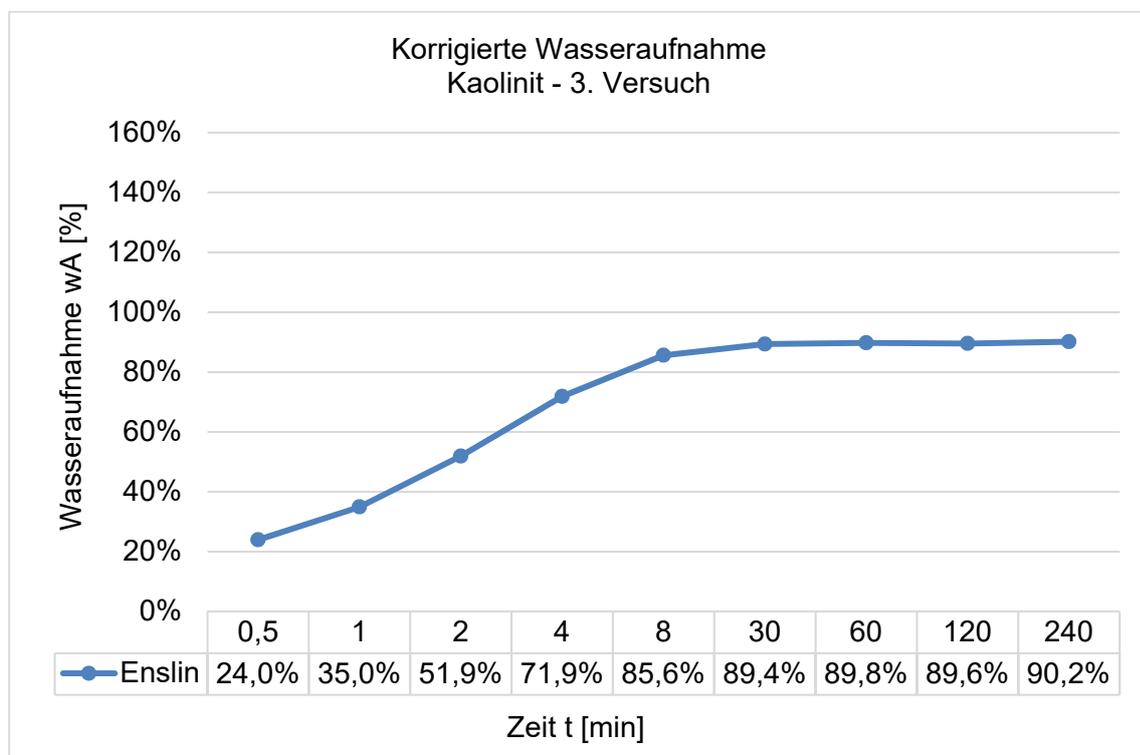
Für Proben mit einem Wasseraufnahmevermögen  $< 100\%$ , wie Kaolinit, wurde 0,5 g Probenmenge eingesetzt. Der Dreiweghahn wird auf Messposition gedreht und der Probenraum verschlossen. Die Ablesung erfolgt für die Zeitintervalle  $t = 0,5 \text{ min}$ ,  $1 \text{ min}$ ,  $2 \text{ min}$ ,  $4 \text{ min}$ ,  $8 \text{ min}$ ,  $30 \text{ min}$ ,  $1 \text{ h}$ ,  $2 \text{ h}$  und  $4 \text{ h}$ . (Siehe Anhang – Wasseraufnahme Enslin – Kaolinit)



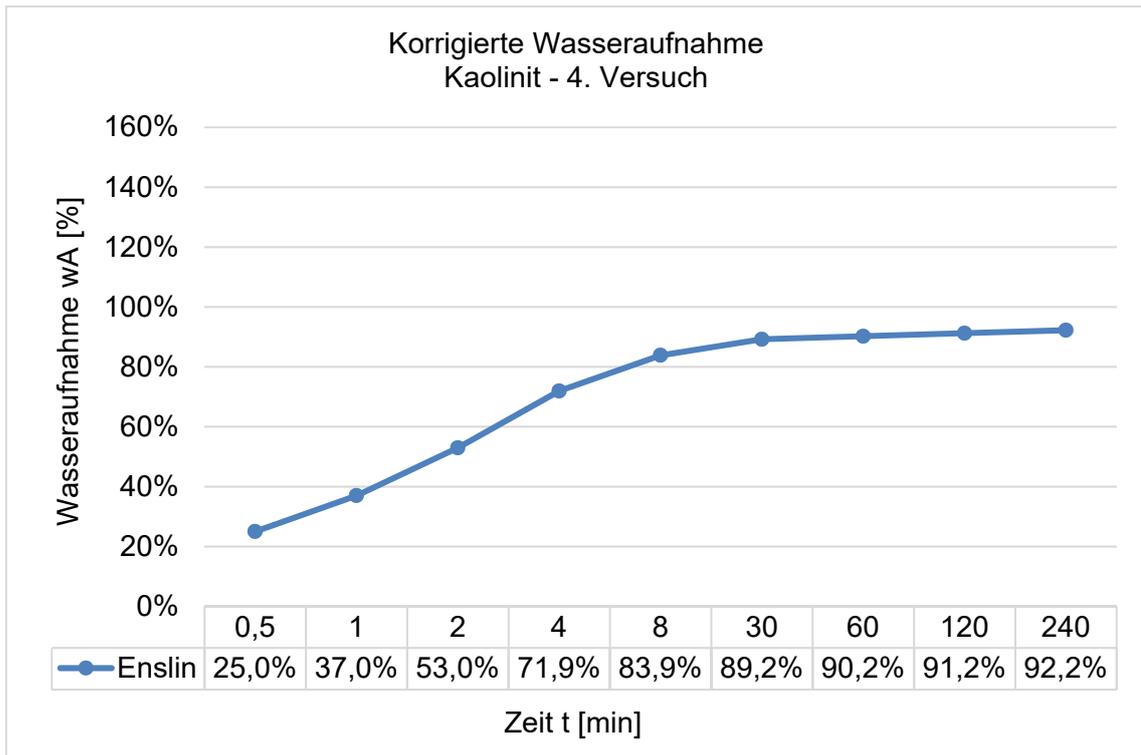
**Abb. 18:** Wasseraufnahme nach Enslin – Kaolinit – 1. Versuch



**Abb. 19:** Wasseraufnahme nach Enslin – Kaolinit – 2. Versuch



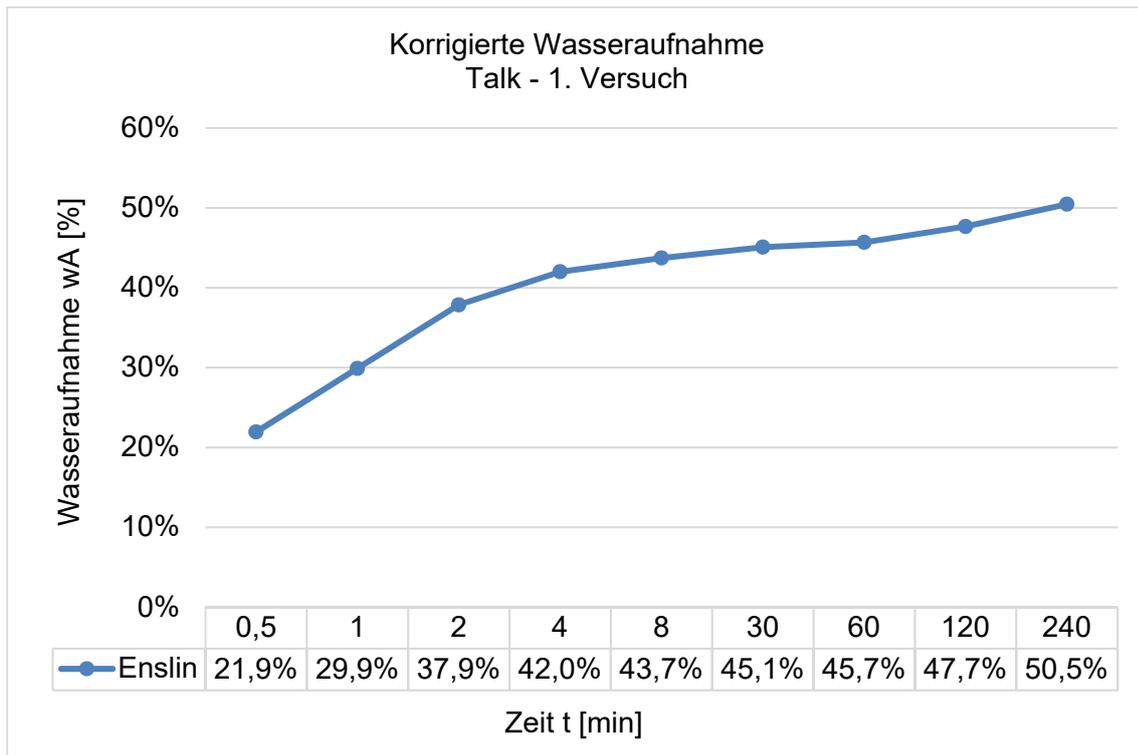
**Abb. 20:** Wasseraufnahme nach Enslin – Kaolinit – 3. Versuch



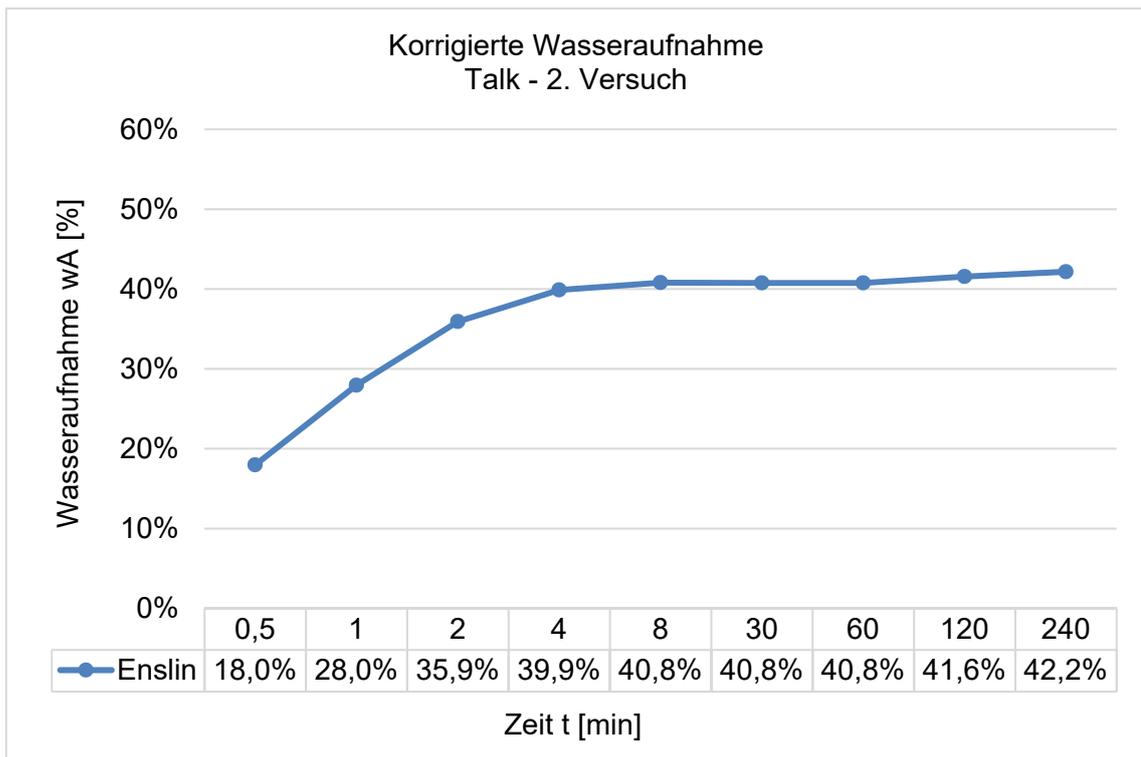
**Abb. 21:** Wasseraufnahme nach Enslin – Kaolinit – 4. Versuch

### 3.3.1.3 Talk – Enslin

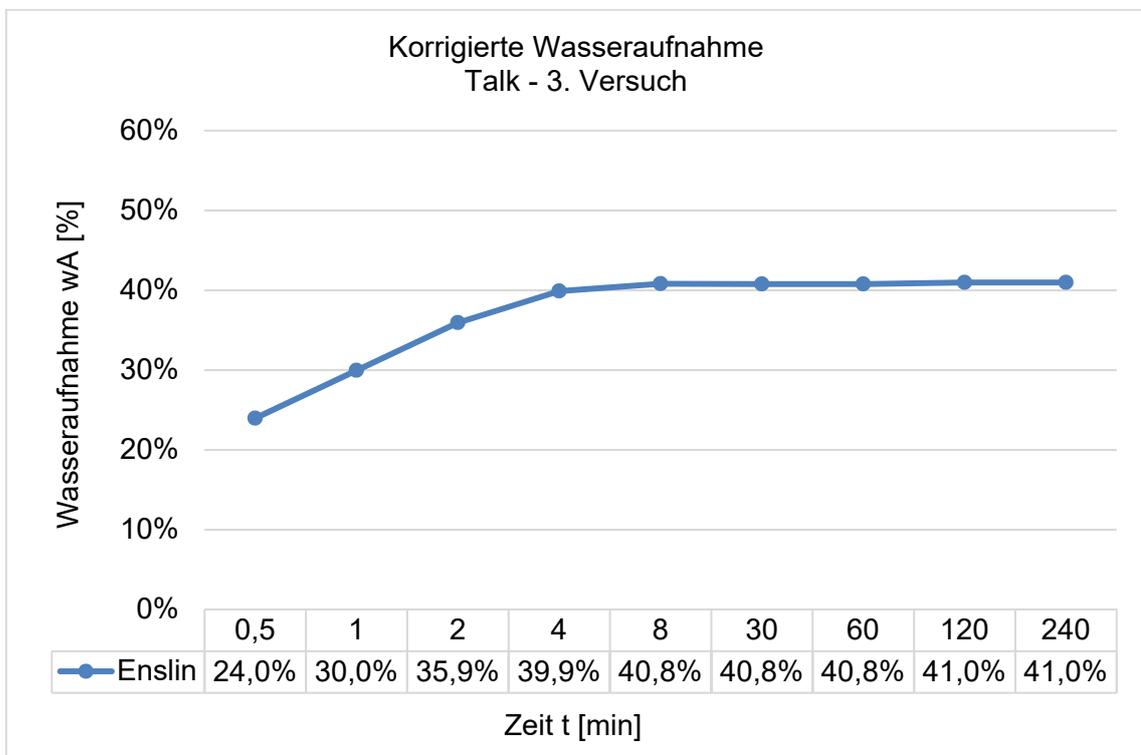
Für Proben mit einem Wasseraufnahmevermögen  $< 100\%$ , wie Talk, wurde 0,5 g Probenmenge eingesetzt. Der Dreiweghahn wird auf Messposition gedreht und der Probenraum verschlossen. Die Ablesung erfolgt für die Zeitintervalle  $t = 0,5$  min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 30 min, 1h, 2h und 4h. (Siehe Anhang – Wasseraufnahme Enslin – Talk)



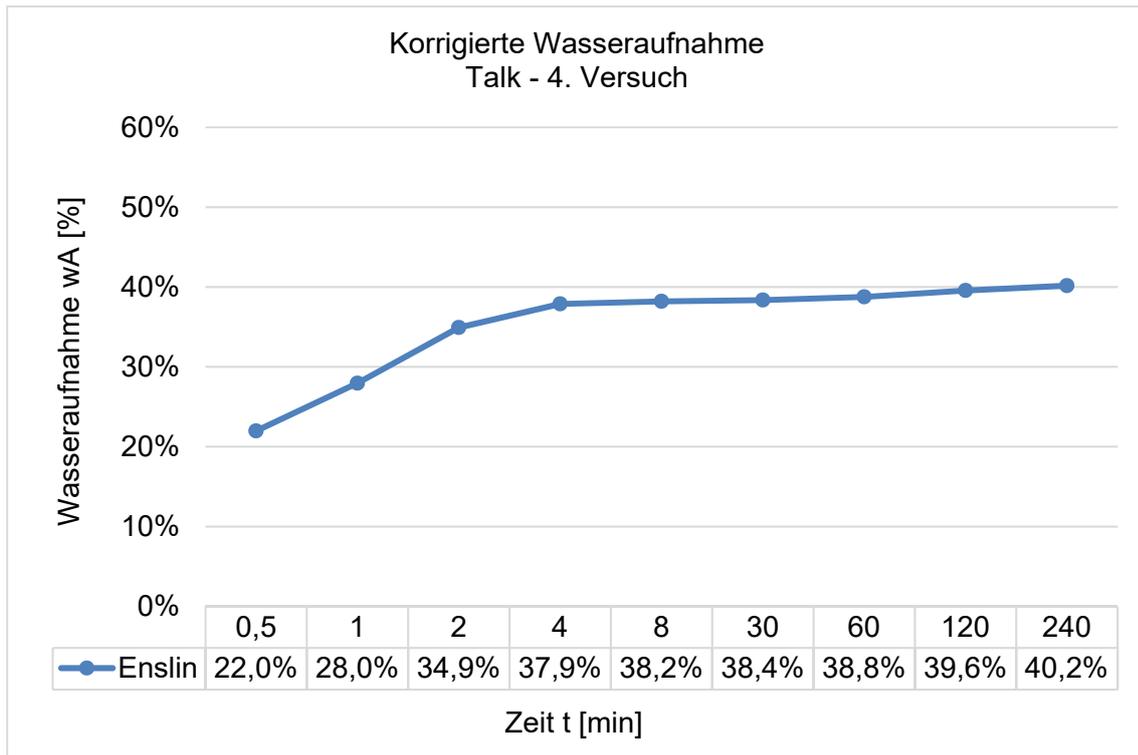
**Abb. 22:** Wasseraufnahme nach Enslin – Talk – 1. Versuch



**Abb. 23:** Wasseraufnahme nach Enslin – Talk – 2. Versuch



**Abb. 24:** Wasseraufnahme nach Enslin – Talk – 3. Versuch



**Abb. 25:** Wasseraufnahme nach Enslin – Talk – 4. Versuch

### 3.4 Versuch nach Enslin-Neff

Für die Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens nach Enslin-Neff, wurde ein Gerät nach Enslin, verbessert nach Neff, wie im DIN 18132 (1995) beschrieben, verwendet.



**Abb. 26:** Verwendetes Gerät – Enslin-Neff (DIN 18132)

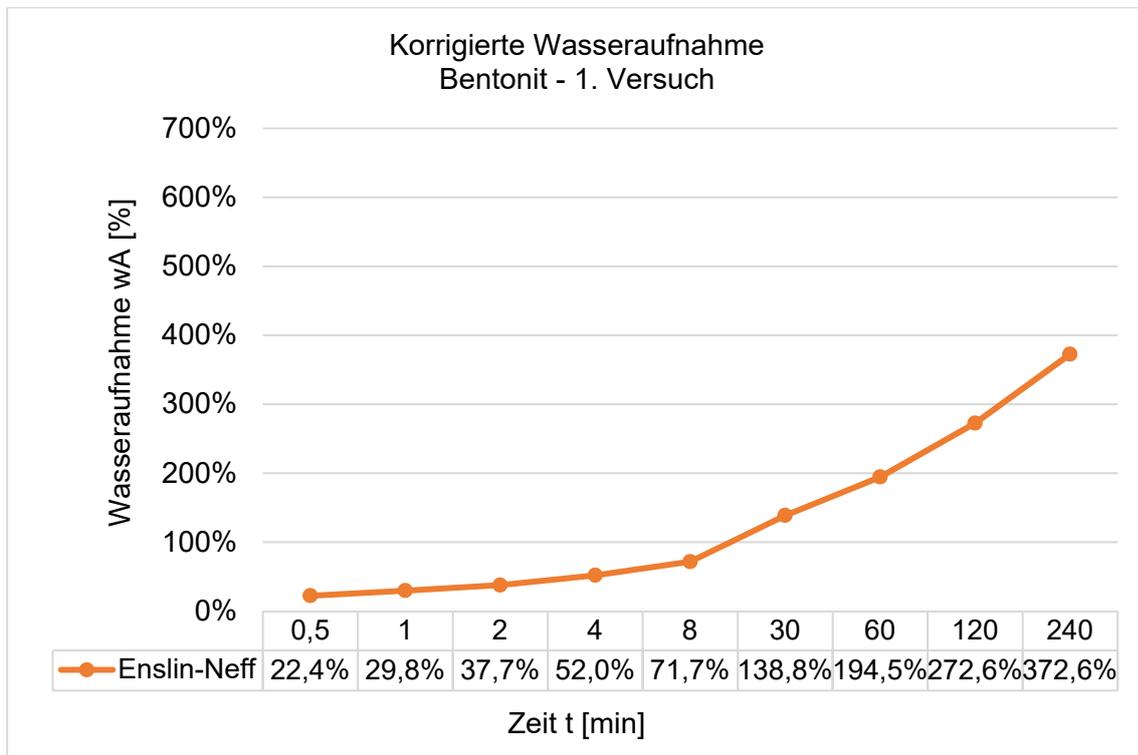
Das Gerät nach Enslin, verbessert nach Neff, hat ein Glasaufsatzrohr mit einer Filterplatte, die 50 mm oberhalb der Messrohrachse situiert ist, um die Kapillarität der Proben zu vermeiden. Das Glasverbindungsrohr hat eine offene Verbindung zum Glassmessrohr, ohne Dreiweghahn.

Es wurde als modifizierte Vorgangsweise, Enslin – Neff<sub>mod</sub>, bezeichnet. Unterschiede zur RVS 11.062 und DIN 18132 sind die eingewogene Probemenge von 0,5g an Stelle von 1,0g und die Trocknung der Probemenge bei 60°C statt 105°C für die Schonung der quellfähigen Phasen.

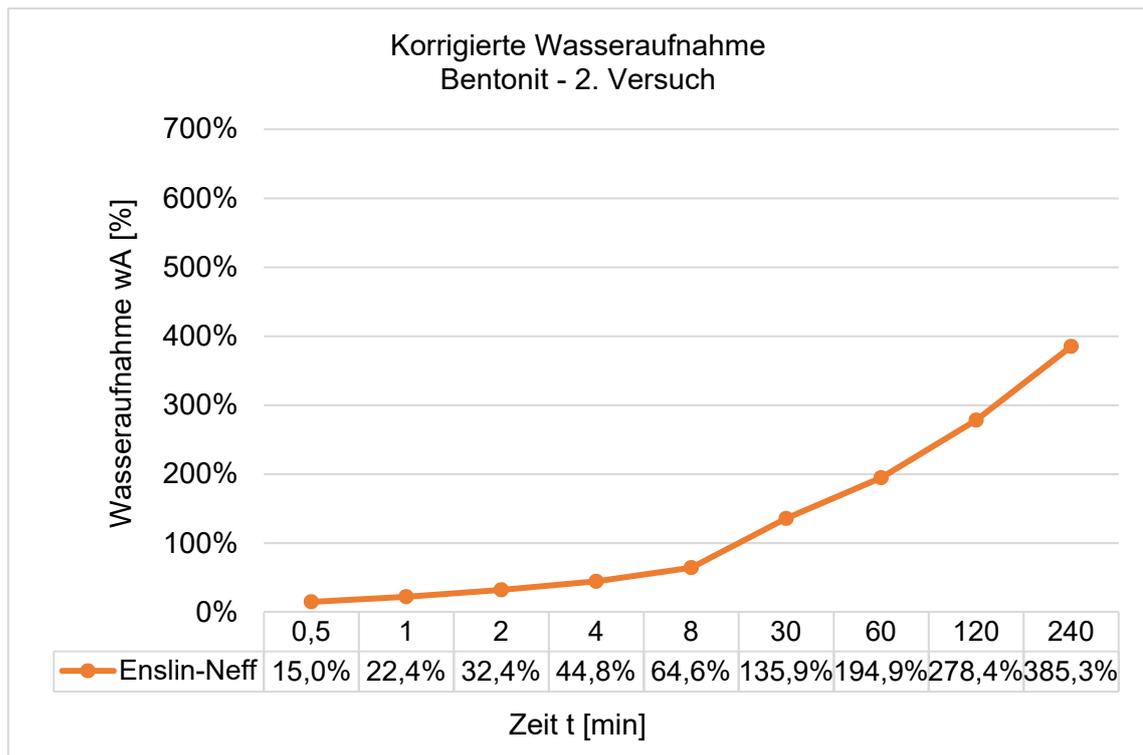
### 3.4.1 Versuche mit pulvrigen Proben

#### 3.4.1.1 Bentonit – Enslin-Neff

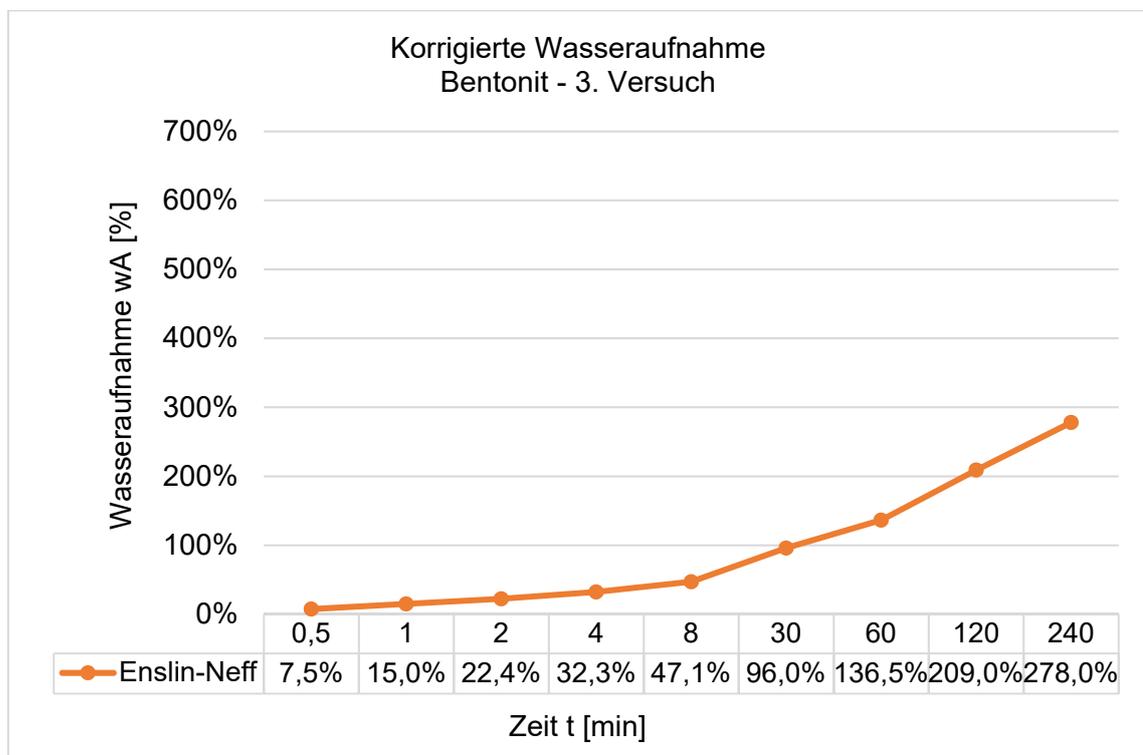
Für Proben mit einem Wasseraufnahmevermögen  $\geq 100\%$ , wie Bentonit, wurde 0,2 g Probenmenge eingesetzt. Der Probenraum wird verschlossen und die Messzeit beginnt, wenn die ersten Teilchen der Probe auf die Filterplatte gefallen sind. Die Ablesung erfolgt für die Zeitintervalle  $t = 0,5$  min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 30 min, 1h, 2h und 4h. (Siehe Anhang – Wasseraufnahme Enslin-Neff – Bentonit)



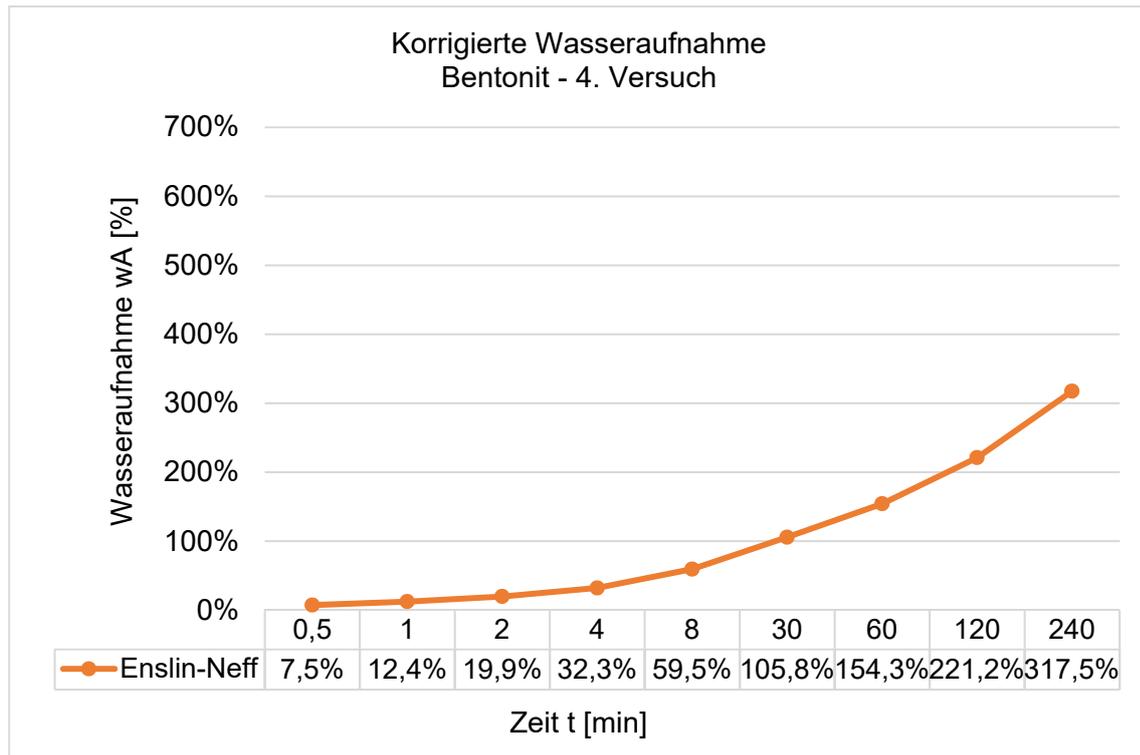
**Abb. 27:** Wasseraufnahme nach Enslin-Neff – Bentonit – 1. Versuch



**Abb. 28:** Wasseraufnahme nach Enslin-Neff – Bentonit – 2. Versuch



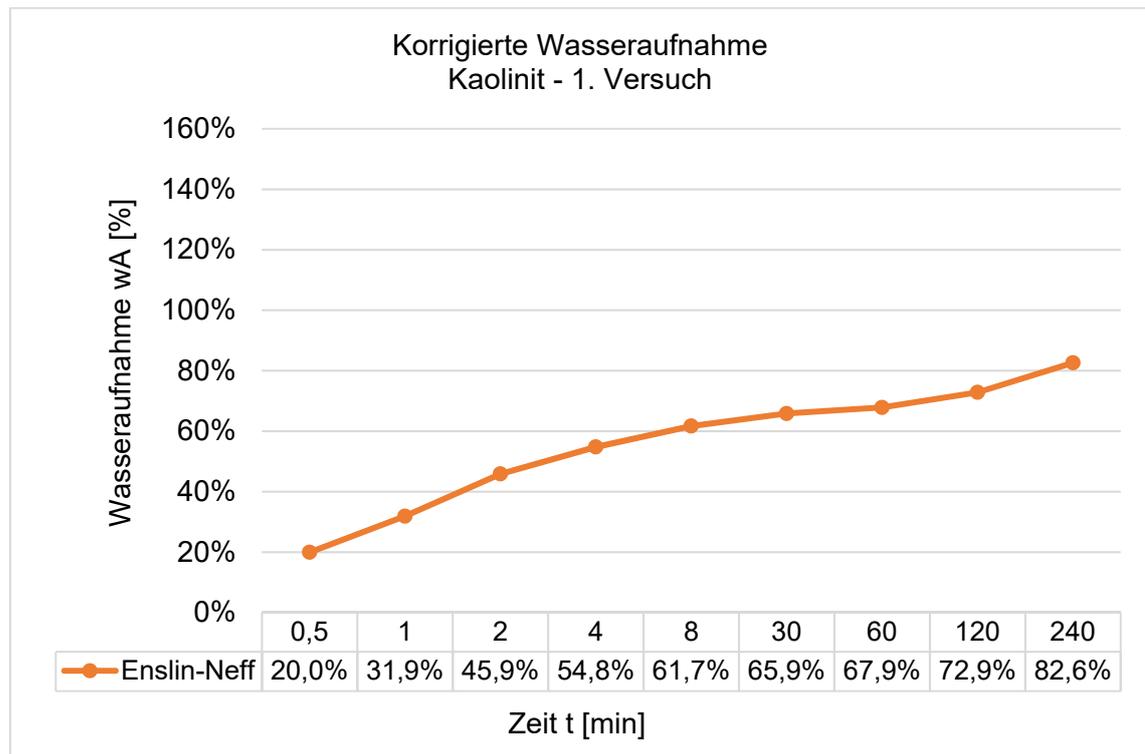
**Abb. 29:** Wasseraufnahme nach Enslin-Neff – Bentonit – 3. Versuch



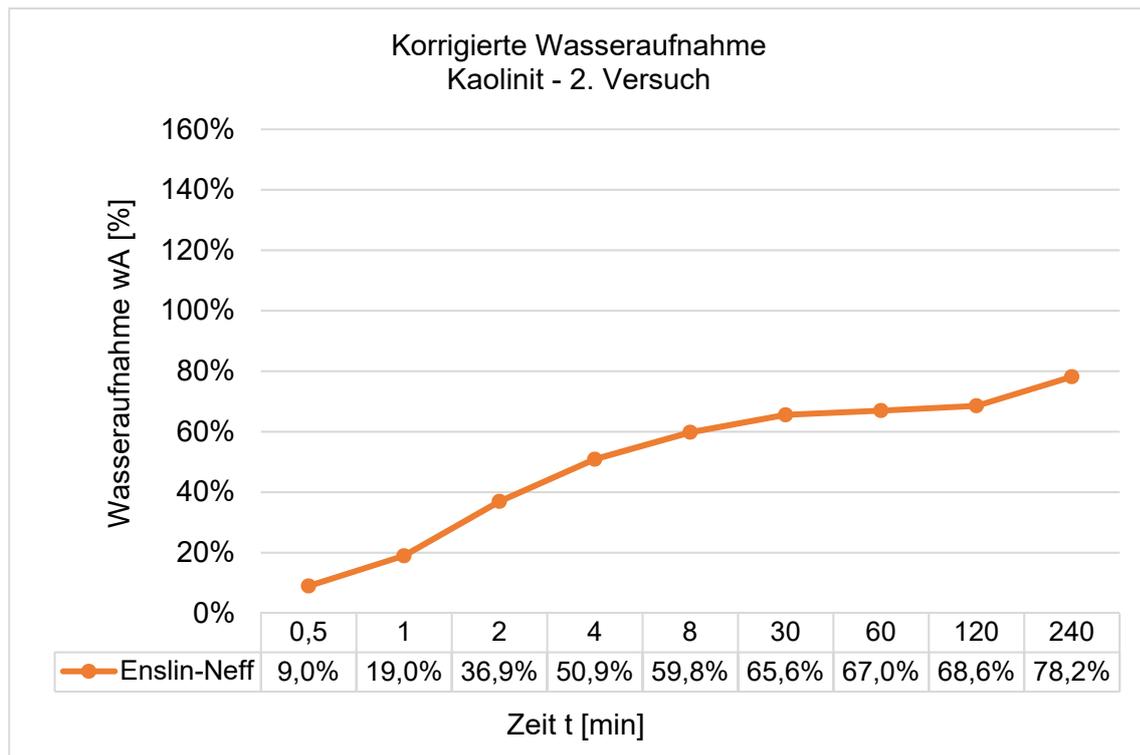
**Abb. 30:** Wasseraufnahme nach Enslin-Neff – Bentonit – 4. Versuch

### 3.4.1.2 Kaolinit – Enslin-Neff

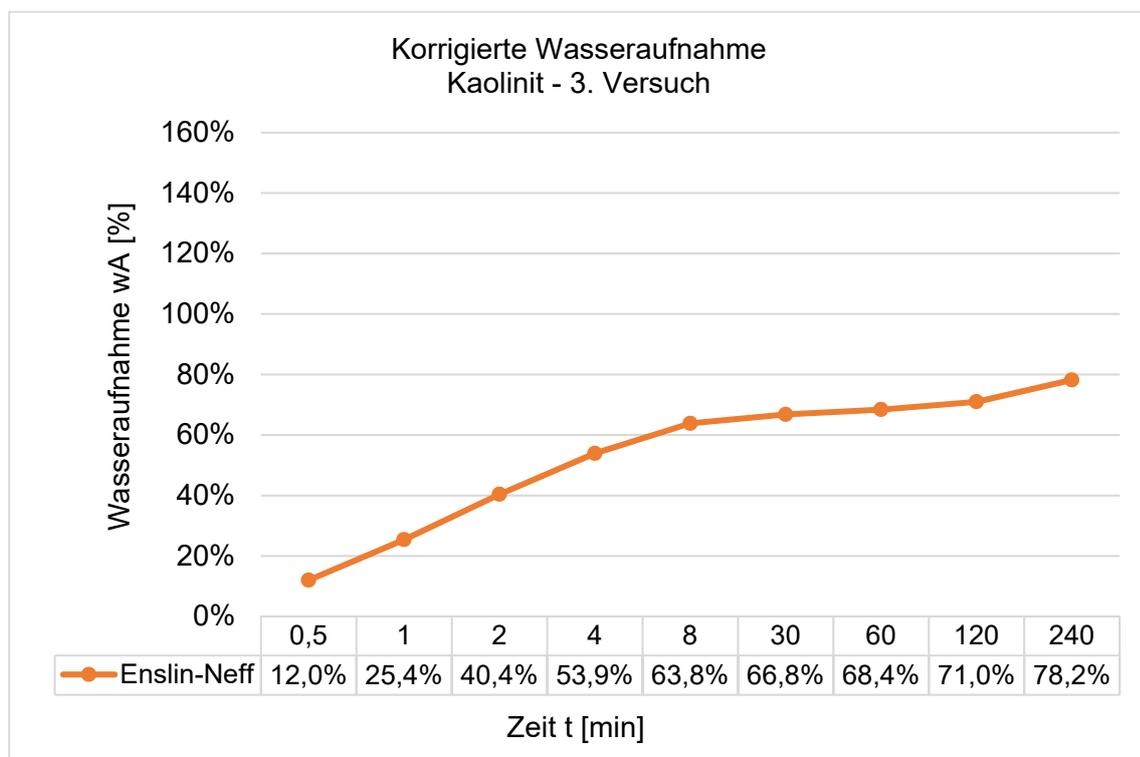
Für Proben mit einem Wasseraufnahmevermögen  $\geq 100\%$ , wie Kaolinit, wurde 0,5 g Probenmenge eingesetzt. Der Probenraum wird verschlossen und die Messzeit beginnt, wenn die ersten Teilchen der Probe auf die Filterplatte gefallen sind. Die Ablesung erfolgt für die Zeitintervalle  $t = 0,5$  min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 30 min, 1h, 2h, 4h und 24h. (Siehe Anhang – Wasseraufnahme Enslin-Neff – Kaolinit)



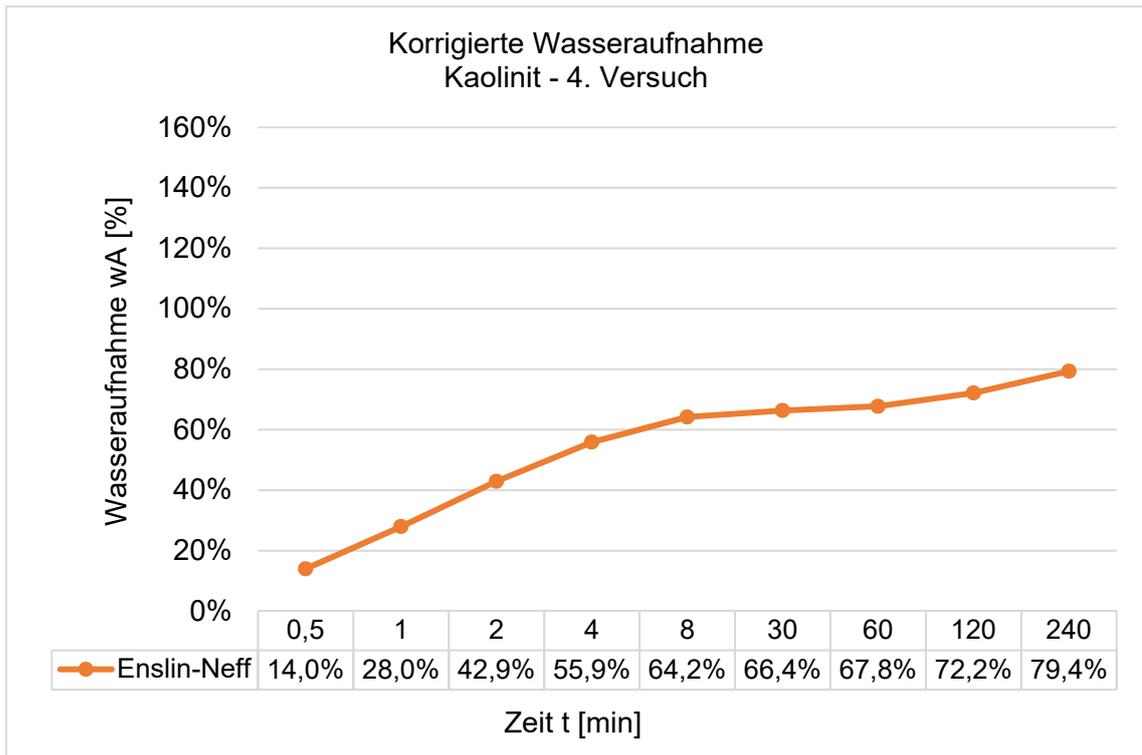
**Abb. 31:** Wasseraufnahme nach Enslin-Neff – Kaolinit – 1. Versuch



**Abb. 32:** Wasseraufnahme nach Enslin-Neff – Kaolinit – 2. Versuch



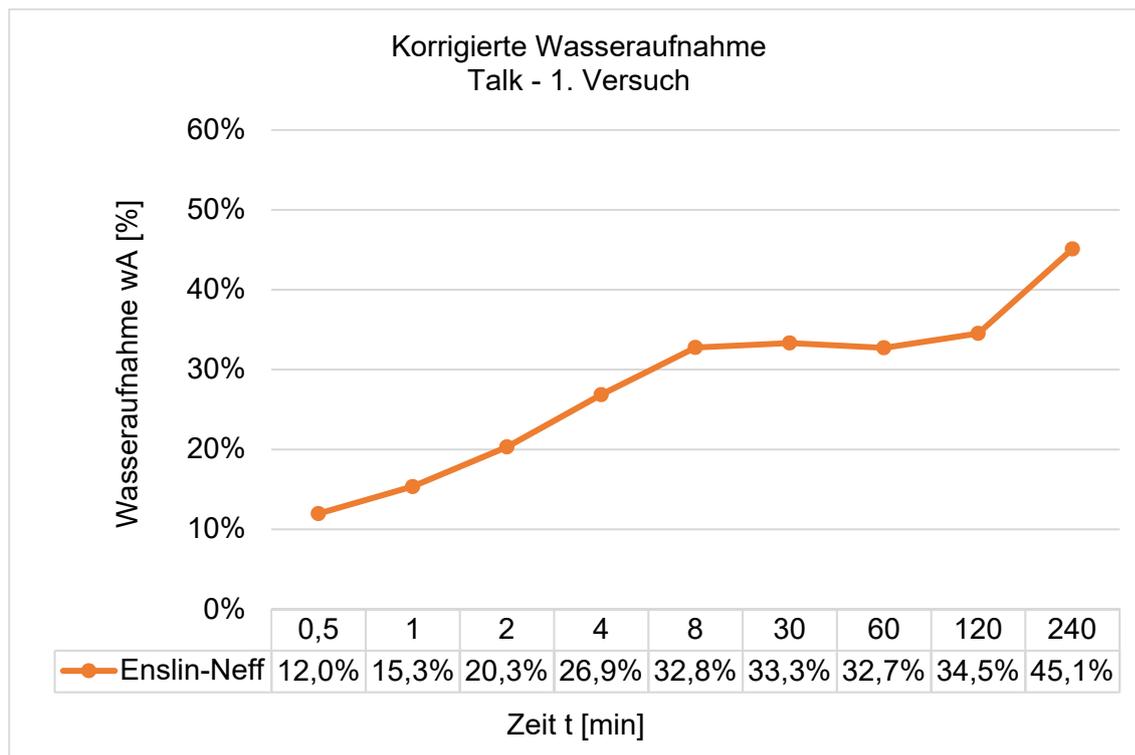
**Abb. 33:** Wasseraufnahme nach Enslin-Neff – Kaolinit – 3. Versuch



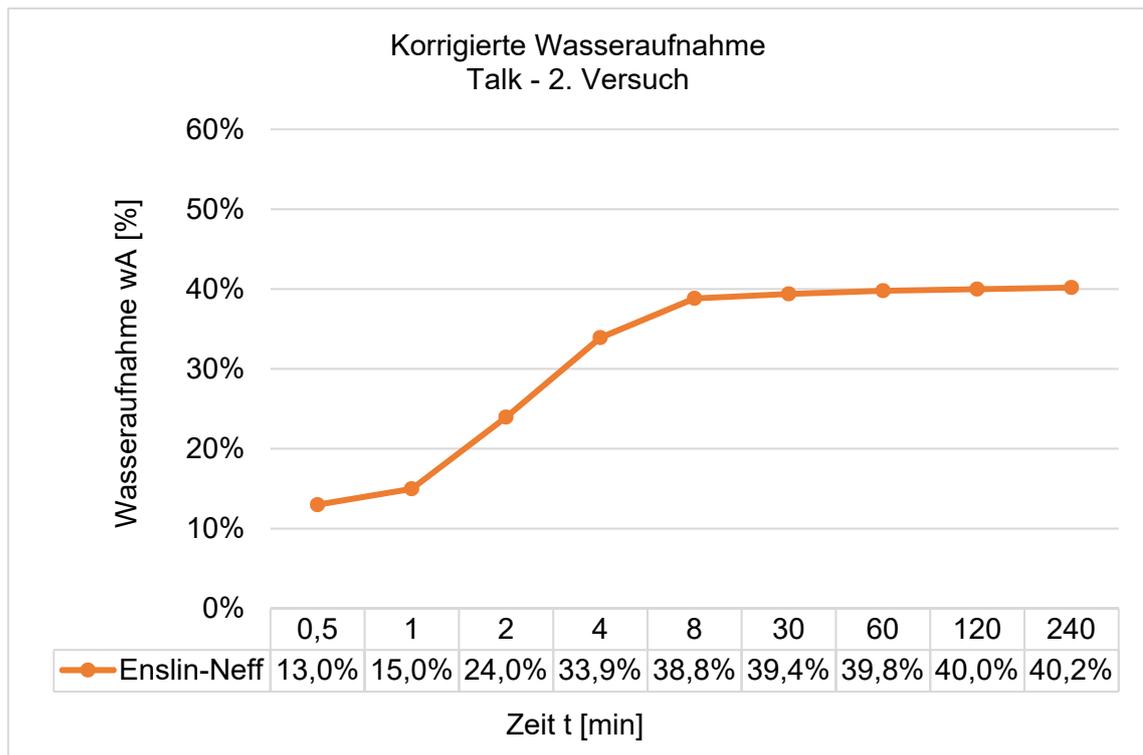
**Abb. 34:** Wasseraufnahme nach Enslin-Neff – Kaolinit – 4. Versuch

### 3.4.1.3 Talk – Enslin-Neff

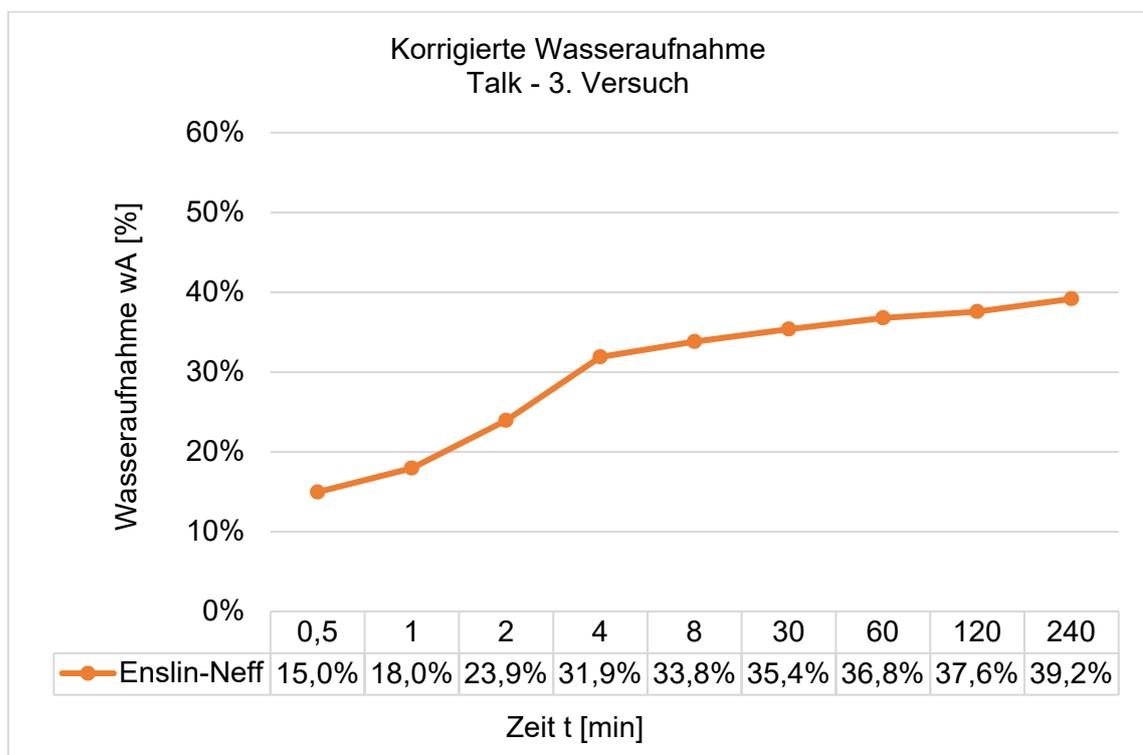
Für Proben mit einem Wasseraufnahmevermögen  $\geq 100\%$ , wie Talk, wurde 0,5 g Probenmenge eingesetzt. Der Probenraum wird verschlossen und die Messzeit beginnt, wenn die ersten Teilchen der Probe auf die Filterplatte gefallen sind. Die Ablesung erfolgt für die Zeitintervalle  $t = 0,5$  min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 30 min, 60 min, 120 min und 240 min. (Siehe Anhang – Wasseraufnahme Enslin-Neff – Talk)



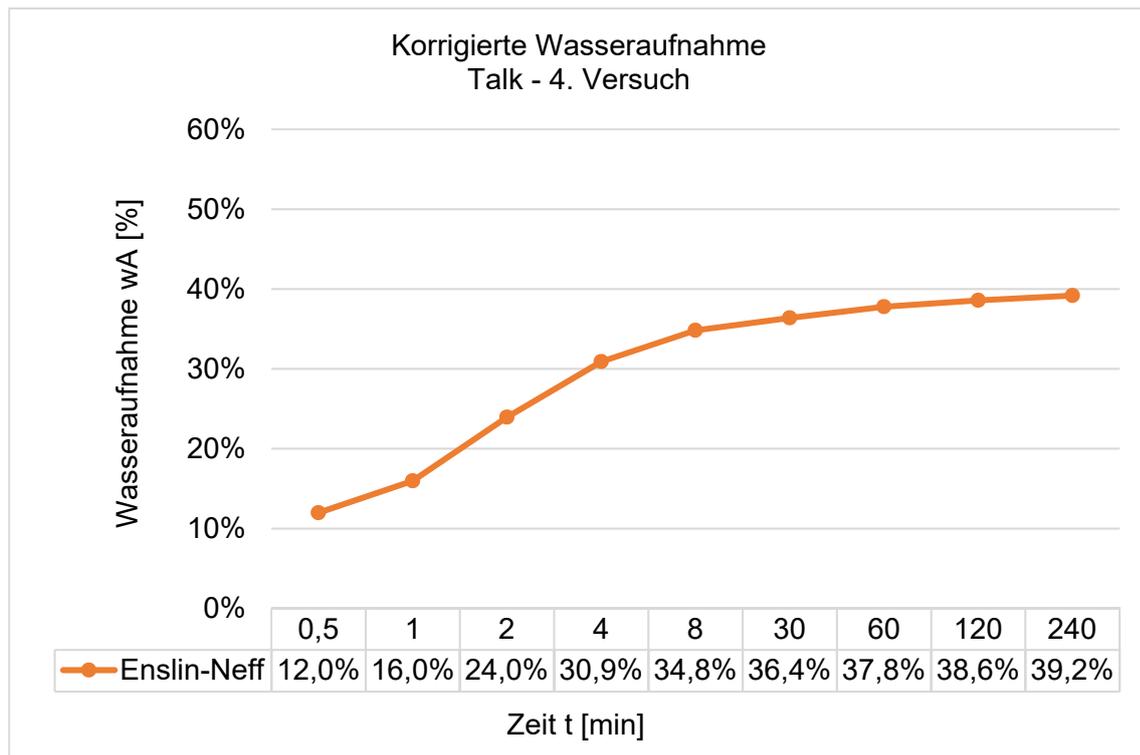
**Abb. 35:** Wasseraufnahme nach Enslin-Neff – Talk – 1. Versuch



**Abb. 36:** Wasseraufnahme nach Enslin-Neff – Talk – 2. Versuch



**Abb. 37:** Wasseraufnahme nach Enslin-Neff – Talk – 3. Versuch



**Abb. 38:** Wasseraufnahme nach Enslin-Neff – Talk – 4. Versuch

### 3.4.2 Versuche mit Presspillen

Das Prinzip von Presspillen ist in KUGLER (2003) erläutert. Dieses besagt, dass bei der Verwendung von pulvrigen Proben in Form von Schüttkegeln, die Schütthöhen und Porenräume der erzeugten Kegel nicht vergleichbar sind und dadurch unterschiedliche kapillare Saugkräfte und damit Wasseraufnahmen induziert werden können. Solche unerwünschten Nebeneffekte können mit Hilfe von standardisierten Presspillen vermindert werden, da diese praktisch einheitliche Ansaughöhen sowie vergleichbare Abmessungen (Volumen und Kontaktfläche zur porösen Fritte) aufweisen.

Ein anderer Grund für die Verwendung der Presspillen ist aus den Kalibrierungsversuchen mit den Fritten unterschiedlicher Enslin-Geräte, beim 15. gesamtösterreichischen Erdbaulaborantetreffen der Arbeitsgruppe „Steinstraßen und Steinmaterial“ der FSV (2016), entstanden. Ziel der Versuche war zu prüfen ob Unterschiede in der Frittdurchlässigkeit auch relevante Auswirkungen auf Messergebnisse mit tonmineralreichen Proben haben. KUGLER hat die Ergebnisse zusammengefasst:

- **Korrelationen reine Frittdurchlässigkeiten / Messwerte mit Proben am Enslin-Neff-Gerät:**
- Nur mehr sehr geringe Streuung der Messwerte von Proben trotz stark unterschiedlicher Frittdurchlässigkeiten
- Nur minimaler positiver Zusammenhang Frittdurchlässigkeiten / Messwerte bei Kaolinit
- Kein erkennbarer Zusammenhang Frittdurchlässigkeiten / Messwerte bei Bentonit
- **Ausschluss von Fritten auf Basis von Durchlässigkeitsversuchen derzeit nicht seriös und auf Basis der geringen Unterschiede bei der Verwendung von Proben vielleicht unnötig**
- **Frage des Zusammenhanges Porenverteilung der Fritte / Korngröße der Probe ungeklärt (Probe könnte Fritte evtl. verstopfen), daher auch aus diesem Grund Presspille dem Pulverkegel vorzuziehen**

Die Herstellung der Presspillen in KUGLER (2003) erfolgte ohne chemische Zusätze mittels hydraulischer Presse und einer Kraft von 130 kN. Dadurch werden bei einer Einwaage von 0,5 g Presspillen von 1 cm Durchmesser und etwa 1,5 – 2 mm Höhe erzeugt.

Für die Versuche in dieser Arbeit wurde eine hydraulische Presse mit einer Kraft von 60 kN verwendet, um die Konditionen für Routineversuche besser abzubilden. Als Presswerkzeug wurde ein, von der Firma Klement für die TU Graz angefertigtes Werkzeug, mit einem Durchmesser von 1 cm, verwendet. (Abb. 39)



**Abb. 39:** Presswerkzeug TU Graz –von Firma Klement hergestellt

Die Presspillen wurden mittels Pinzette in den Trichter eingebracht.

Alternativ können zur Presspillenherstellung Bindemittel wie Wachs oder Mowiol angesetzt werden, um ein besserer Zusammenhalt der pulvrigen Probe zu gewährleisten und die Verwendung gröberer Fraktionen zu ermöglichen.

Es wird empfohlen, vor jedem Versuch, mindestens eine Pille im Voraus zu pressen, um eine realistische Schätzung des Materialverlustes zu ermitteln.

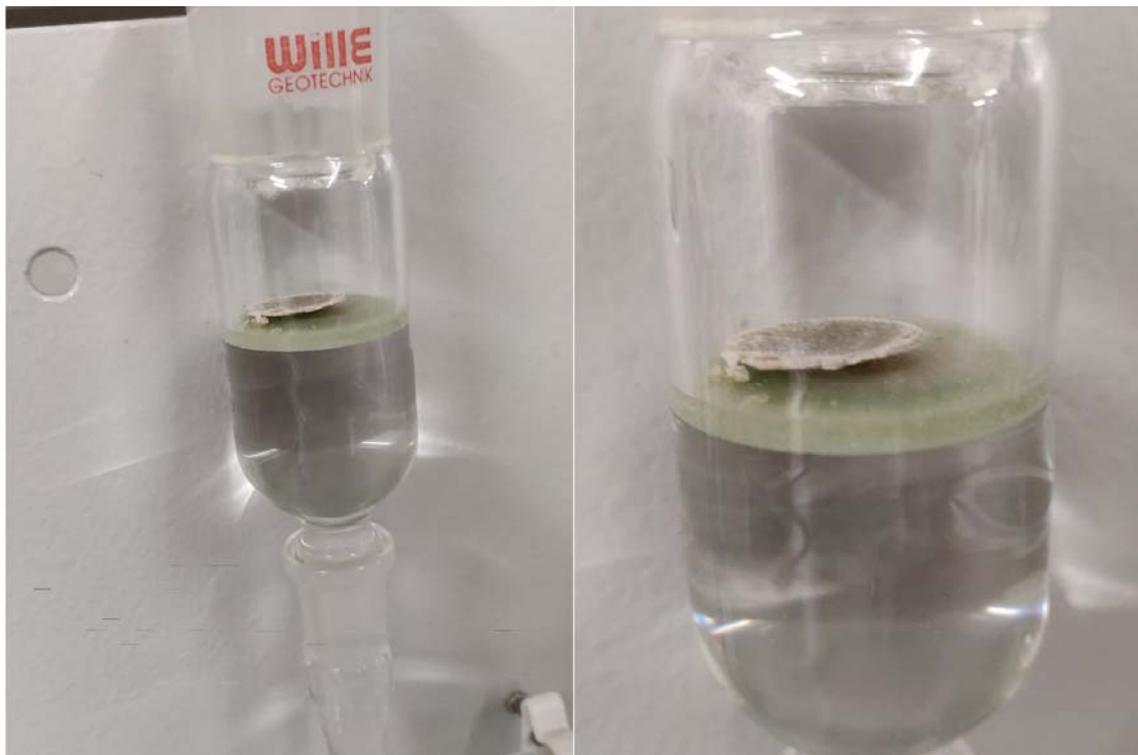
### 3.4.2.1 Bentonit – Enslin-Neff

Für Proben mit einem Wasseraufnahmevermögen  $\geq 100\%$ , wie Bentonit, wurde 0,2 g Probenmenge eingesetzt. Der Probenraum wird verschlossen und die Messzeit beginnt, wenn die Pille auf die Filterplatte gelegt wird. Die Ablesung erfolgt für die Zeitintervalle  $t = 0,5$  min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 30 min, 1h, 2h, 4h und 24h. (Siehe Anhang – Wasseraufnahme Presspillen Enslin-Neff – Bentonit).

Aus mehreren Vorversuchen wurde einen Materialverlust von ca. 40-80 g für Bentonit-Pillen ermittelt.

Wie auch die Firma Klement angemerkt hat, sind die Bentonit-Pillen sehr zerbrechlich, selbst wenn die bei 160 kN gepresst wird. Ein Grund dafür ist die geringe Probenmenge beim Bentonit. Diese Problemstellung kann durch Zugabe von Bindemittel oder durch Verwendung eines Presswerkzeugs mit einem kleineren Durchmesser gelöst werden.

Die Verwendung von Presspillen bei Bentonit ist aber immer noch problematisch, weil sich die Pille im Kontakt mit der Feuchtigkeit schüsselt und somit Kontaktfläche verliert. (Abb. 40)



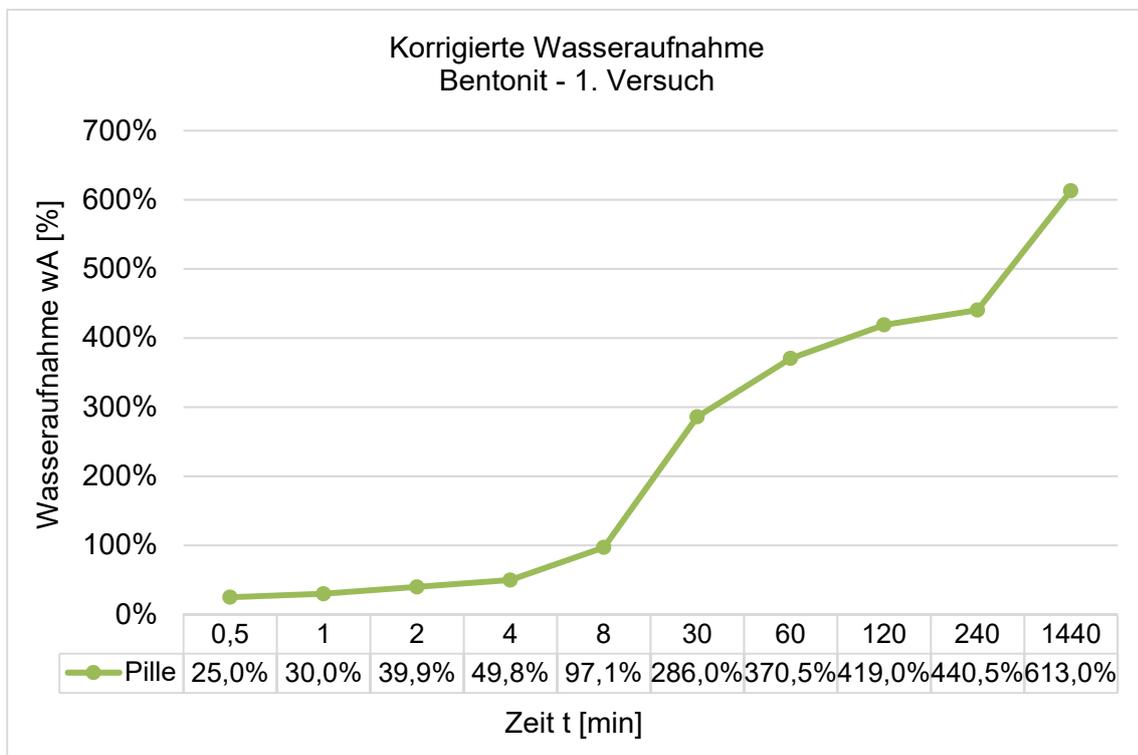
**Abb. 40:** Bentonit Presspille – Kontaktfläche

Trotzdem wurde ein Versuch durch drücken der Pille auf der Fritte durchgeführt, um so viel Kontaktfläche wie möglich zu erzeugen. Nachdem die Probe durchfeuchtet ist beginnt es aufzuquellen und verliert wieder an Kontaktfläche. (Abb. 41)



**Abb. 41:** Durchfeuchtete Bentonit Presspille

Diese Vorgangsweise wird aber nicht empfohlen, da die Probe beim Drücken sich an der Pinzette leicht pickt und die Ergebnisse nicht zuverlässig sind. Im Folgenden ist die Auswertung dieses Versuchs dargestellt:



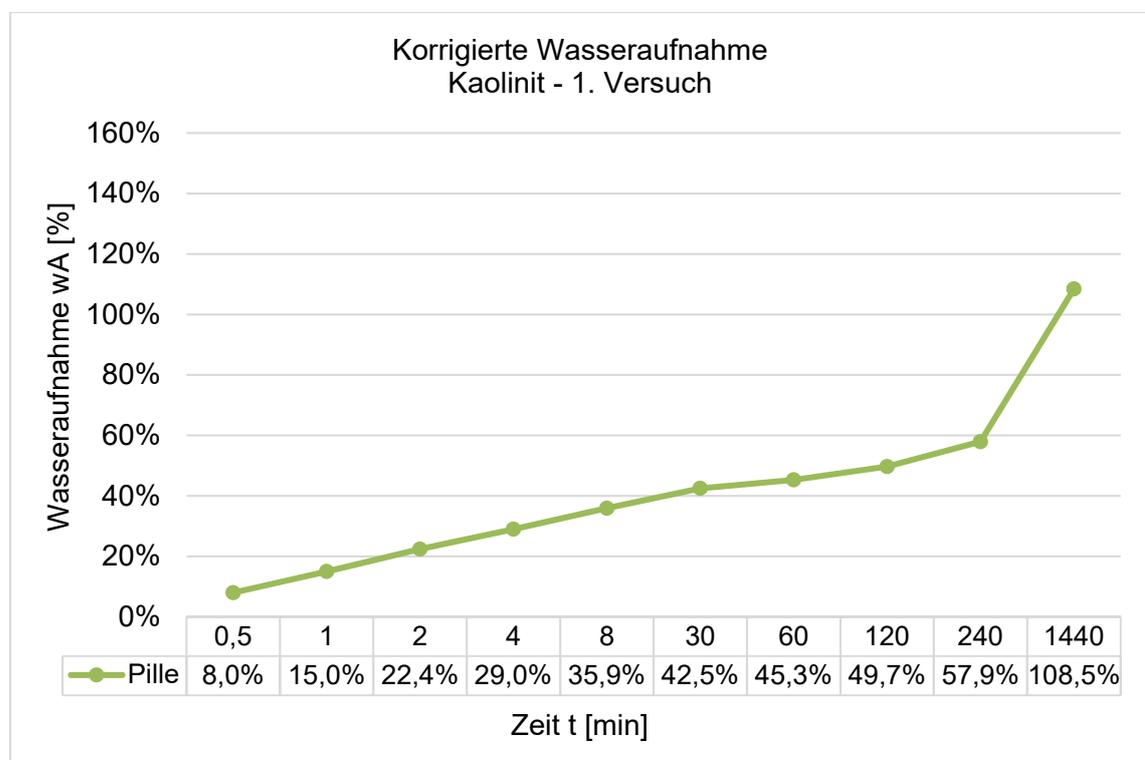
**Abb. 42:** Wasseraufnahme nach Enslin-Neff – Bentonit-Pille – 1. Versuch

### 3.4.2.2 Kaolinit – Enslin-Neff

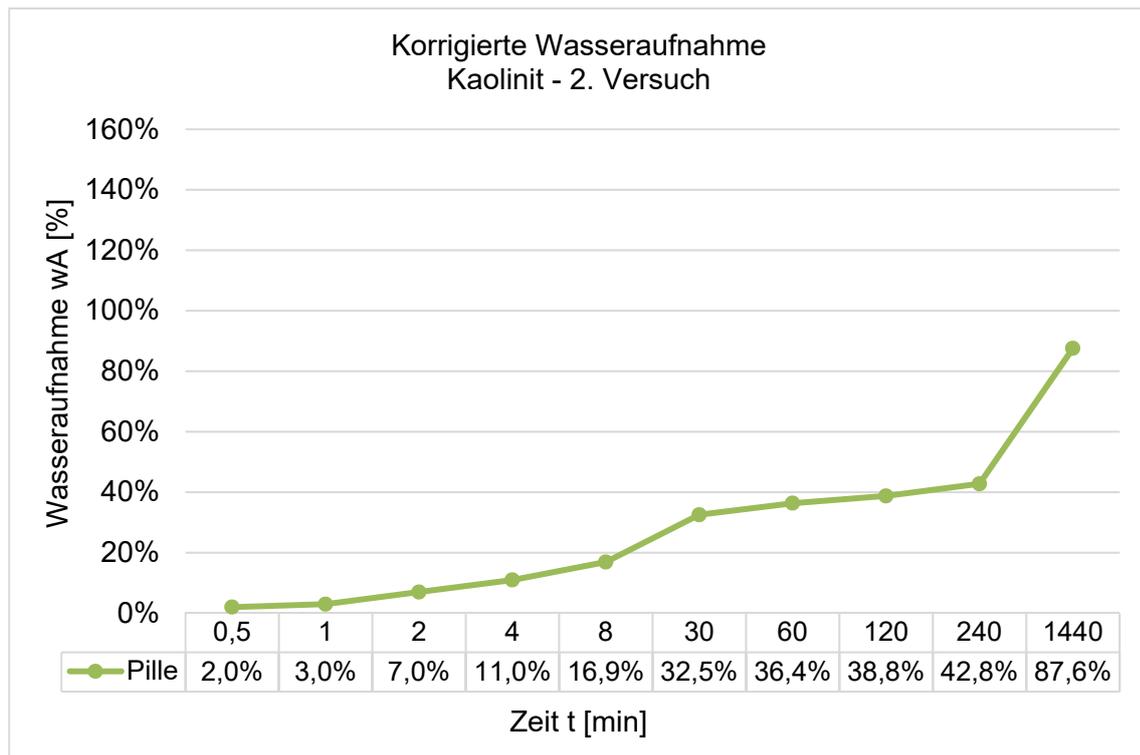
Für Proben mit einem Wasseraufnahmevermögen  $\geq 100\%$ , wie Kaolinit, wurde 0,5 g Probenmenge eingesetzt. Der Probenraum wird verschlossen und die Messzeit beginnt, wenn die Pille auf die Filterplatte gelegt wird. Die Ablesung erfolgt für die Zeitintervalle  $t = 0,5 \text{ min}$ , 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 30 min, 1h, 2h, 4h und 24h. (Siehe Anhang – Wasseraufnahme Enslin-Neff – Kaolinit)

Aus mehreren Vorversuchen wurde einen Materialverlust von ca. 90-130 g für Kaolinit-Pillen ermittelt.

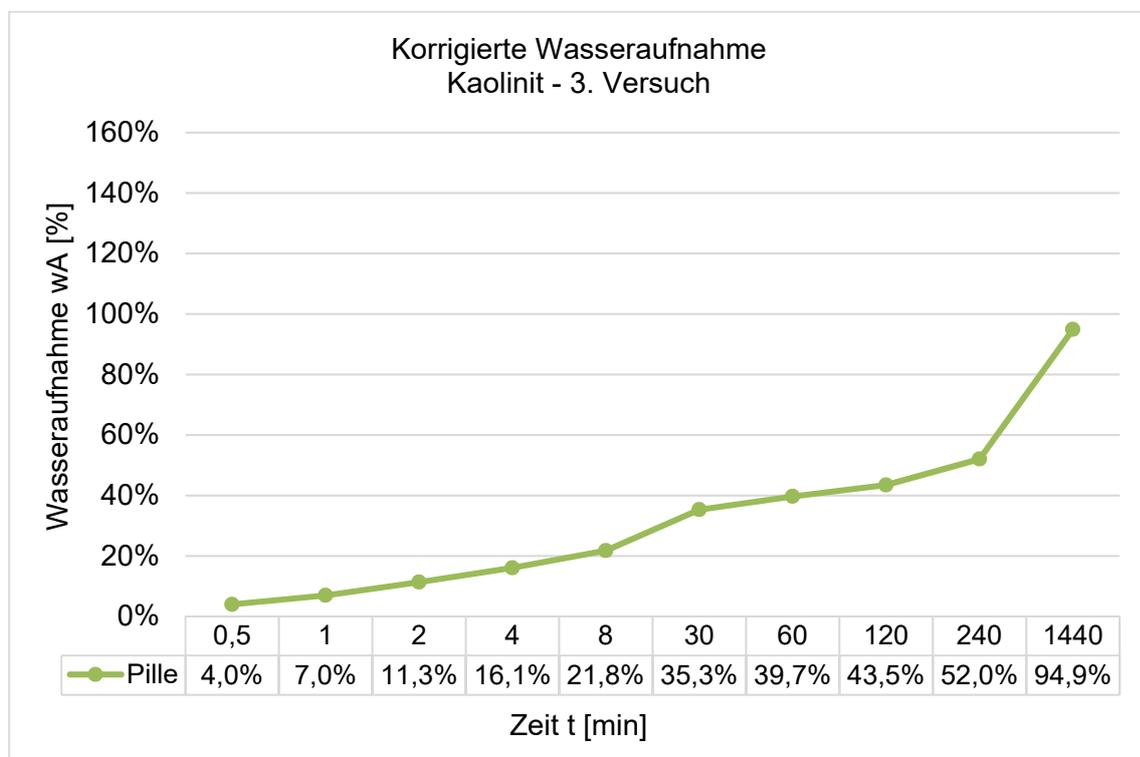
Die Herstellung der Kaolinit-Pillen erfolgt problemlos, sowie auch die Durchführung des Versuches.



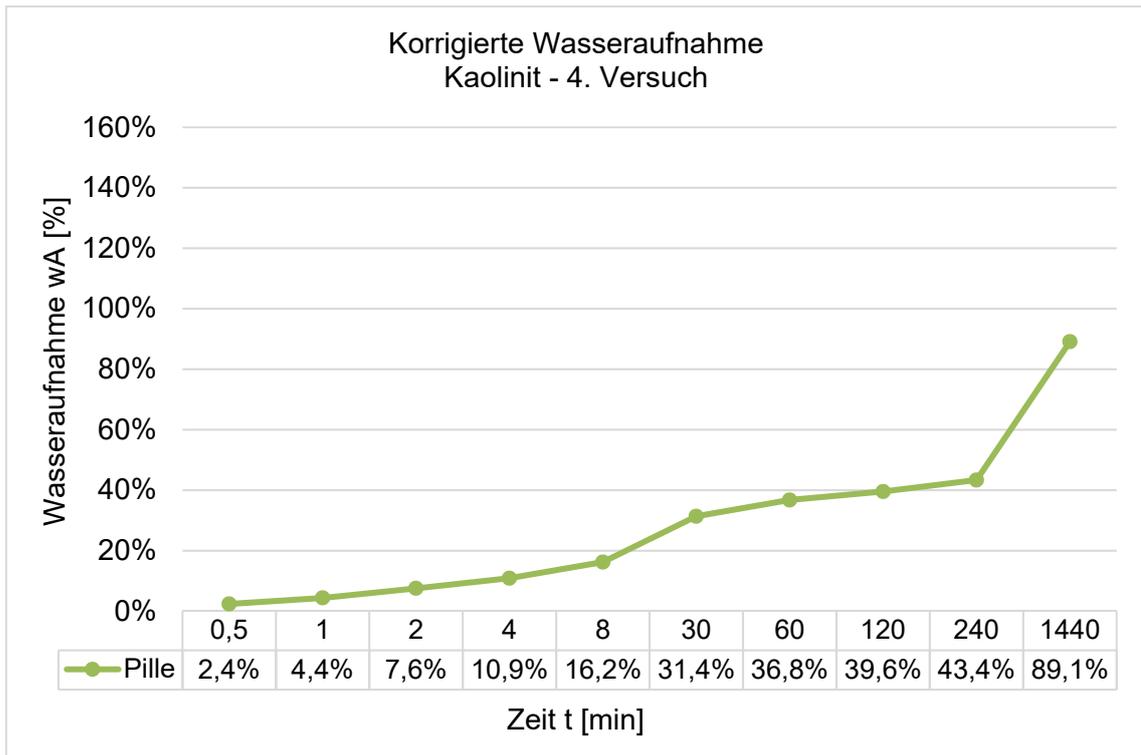
**Abb. 43:** Wasseraufnahme nach Enslin-Neff – Kaolinit-Pille – 1. Versuch



**Abb. 44:** Wasseraufnahme nach Enslin-Neff – Kaolinit-Pille – 2. Versuch



**Abb. 45:** Wasseraufnahme nach Enslin-Neff – Kaolinit-Pille – 3. Versuch



**Abb. 46:** Wasseraufnahme nach Enslin-Neff – Kaolinit-Pille – 4. Versuch

### 3.4.2.3 Talk – Enslin-Neff

Für Proben mit einem Wasseraufnahmevermögen  $\geq 100\%$ , wie Kaolinit, wurde 0,5 g Probenmenge eingesetzt. Der Probenraum wird verschlossen und die Messzeit beginnt, wenn die Pille auf die Filterplatte gelegt wird. Die Ablesung erfolgt für die Zeitintervalle  $t = 0,5 \text{ min}$ ,  $1 \text{ min}$ ,  $2 \text{ min}$ ,  $4 \text{ min}$ ,  $8 \text{ min}$ ,  $30 \text{ min}$ ,  $1 \text{ h}$ ,  $2 \text{ h}$ ,  $4 \text{ h}$  und  $24 \text{ h}$ .

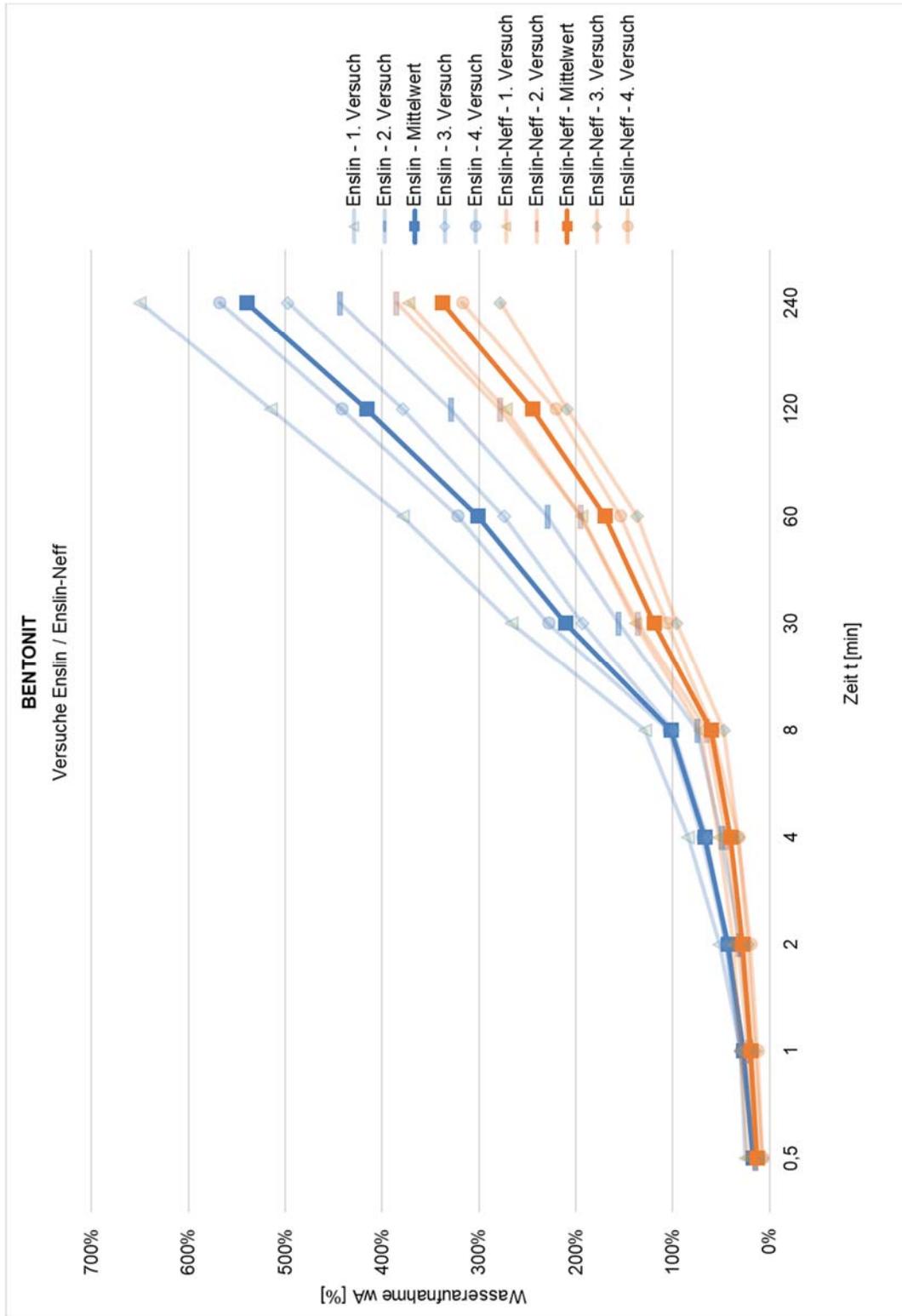
Aufgrund der geringen Kohäsion ist die Herstellung der Talk-Pillen sehr problematisch. Talk lässt sich, bei einer Kraft von 60 kN, ohne Bindemittel, nicht zusammenpressen. Selbst wenn die Probe mit 0,5 g Mowiol eingemischt wird, ist die Herstellung der Pille nicht möglich. Erst nach mehreren Versuchen, bei Zugabe von 1,0 g Mowiol, ist die Herstellung einer Talk-Pille gelungen. (Abb. 47)



**Abb. 47:** Talk Presspille – Zugabe von 1,0g Mowiol

Wegen der hohen Zugabe von Bindemittel (2-fach der Trockenmasse) und der spröden Pille, war die Durchführung der Versuche mit Talk-Pillen nicht möglich.

## 4 Zusammenstellung der Ergebnisse



**Abb. 48:** Bentonit – Vergleich der Versuche Enslin / Enslin -Neff

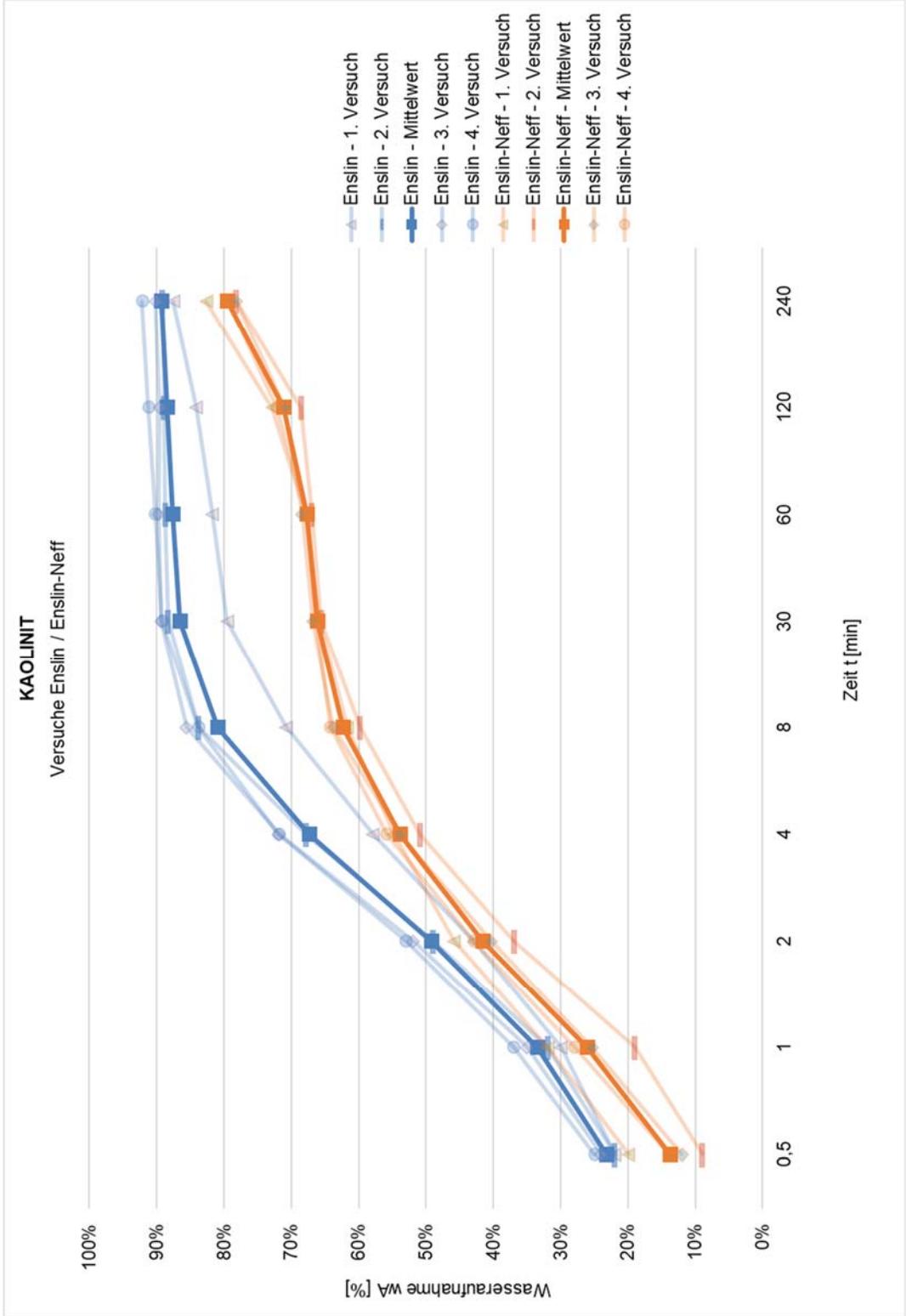
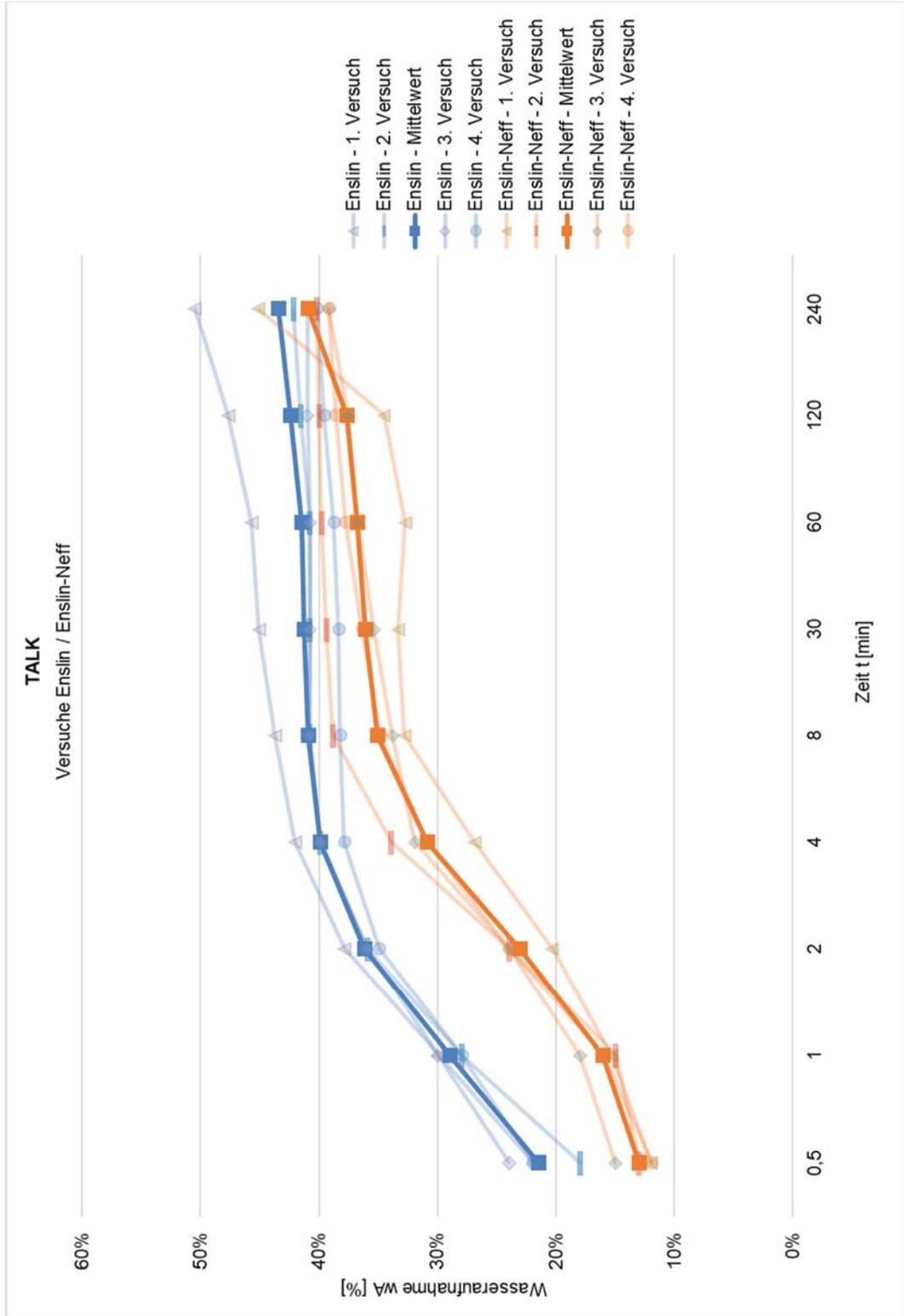


Abb. 49: Kaolinit – Vergleich der Versuche Ensin / Ensin -Neff



**Abb. 50:** Talk – Vergleich der Versuche Enslin / Enslin -Neff

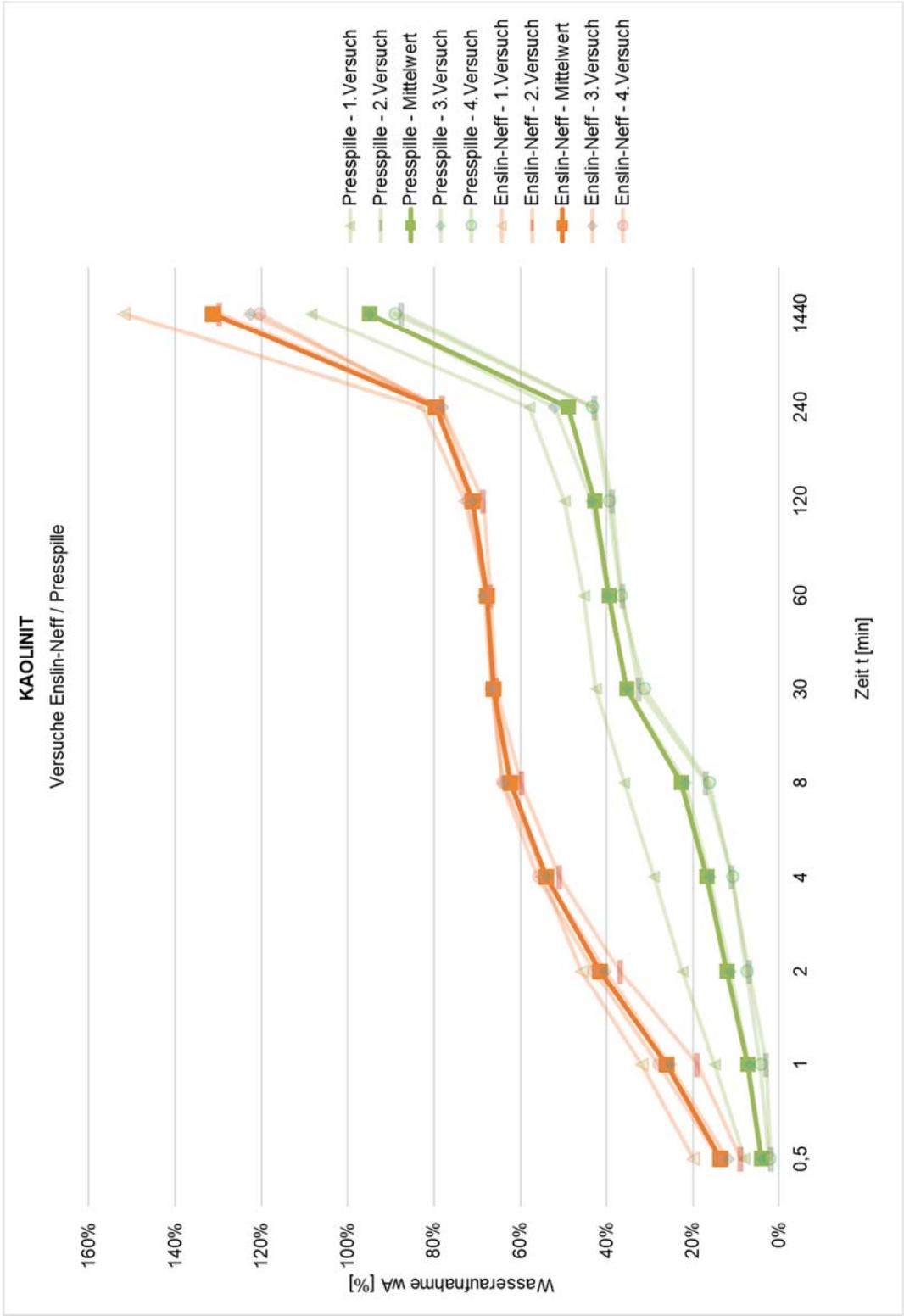


Abb. 51: Kaolinit – Vergleich der Versuche Enslin -Neff / Presspillen

In den Abbildungen 48-50 sind alle Enslin und Enslin-Neff Versuche je Bodenprobe gegenübergestellt. In alle drei Diagrammen sind höhere Werte bei dem Enslin-Gerät festzustellen (ca. 10-20% beim Talk und Kaolinit bis ca. 55% beim Bentonit), die wie in KUGLER (2003) erwähnt wird, auf die erhöhte Kapillarität der Proben zurückzuführen ist. Eine bessere Reproduzierbarkeit der Versuche ist bei dem Enslin-Neff-Gerät feststellbar, da die Streuung der Werte geringer ist und die Verläufe der Kurven aneinander mehr ähneln.

In der Abbildung 51 sind die pulvrigen Proben und die Presspillen Versuche für Kaolinit gegenübergestellt. In KUGLER (2003) wird berichtet, dass auf Grund geringerer Porenräume und Kapillarität, sich niedrigere Werte bei Presspillen zeigen und dass eine geringe Streuung und gute Korrelation mit den Ergebnissen ähnlicher Versuchen auftreten. Dies ist auch in der Abbildung 51 zu sehen, aber weil die Durchführung der Versuche mit Talk und Bentonit nicht möglich bzw. problematisch waren, kann, für Routineversuche, diese Aussage nicht bestätigt werden.

Die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen an gleichem Enslin-Neff Gerät ist unter Anwendung der Methode Enslin-Neff<sub>mod</sub> sehr hoch. Die Durchführung einer Verdunstungskorrektur ist von grundsätzlicher Bedeutung für die Aussagekraft der Ergebnisse der Wasseraufnahmeversuche. Bei der Ermittlung der Verdunstung über gemittelte Leermessungen wurden die Wasserverbrauchswerte der untersuchten Proben um einen Fixbetrag reduziert. Dies kann eine relative Abweichung der Wasseraufnahme von einigen M.-% bedeuten. (Kugler, 2003)

Die, in Kapitel 3.2 angeführte, probenspezifische Verdunstungskorrektur verfügt über ein besseres und genaueres Abbruchkriterium und ermöglicht eine 50% Zeitersparnis, weil das Gerät das für die Leermessung notwendig ist, gleichzeitig für eine andere Versuchsdurchführung verwendet werden kann.

Obwohl die Presspillen niedrigere Werte aufzeigen und eine geringe Streuung und gute Korrelation mit den Ergebnissen ähnlicher Versuchen aufweisen, sind Routineversuche aufgrund der problematischen Probenaufbereitung beim Talk und dem schlechten Verhalten bei Bentonit nicht empfohlen.

Die Enslin-Neff<sub>mod</sub> Methode bringt wesentliche Verbesserungen zu den Ergebnissen der Wasseraufnahmeversuche und sollte für eine aktuelle RVS herangezogen werden. In KUGLER (2002) wurden die wichtigsten Punkte zusammengefasst:

- **Geräte:**
- Gerät nach Enslin, verbessert nach Neff
  
- **Vorbereitung des Gerätes:**
- „Innenflächen der einzelnen Glasgeräte müssen sauber sein“, das Glasmessrohr ist „zu reinigen und mehrfach mit entmineralisiertem Wasser durchzuspülen“

- Glasrohre mit entlüftetem, entmineralisiertem Wasser blasenfrei auffüllen und Kegelschliffverbindungen dicht verbinden (Wasserspiegel im Glasaufsatzrohr nun auf Höhe der Glasfilterplattenoberfläche)
- **Probenmaterial:**
  - $< 20 \mu\text{m} / < 2 \mu\text{m}$
- **Probenvorbereitung:**
  - Nasssiebung  $< 20 \mu\text{m}$
  - Standardmäßige Trocknung bei  $60^\circ\text{C}$  (Verhältnissen in-situ eher entsprechend als  $105^\circ\text{C}$ ) bis Massenkonstanz, dadurch Schonung quellfähiger Phasen
  - kein Zerreiben, Belassen der nach natürlichen oder nach Proctorverdichtung vorliegenden Kornverteilung.
  - Bezugstemperatur  $20^\circ\text{C}$  wegen Eichung der Skalierung anzustreben, Schwankung der Raumtemperatur sollte wenige  $^\circ\text{C}$  nicht überschreiten. Betreten des Raumes, wenn möglich nur zu Ablesezeiten
  - Einwaage bei Wasseraufnahmevermögen  $< 100\%$ : 0,5g
  - Einwaage bei Wasseraufnahmevermögen  $\geq 100\%$ : 0,2g
  - Sofortiges Schließen ist besser zu standardisieren und daher sinnvoller
  - Beginn der Messzeit, wenn die ersten Bodenteilchen auf die Filterplatte gefallen sind.
  - Ablesen wie DIN; Ablesezeiten: 0,5 min, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 min, 1x zw. 12-16 min, 30, 45, 60 min, dann stündlich bis zumindest 7-9 Std.
  - Abbruchkriterium: eindeutige Feststellung der Linearität des Wasserverbrauches durch mind. die letzten 3 Punkte der Kurve. Bei nicht stark adsorptiven Materialien kann der Versuch nach etwa 7-9 Std. abgebrochen werden (bei paralleler Dateneingabe kann der Kurvenverlauf verfolgt und erkannt werden, ob das Abbruchkriterium bereits früher erreicht wird)
  - Kein parallel laufendes Gerät zur Bestimmung der Verdunstung notwendig.
- **Auswertung:**
  - Wasseraufnahme [Masse-%] =  $\frac{\text{Masse aufgesaugtes Wasser [g]}}{\text{Trockenmasse der Probe [g]}}$
- **Darstellung:**
  - Die Wassergehalte werden auch in einem Diagramm in Abhängigkeit der Versuchszeit dargestellt; auf der Ordinate: Linearer Wassergehalt, auf der Abszisse: Lineare Zeit; Darstellung des um die Verdunstung korrigierten Kurvenverlaufes, bis dieser die Linearität erreicht. Der Punkt des Beginns der Linearität stellt gleichzeitig die maximale Wasseraufnahme dar.

## 5 Schlussfolgerung und Ausblick

Als Wasseraufnahmevermögen bezeichnet man die Eigenschaft des getrockneten Bodens Wasser aufzusaugen. Die Wasseraufnahme charakterisiert den Tongehalt und findet in vielen Bereichen, wie z.B. Straßenbau, Geotechnik, Spezialtiefbau, u.v.a. Anwendung, wird jedoch vor allem im Rahmen von Eignungsprüfungen als Dichtungsmittel für feinkörnige Böden bestimmt.

Aufgrund unterschiedlicher Normen in Österreich (RVS 11.06.26, 1987) und Deutschland (DIN 18132, 1995) hinsichtlich der anzuwendenden Geräte und Durchführungsbestimmungen kann es je nach Norm zu großen Unterschieden im Ergebnis kommen. Aus der Praxis ist allerdings bekannt, dass die Versuchsdurchführung Unsicherheiten hinsichtlich Aussagekraft, Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit verschiedener Geräte und Labor besitzt. Mittlerweile sind schon einige Verbesserungen bei den Geräten und Prüfverfahren erbracht worden. Die RVS 11.06.26:1987 verweist immer noch auf den Enslin-Gerät, während der DIN 18132:1995 schon auf das Enslin-Gerät, verbessert nach Neff, verweist.

Die Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene – Verkehr (FSV) ist schon seit einiger Zeit interessiert eine moderne und wissenschaftliche abgesicherte RVS für die Wasseraufnahme herauszubringen.

In dieser Arbeit wurde eine neue Vorgangsweise (Enslin-Neff<sub>mod</sub>), sowie eine neue Probenaufbereitung (Presspillen) untersucht.

Die Enslin-Neff<sub>mod</sub> Methode ist für eine aktuelle RVS zu empfehlen, da diese durch die Verdunstungskorrektur eine höhere Reproduzierbarkeit mit genaueren Ergebnissen der Wasseraufnahmeversuche gewährleistet.

Die Presspillen sind trotz dem Vorteil, eine einheitliche Ansaughöhen sowie vergleichbare Abmessungen (Volumen und Kontaktfläche zur porösen Fritte) aufzuweisen, für Routineversuche nicht empfohlen, da die Probenaufbereitung noch problematisch ist. Eine Standardisierung bzw. Verbesserung der Presspillen wäre für die Zukunft trotzdem interessant, da die Ergebnisse vielversprechend sind.

## **6 Anhang**

## **6.1 Versuche mit Bentonit**



<b>Wasseraufnahme nach Enslin-Neff</b>											
<b>Pulvrige Probe: Bentonit</b>											
Veruchsnr.:		1		2		3		4		5	
Masse [g]:	Zeit [min]	Masse [g]:	Zeit [min]	Masse [g]:	Zeit [min]	Masse [g]:	Zeit [min]	Masse [g]:	Zeit [min]	Masse [g]:	Zeit [min]
0,5	0,045	0,030	0,5	0,030	0,015	0,015	0,5	0,015	0,5	0,015	0,015
1,0	0,060	0,045	1,0	0,045	0,030	0,030	1,0	0,030	1,0	0,025	0,025
2,0	0,076	0,065	2,0	0,065	0,045	0,045	2,0	0,045	2,0	0,040	0,040
4,0	0,105	0,090	4,0	0,090	0,065	0,065	4,0	0,065	4,0	0,065	0,065
8,0	0,145	0,130	8,0	0,130	0,095	0,095	8,0	0,095	8,0	0,120	0,120
30,0	0,282	0,275	30,0	0,275	0,195	0,195	30,0	0,195	30,0	0,215	0,215
60,0	0,397	0,396	60,0	0,396	0,279	0,279	60,0	0,279	60,0	0,315	0,315
120,0	0,560	0,569	120,0	0,569	0,430	0,430	120,0	0,430	120,0	0,455	0,455
240,0	0,773	0,795	240,0	0,795	0,580	0,580	240,0	0,580	240,0	0,660	0,660
1440,0	1,520	1,617	1440,0	1,617	1,330	1,330	1440,0	1,330	1440,0	1,400	1,400

<b>Wasseraufnahme nach Enslin-Neff</b>									
<b>Presspille: Bentonit</b>									
Veruchsnr.:		1		2		3		4	
Masse [g]:	0,2006	Masse [g]:	-						
Zeit [min]	0,5	Zeit [min]	0,5	Zeit [min]	0,5	Zeit [min]	0,5	Zeit [min]	0,5
Wasserverbrauch [ml]	0,050	Wasserverbrauch [ml]	-						
1,0	0,060	1,0	-	1,0	-	1,0	-	1,0	-
2,0	0,080	2,0	-	2,0	-	2,0	-	2,0	-
4,0	0,100	4,0	-	4,0	-	4,0	-	4,0	-
8,0	0,195	8,0	-	8,0	-	8,0	-	8,0	-
30,0	0,575	30,0	-	30,0	-	30,0	-	30,0	-
60,0	0,747	60,0	-	60,0	-	60,0	-	60,0	-
120,0	0,850	120,0	-	120,0	-	120,0	-	120,0	-
240,0	0,905	240,0	-	240,0	-	240,0	-	240,0	-
1440,0	1,370	1440,0	-	1440,0	-	1440,0	-	1440,0	-

## **6.2 Versuche mit Kaolinit**



<b>Wasseraufnahme nach Enslin-Neff</b>											
<b>Pulvrige Probe: Kaolinit</b>											
Veruchsnr.:		1		2		3		4		5	
Masse [g]:	Zeit [min]	Masse [g]:	Zeit [min]	Masse [g]:	Zeit [min]	Masse [g]:	Zeit [min]	Masse [g]:	Zeit [min]	Masse [g]:	Zeit [min]
0,5	0,100	0,5	0,045	0,5	0,060	0,5	0,070	0,5	0,070	0,5	0,070
1,0	0,160	1,0	0,095	1,0	0,127	1,0	0,140	1,0	0,140	1,0	0,140
2,0	0,230	2,0	0,185	2,0	0,202	2,0	0,215	2,0	0,215	2,0	0,215
4,0	0,275	4,0	0,255	4,0	0,270	4,0	0,280	4,0	0,280	4,0	0,280
8,0	0,310	8,0	0,300	8,0	0,320	8,0	0,322	8,0	0,322	8,0	0,322
30,0	0,333	30,0	0,331	30,0	0,337	30,0	0,335	30,0	0,335	30,0	0,335
60,0	0,346	60,0	0,341	60,0	0,348	60,0	0,345	60,0	0,345	60,0	0,345
120,0	0,377	120,0	0,355	120,0	0,367	120,0	0,373	120,0	0,373	120,0	0,373
240,0	0,438	240,0	0,415	240,0	0,415	240,0	0,421	240,0	0,421	240,0	0,421
1440,0	0,905	1440,0	0,793	1440,0	0,757	1440,0	0,747	1440,0	0,747	1440,0	0,747

<b>Wasseraufnahme nach Enslin-Neff</b>									
<b>Presspille: Kaolinit</b>									
Veruchsnr.:		1		2		3		4	
Masse [g]:	Zeit [min]	Masse [g]:	Wasserverbrauch [ml]						
0,5		0,4988	0,040	0,4978	0,010	0,5016	0,020	0,5005	0,012
1,0		0,075	0,015	0,015	0,015	0,035	0,035	0,022	0,022
2,0		0,112	0,035	0,035	0,035	0,057	0,057	0,038	0,038
4,0		0,145	0,055	0,055	0,055	0,081	0,081	0,055	0,055
8,0		0,180	0,085	0,085	0,085	0,110	0,110	0,082	0,082
30,0		0,215	0,165	0,165	0,165	0,180	0,180	0,160	0,160
60,0		0,232	0,187	0,187	0,187	0,205	0,205	0,190	0,190
120,0		0,260	0,205	0,205	0,205	0,230	0,230	0,210	0,210
240,0		0,313	0,237	0,237	0,237	0,285	0,285	0,241	0,241
1440,0		0,685	0,580	0,580	0,580	0,620	0,620	0,590	0,590

### **6.3 Versuche mit Talk**



<b>Wasseraufnahme nach Enslin-Neff</b>											
<b>Pulvrige Probe: Talk</b>											
Veruchsnr.:		1		2		3		4		5	
Masse [g]:	Zeit [min]	Masse [g]:	Zeit [min]	Masse [g]:	Zeit [min]	Masse [g]:	Zeit [min]	Masse [g]:	Zeit [min]	Masse [g]:	Zeit [min]
0,5	0,060	0,5	0,065	0,5	0,075	0,5	0,075	0,5	0,060	0,5	0,060
1,0	0,077	1,0	0,075	1,0	0,075	1,0	0,090	1,0	0,080	1,0	0,080
2,0	0,102	2,0	0,120	2,0	0,120	2,0	0,120	2,0	0,120	2,0	0,120
4,0	0,135	4,0	0,170	4,0	0,170	4,0	0,160	4,0	0,155	4,0	0,155
8,0	0,165	8,0	0,195	8,0	0,195	8,0	0,170	8,0	0,175	8,0	0,175
30,0	0,170	30,0	0,200	30,0	0,200	30,0	0,180	30,0	0,185	30,0	0,185
60,0	0,170	60,0	0,205	60,0	0,205	60,0	0,190	60,0	0,195	60,0	0,195
120,0	0,185	120,0	0,212	120,0	0,212	120,0	0,200	120,0	0,205	120,0	0,205
240,0	0,250	240,0	0,225	240,0	0,225	240,0	0,220	240,0	0,220	240,0	0,220
1440,0	0,780	1440,0	0,805	1440,0	0,805	1440,0	0,835	1440,0	0,795	1440,0	0,795

**Literaturverzeichnis**

Bönsch, C. (2006)

Dissertation – „Auswirkungen der Saugspannung auf physikalische und mechanische Eigenschaften von überkonsolidierten Tonen und Tonsteinen im Verwitterungsprozess“ (Mai 2006)

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg – Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät

DIN Deutsches Institut für Normung (1995)

DIN 18132 (Dezember 1995) – Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte - Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens  
Beuth Verlag GmbH

Kugler, H. (2002)

Dissertation – „Frostsicherheit im Straßenbau – Ein verbessertes Mineralkriterium“ (Mai 2002)

Universität für Bodenkultur Wien – Institut für Angewandte Geologie

Kugler, H., Schwaighofer, B., Gruber, S (2003)

Beitrag – 4. Österreichische Geotechniktagung Wien (Februar 2003) – Die Modifizierung des Wasseraufnahmeversuches nach Enslin-Neff  
Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein

Kugler, H. (2016)

Beitrag – 15. gesamtösterreichischen Erdbaulaborantentreffen der Arbeitsgruppe „Steinstraßen und Steinmaterial“ – Arbeitsausschuss 02 „Technologie und Prüfungen“ (März 2016)  
Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr (FSV)

Leibniz, O. (2019)

Geotechnik GL – Bodenmechanische Laborübung – Labormappe (2019)  
Technische Universität Graz – Institut für Bodenmechanik und Grundbau

Neff, H. K (2005)

Beitrag – 5. Österreichische Geotechniktagung Wien (Februar 2005) – Der Wasseraufnahmeversuch nach ENSLIN-NEFF in der erd- und grundbautechnischen Praxis  
Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein

RVS Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen. (1987)

RVS 11.06.26 (November 1987) – Wasseraufnahme der Kornklassen kleiner 0,125 mm (Enslin-Versuch)  
Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr (FSV)

**Internetverzeichnis**

Bentonit.de

<http://www.bentonit.de/bentonit/definition-bentonit/index.php>

Zugriff: 12.10.2018

Spektrum.de

<https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/wasseraufnahme-und-wasserbindevermoegen/17954>

Zugriff: 15.11.2018

<https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/mohssche-haerteskala/10664>

Zugriff: 25.11.2018

Wikipedia

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

Zugriff: 20.10.2018

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

Zugriff: 20.10.2018

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

Zugriff: 25.11.2018

[https://de.wikipedia.org/wiki/Talk\\_\(Mineral\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Talk_(Mineral))

Zugriff: 20.10.2018