

# DISSIPATION VON PORENWASSERDRUCK IN UNTERSCHIEDLICHEN GRANULAREN SUSPENSIONEN

---

## DISSIPATION OF PORE FLUID PRESSURE DUE TO COARSE PARTICLES SUSPENDED IN DIFFERENT CLAY-WATER MIXTURES

MASTERARBEIT

eingereicht von

**Magdalena von der Thannen**

Matrikelnummer: 0640743

betreut von:

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Johannes Hübl

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Roland Kaitna

Ao.Univ.Prof. Mag.rer.nat. Dr.nat.techn. Franz Ottner

Institut für Alpine Naturgefahren

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Universität für Bodenkultur Wien



**Universität für Bodenkultur Wien**  
University of Natural Resources  
and Applied Life Sciences, Vienna

12.09.2014



Department Bautechnik und Naturgefahren Universität für Bodenkultur Wien

Institut für  
Alpine Naturgefahren  
[www.boku.ac.at/ian](http://www.boku.ac.at/ian)



Gewidmet  
meiner Familie.



## DANKSAGUNG

Danken möchte ich...

... meinen Betreuern Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Johannes Hübl und Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Roland Kaitna, für ihre Begleitung auf meinem Weg. Sie waren mir stets Ansprech- und Diskussionspartner, vor allem Roland wusste immer eine Antwort auf allfällige Fragen und eine Möglichkeit weiter zu kommen.

... Ao.Univ.Prof. Mag.rer.nat. Dr.nat.techn. Franz Ottner, vom Institut für angewandte Geologie für den Wissensaustausch und die Bereitstellung der Tonmineralien.

... Martin Falkensteiner, für das tüfteln und zusammen basteln der Versuchsanlage und als allzeit bereiter Helfer und „Fragenbeantworter“ im Labor.

... Ing. Friedrich Zott, für die Unterstützung im Umgang mit den Messprogrammen und bei sonstigen allfälligen technischen Fragen.

... Dr. Christian Steineder, für seine mathematischen Fachkenntnisse und seine Hilfsbereitschaft.

... Monika Stanzer, der tollen Betreuung und Einsatzbereitschaft im Sekretariat.  
→ nicht verzagen, Monika fragen ;)

... meinem Freund Bernhard, der mir nicht nur in technischen Fragen oft eine Bereicherung war. Danke, dass du mich immer unterstützt, ermutigt und aufgebaut hast, wenn's mal nicht so gelaufen ist.

... meinen Freundinnen und Mitbewohnerinnen, für die Geduld, die Aufmunterung und den Spaß im Alltag.

... meiner ganzen Familie, aber besonders meinen Eltern! Danke, dass ihr mir dieses Studium ermöglicht habt und mich immer und überall unterstützt und an mich geglaubt habt.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>ABSTRACT</b> .....	<b>1</b>
<b>KURZFASSUNG</b> .....	<b>2</b>
<b>1. EINLEITUNG</b> .....	<b>3</b>
1.1. ZIELSETZUNG.....	3
1.2. MUREN .....	4
1.2.1. <i>Definitionen</i> .....	4
1.2.2. <i>Physikalische Parameter</i> .....	7
1.3. ZWEI – PHASEN – GEMISCHE .....	10
1.4. DISPERSION / SUSPENSION .....	12
1.4.1. <i>Dispersion</i> .....	12
1.4.2. <i>Suspension</i> .....	13
1.5. RHEOLOGIE – TONMINERALE.....	13
1.5.1. <i>Kaolinit</i> .....	15
1.5.2. <i>Na-Smectit</i> .....	15
<b>2. GRUNDLAGEN</b> .....	<b>17</b>
2.1. ABSINKVERHALTEN VON PARTIKELN .....	17
2.2. SINKGESCHWINDIGKEITEN VON PARTIKELN.....	20
2.2.1. <i>Aräometerverfahren</i> .....	20
2.3. VERÄNDERUNG DES PORENWASSERDRUCKS .....	22
2.4. EINDIMENSIONALE KONSOLIDATIONSTHEORIE.....	23
<b>3. METHODEN</b> .....	<b>28</b>
3.1. SUSPENSIONEN.....	28
3.2. RHEOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN MITTELS VISKOMETER.....	36
3.3. VERSUCHSAUFBAU DRUCKMESSUNGEN .....	38
<b>4. RESULTATE</b> .....	<b>41</b>
4.1. VISKOMETERMESSUNGEN .....	41
4.2. ABSINKVERHALTEN DER WASSER-TON-SUSPENSIONEN.....	44
4.3. DRUCKMESSUNGEN.....	46
4.4. VERÄNDERUNG DES PORENWASSERÜBERDRUCKS – DER DIFFUSIONS-KOEFFIZIENT .....	54
4.5. ÄNDERUNG DES DIFFUSIONS-KOEFFIZIENTEN .....	64
<b>5. DISKUSSION</b> .....	<b>69</b>
<b>6. SCHLUSSFOLGERUNGEN</b> .....	<b>72</b>
<b>7. LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>75</b>
7.1. INTERNETQUELLEN .....	79

<b>8.</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>80</b>
<b>9.</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>86</b>
<b>10.</b>	<b>ANHANG.....</b>	<b>89</b>

## ABSTRACT

Debris flows or mudflows are complex natural hazards, because they are able to occur in different states. The baseline is a highly concentrated mixture of sediment and water mostly with a high content of fines. In debris flow research, the physical parameters and the releasing mechanisms are of great interest. It was found that non-hydrostatic fluid pressure can build up and dissipate during a debris flow event, and that this excess fluid pressure has a strong influence on the flow and deposition behaviour of debris flows. Therefore, this master thesis investigates the influence of mixture composition on the dissipation of non-hydrostatic fluid pressures. The basic principle for the following analysis is the one-dimensional consolidation theory.

For the following experiments, two different types of clay (kaolinite and smectite) are used to prepare eight different debris-like mixtures each. The viscosity of these mixtures is tested in a viscometer. Then the solid grain fraction is added to the mixtures. For the experiment, each mixture is filled in a cylindrical pipe, equipped with pressure sensors. During the experiments the temporal variation of fluid pressure is measured.

The results support most of the assumptions made previously and also the prediction of the one-dimensional consolidation theory. The pressure development is mainly influenced by the viscosity of the mixtures, which is determined by the percentage of clay particles. For comparison and verification of the pressure variation, the diffusion coefficient defined by MAJOR (2000) is used.

Variation of grain size distribution and percentage of solid grain fraction would be interesting for further research.

Keywords: debris flow, pore-fluid pressure, dissipation, one-dimensional consolidation theory, diffusion coefficient

## KURZFASSUNG

Muren bzw. Murgänge stellen eine komplexe Naturgefahr dar, da sie verschiedenste Ausmaße annehmen können. Grundsätzlich ist eine Mure eine hochkonzentrierte Mischung aus Sedimenten und Wasser, welche meist einen sehr hohen Feinanteil besitzt. Im Forschungsbereich der Murgänge sind vor allem die auslösenden Mechanismen und die physikalischen Parameter von Interesse. Es ist belegt, dass sich der (nicht-hydrostatische) Wasserdruck während eines Murgangs auf und abbauen kann. Dieser so genannte Porenwasserüberdruck hat eine große Auswirkung auf das Fließ- und Ablagerungsverhalten einer Mure. Aus diesem Grund beschäftigt sich die vorliegende Masterarbeit damit, welchen Einfluss die Zusammensetzung einer Murmischung auf die Veränderung bzw. die Dissipation von Porenwasserdruck hat. Eine wichtige Grundlage dafür stellt die eindimensionale Konsolidierungstheorie dar.

Für die Untersuchungen stehen zwei unterschiedliche Tonminerale (Kaolinit und Smectit) zur Verfügung, mit welchen jeweils acht murartige Mischungen hergestellt werden. Diese Mischungen werden im Viskosimeter auf ihre Viskosität überprüft und anschließend mit groben Partikeln ergänzt. Im Zuge der Versuche werden sie dann in einen Zylinder mit installierten Drucksensoren gefüllt und somit die auftretenden Drücke sowie ihre Veränderung über die Zeit gemessen.

Die Ergebnisse, die sich daraus ergeben bestätigen die meisten zuvor getroffenen Annahmen bzw. Aussagen der eindimensionalen Konsolidierungstheorie. Vor allem die Viskosität und somit der Anteil an Tonpartikeln in einer murartigen Mischung beeinflussen den Verlauf bzw. das Abfallen der Druckkurve. Die Veränderung des Drucks wird auf Grundlage des Diffusions-Koeffizienten nach MAJOR (2000) überprüft und verglichen.

Durch Variation der Korngrößen und Menge der groben Partikel bietet dieser Forschungsbereich noch Spielraum für weitere Untersuchungen.

Schlüsselwörter: Mure, Porenwasserdruck, Dissipation, eindimensionale Konsolidierungstheorie, Diffusions-Koeffizient

# 1. EINLEITUNG

Der Themenbereich der Murgänge ist ein sehr umfangreicher, denn der Prozess der hinter dieser Naturgefahr steht ist sehr komplex. Schon für die Auslösung, den Transportvorgang und den Ablagerungsvorgang wirken viele einzelne Faktoren mit. Daher wird in der vorliegenden Masterarbeit zu Beginn ein Einblick in das Thema Muren gegeben und verschiedene Definitionen bzw. die wichtigen physikalischen Parameter erläutert.

Auch die zwei Tonminerale, die für diese Arbeit von Bedeutung sind, werden vorgestellt. In weiterer Folge wird beobachtet, wie sich die Partikel in einer murfähigen Masse verhalten und welche Drücke auftreten bzw. wie sie sich verändern. Dabei kann das Absinkverhalten der Partikel in unterschiedlich zusammengesetzten Mischungen beobachtet werden.

Der für diese Masterarbeit wichtigste Faktor, ist der Porenwasserdruck. Dieser spielt sowohl in der Auslösung, im Transport- und im Ablagerungsvorgang eine wichtige Rolle. Anhand der durchzuführenden Versuche soll die Entstehung und die Veränderung des Drucks über die Zeit beobachtet werden. In der Literatur wurde der Porenwasserdruck bis jetzt noch nicht häufig als entscheidender Faktor behandelt, deswegen ist es umso wichtiger sich in Zukunft damit auseinander zu setzen.

## 1.1. ZIELSETZUNG

Eines der anfänglichen Ziele der Masterarbeit ist es, mit den zwei verschiedenen Tonmineralien Kaolinit und Smectit, je drei Mischungen zu finden, mit denen später die Versuche zu durchzuführen sind. Aber nicht nur die Wasser-Ton-Suspensionen müssen definiert werden, sondern auch die gröberen Partikel, welche der Mischung beigemischt werden.

Im nächsten Schritt soll anhand von Laborversuchen untersucht werden wie sich von außen induzierter Porenwasserüberdruck über die Zeit abbaut. Dabei wird vor allem auf die Unterschiede zwischen den

unterschiedlichen Mischungen geachtet. Im letzten Schritt wird der Diffusionskoeffizient von den verschiedenen Ton-Kies-Mischungen und zusätzlich von natürlichem Murmaterial berechnet.

## 1.2. MUREN

Muren oder Murgänge sind sehr komplexe und vielseitige Vorgänge in der Natur und gehören somit zur Gruppe der wichtigsten alpinen Naturgefahren. In diesem Kapitel wird auf Basis unterschiedlichster Autoren versucht, die Naturgefahr Mure zu erläutern und die wichtigsten physikalischen Parameter zu erklären.

### 1.2.1. DEFINITIONEN

Muren sind Naturphänomene der geschiebeführenden Gebirgs- und Wildbäche, die sich bei Hochwasser bilden, schreibt AULITZKY (1973).

*„Darunter werden in den österreichischen Alpenländern die aus Geröll, Geschiebe, Erdreich und Schlamm bestehenden, von Felsblöcken, Bäumen u. dgl. durchsetzten, wassergetränkten „Material-Ströme“ verstanden, die mit meist hoher Geschwindigkeit durch Wildbachgräben zu Tale tosen, um sich dort abzulagern. Dieser Geschiebe-Massentransport wird auch, soweit er in Bewegung ist, als „Murgang“ oder wegen seines stoßweisen Vorwärtsdrängens als „Murstoß“ oder „Murschub“ bezeichnet.“* (vgl. AULITZKY, 1973, S. 50-51)

HAMPTON (1975) beschreibt eine Mure als ein Sediment-Wasser-Gemisch, welches sich durch die Gravitation angetrieben bewegt. In diesem Gemisch werden die größeren Partikel durch den Druck und die Auftriebskraft des Wasser-Ton-Gemisches in Schwebelage gehalten.

Von PIERSON (1985) wurde ein Murgang als eine einheitliche und einphasige Mixtur, bestehend aus wenig sortierten Sedimenten und Wasser, beschrieben. Dabei formt das Wasser-Ton-Gemisch das Porenwasser, welches innerhalb des Gerüsts der größeren Partikel eingeschlossen ist. Man könnte also sagen, dass das Sediment fließt und

die Flüssigkeit mittransportiert. Wenn aber zu viel Wasser dazu kommt, kann das Porenwasser entweichen und die Mixtur wird zu einem Zweiphasengemisch mit zwei unabhängigen Komponenten, das schlammige Wasser und die größeren Partikel. In diesem Fall wird das Wasser zum transportierenden Medium und das Sediment wird mittransportiert (PIERSON, 1985).

Als hochkonzentrierte Wasser-Feststoffgemische, die ein plastisches oder dilatantes Fließverhalten aufweisen, werden Muren von HÜBL (1995) beschrieben.

*„Eine Mure setzt sich aus Wasser, Fein- und Grobgeschiebe zusammen und kann deshalb als 3-Phasen Gemisch bezeichnet werden. In Muren tritt keine Entmischung auf, da alle Fraktionen mit etwa derselben Geschwindigkeit bewegt werden. Durch die hohe effektive Viskosität entsteht eine laminare Strömung, in der Störungen rasch gedämpft werden. Das äußere Erscheinungsbild einer Mure ist die Murwelle, die in Front, Körper und Schwanz gegliedert werden kann.“* (vgl. HÜBL, 1995, S. 194)

Für MIKLAU et al. (2009) ist ein Murgang *„jenes Phänomen, dessen Feststoffanteil gleich oder höher als der Wasseranteil ist, wobei auch sehr große Feststoffkomponenten (Felsblöcke, Bäume) transportiert werden. Die Zerstörungskraft eines Murgangs ist besonders hoch, so dass auch Gefahr für Menschen innerhalb von Gebäuden besteht. Hauptauslöser für Murgänge sind kurze Starkniederschläge meist in Verbindung mit Hagel sowie lang anhaltende Niederschläge bei starker Bodendurchfeuchtung.“* (vgl. MIKLAU et al., 2009, S. 13)

IVERSON (2013) stellt eine Mure als ein geophysikalisches Phänomen dar, welches charakteristisch eine Reichweite von einer flutartigen Überschwemmung bis zu einer Felslawine haben kann.

*„They commonly originate as water-laden landslides on steep slopes and transform into liquefied masses of fragmented rock, muddy water, and entrained organic matter that disgorge from canyons onto valley floors.“* (vgl. IVERSON, 2013, S. 573)

Typisch für Murgänge ist auch ein Volumenanteil von 50% bis 70% an grobkörnigem Material, Geschwindigkeiten  $> 10\text{m/s}$ , Energiepotenzial bis zu  $10^{16}\text{J}$ , sowie einem Gesamtvolumen bis zu  $10^9\text{m}^3$ . Doch auch schon „gewöhnliche“ Murgänge mit einem Volumen von ca.  $10^3\text{m}^3$  können Drainagen verstopfen, Vegetation mit sich reißen, Landschaften zerstören und Menschenleben gefährden (IVERSON, 1997 und IVERSON, 2013).

IVERSON (2013) erläutert einige Eigenschaften von Muren, die während der Feldforschung beobachtet wurden:

- Murgänge verhalten sich differenziert und haben ungleiche Bewegungsformen, aber sie haben einen deutlichen zeitlichen und räumlichen Start- sowie Endpunkt.
- Muren entstehen üblicherweise an  $>30^\circ$  steilen Hängen, die aus Erdmaterial mit Gesteinsanteil aufgebaut sind. Bei Schneeschmelze oder starken Regenfällen kommt es zu einem erhöhten Oberflächenabfluss bzw. einem Grundwasseranstieg. Die wassergesättigte Erdoberfläche kommt in Bewegung, wenn die Antriebskräfte (Gravitation, Gewicht der Masse) die Reibungskräfte (äußere Reibung) übersteigen.
- Die meisten Murgänge können während ihrer Bewegung zusätzliches Material (Wasser, sowie auch unterschiedliche Partikel) aufnehmen. Dieser Vorgang, auch „entrainment“ genannt, kann durch das Aufnehmen von Bettsedimenten oder Uferabbrüchen zustande kommen und führt dazu, dass eine Mure etwa das 10-fache des ursprünglichen Volumens zunimmt.
- Der vordere Teil einer Mure (Murkopf) wird meist durch eine Aufwallung gekennzeichnet, da sich hier die größeren Sedimente ansammeln.
- Der Schwanz einer Mure (der hintere Teil) besteht meist aus dem feineren Material und einem größerem Wasseranteil.

- Seitliche Ablagerungen eines Murgangs werden Levees genannt. Sie entstehen vor allem bei Ausuferungen der Mure oder bei Ablagerungen.
- Wenn die Mure zum Stillstand gekommen ist, wird die Ablagerung schrittweise entwässert und das Material konsolidiert.

### 1.2.2. PHYSIKALISCHE PARAMETER

In einer Mure spielen viele physikalische Parameter eine entscheidende Rolle. In der vorliegenden Arbeit werden ausgewählte Parameter, die auch in den durchgeführten Versuchen von Bedeutung sind, behandelt.

In erster Linie ist das Verhältnis von Wasser- und Kornanteil wichtig. Dieser Parameter der **Kornkonzentration** ist oft mit freiem Auge sichtbar bzw. beurteilbar und kann von flüssig (hoher Wasseranteil) bis breiig (hoher Kornanteil) reichen. Eine Maßzahl dafür ist der  $C_v$ -Wert, welcher genau den Anteil einer bestimmten „Zutat“ (z.B. Ton) in der Mischung angibt (=volumetrische Sedimentkonzentration). Ist der  $C_v$ -Wert zum Beispiel Null, so besteht die Flüssigkeit aus reinem Wasser. Nicht nur das Verhältnis von Wasser- zu Kornanteil, sondern auch die Korngrößenverteilung und die Anordnung der Partikel (Packung), können Einfluss auf die Dichte und das Festigkeitsverhalten der Mure haben (HÜBL, 1995).

Ebenfalls wichtige Parameter sind die in einer Mure herrschenden **Drücke**, einerseits der **Porenwasserdruck** und andererseits der **dispersive Druck**. Letzterer ist jener Druck, welcher normal auf die Scherfläche der bewegten Masse wirkt. Der Fließvorgang kann durch eine Impulsübertragung von einem Korn zum nächsten fortgesetzt werden (BANGOLD, 1954).

Der **Porenwasserdruck** beeinflusst sowohl das Auslösen, den Transportvorgang, als auch die Ablagerung einer Mure (MAJOR, 2000 und IVERSON, 1997). Bei Experimenten mit unterschiedlichen Murmischungen wurde der Porenwasserdruck jeweils am Boden der Ablagerung gemessen. Die Ergebnisse der Dissipationszeiten variierten stark, was hauptsächlich auf die unterschiedliche Zusammensetzung der Murmischungen zurückgeführt wird. Bei Sand-Kies-Mischungen dissipiert

der Porenwasserdruck deutlich schneller, als bei dickflüssigeren Lehm-Kies-Mischungen (MAJOR, 2000).

Nach HAMPTON (1979) und PIERSON (1981) wird der Porenwasserdruck durch das Einwirken des Gewichts der Grobpartikel auf die Wasser-Tonsuspension aufgebaut. Dieser Druckgradient darf nicht entweichen, um die Partikel in Schwebelage zu halten. In einem stehenden Gemisch beginnen die Partikel mit der Zeit zu konsolidieren und der Porenwasserdruck zu dissipieren. PIERSON (1981) führt eine geringe Dissipationsrate des Porenwasserdrucks in einem schlecht sortierten Feststoffgemisch auf kleine Verbindungen zwischen den Porenräumen zurück. Dementsprechend sollte eine höhere Konzentration des Grobanteils die **Auftriebskraft** erhöhen, welche Autoren wie HAMPTON (1979) und PIERSON (1981) als transportfördernden Mechanismus beschreiben. Die Mure wird, wie schon erwähnt, als ein Gemisch, bestehend aus dem flüssigen Anteil (Wasser-Ton-Gemisch) und dem Grobanteil gesehen. Zwischen diesen Komponenten herrscht eine, wenn auch teilweise geringe, Dichtedifferenz. Diese ist dafür verantwortlich, dass die Grobpartikel in dem Wasser-Ton-Gemisch schweben, somit die Auftriebskraft steigt und die Sinkgeschwindigkeit reduziert wird (HÜBL, 1995). Nach RODINE und JOHNSON (1976, zitiert nach HÜBL, 1995) kann durch Erhöhen des Feinanteils (Ton) eine Steigerung der Dichte im Gemisch erreicht werden. Durch eine gute Verbindung der Tonpartikel mit Wasser kann eine größere Dissipation von Porenwasserdruck in einem Murgang verhindert werden (HÜBL, 1995).

Als ein weiterer Faktor für das Schweben der Partikel wird die „**Competence**“ von HAMPTON (1975) beschrieben. Die „Competence“ gibt den größtmöglichen Partikel an, der in einer Murgemischung transportiert werden kann. Somit hängt die „Competence“ von der Tragfähigkeit des Korngerüsts, der Dichte und in weiterer Folge vom Tongehalt in der Mischung ab. Experimente von HAMPTON (1975) zeigen, dass bereits 1,5% bis 4% (Gewichtsanteil) Kaolinit reicht, um die Fraktion des Feinsandes in Schwebelage zu halten, während ein Tongehalt von 19% (Gewichtsanteil) bereits die Fraktion des Grobsandes halten kann. Die „Strength“ eines Fluids wird über das Netzwerk der enthaltenen Tonmineralien beschrieben und ist durch die minimalst nötige Schubspannung, um dieses Netzwerk aufzubrechen, definiert. Kaolinitmischungen haben im Vergleich zu anderen Tonmineralien eine geringe „Strength“ (siehe Abbildung 1), da die Kaolinitpartikel

verhältnismäßig groß sind und eine geringe Kationenaustauschkapazität besitzen. Mischungen mit anderen Tonmineralien können also eine ähnliche oder eine weitaus größere „Competence“ aufweisen. Faktoren, die die „Competence“ verringern können sind zum Beispiel zunehmender Wassergehalt, zunehmende Schubspannung, erhöhter Salzgehalt des Wassers oder aber auch eine verringerte Kationenaustauschkapazität (HAMPTON, 1975).

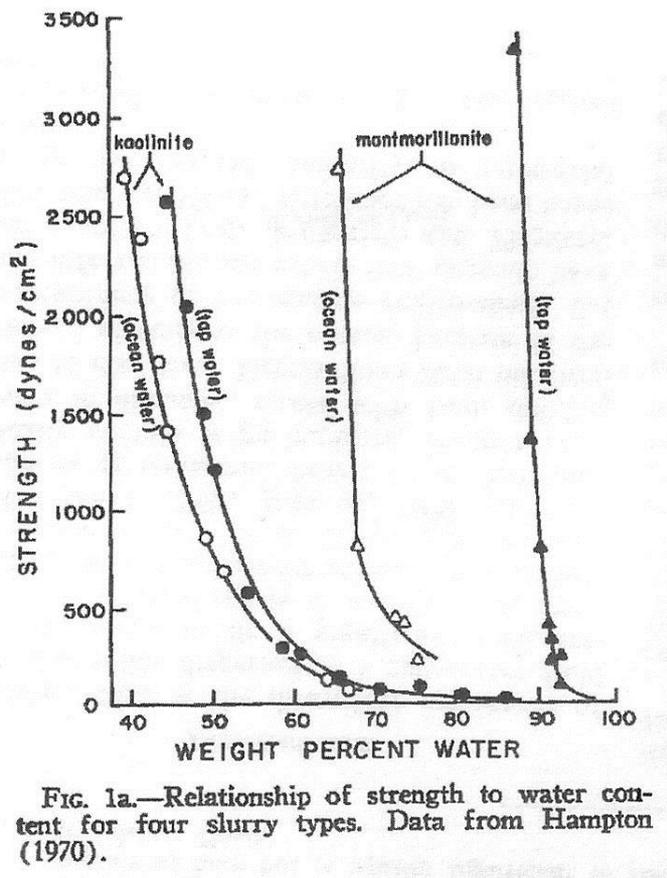


Abbildung 1: Beziehung von „Strength“ zum Wassergehalt in vier versch. Ton-Wasser-Mischungen (Quelle: HAMPTON, 1975, Seite 836).

Die dynamische **Viskosität**  $\eta$  beschreibt die Zähigkeit einer Flüssigkeit und ergibt sich aus dem Verhältnis von Schubspannung  $\tau$  und Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  (1).

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

Mit zunehmender Konzentration der Feststoffe in einer Flüssigkeit nimmt auch die Viskosität zu.

Bei Tonmineralmischungen hängt die Viskosität von mehreren Faktoren ab. Einerseits von der Viskosität des Wassers und dem hydrodynamischen Volumen der Tonminerale, andererseits vom Ausmaß der Interferenzen zwischen den Ton-Partikeln. Durch Hydratation, Adsorption und Aggregation der Partikel (abhängig von ihrer chemischen Zusammensetzung) kann das hydrodynamische Volumen des Tonminerals vergrößert werden. Es zeigt sich, dass Montmorillonit-Suspensionen eine höhere Viskosität aufweisen als Kaolinit-Suspensionen (LANGSTON et al., 1966 zitiert nach HÜBL, 1995). Die Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Viskometer, welche im Zuge dieser Arbeit durchgeführt wurden sind in Kapitel 4.1 zu finden.

### 1.3. ZWEI – PHASEN – GEMISCHE

Unter einer Phase versteht man einen homogenen Teil einer Materie. Sie bezeichnet entweder einen reinen Stoff (z.B. Wasser) oder mehrere Stoffe, die sich gut vermischen und somit verbinden lassen (z.B. Wasser mit Tonpartikeln). Wenn eine Phase auf eine andere Phase trifft und diese sich nicht vermischen, sondern eine Grenzfläche oder Phasengrenze ausbilden, so entsteht ein mehrphasiges Gemisch (SCHMIDT, 2004).

Um laut IVERSON et al. (1997) die Dynamik von Muren verstehen zu können, ist es wichtig die Wechselwirkungen zwischen den groben Partikeln und dem flüssigen Teil zu betrachten. Durch die Flüssigkeit kann sich die Mobilität der groben Partikel verbessern, welche durch zusätzliche Effekte (z.B. Reduktion der Schubspannung der groben Partikel) unterstützt wird. Es ist also vom Wassergehalt bzw. vom Verhältnis von Flüssigkeit zu Feststoffen abhängig, ob eine Mure flüssig (fluvialer Feststofftransport) oder breiig (Mure) ist.

Das Zwei-Phasen-Modell basiert auf der „Coulomb mixture theory“, welche in IVERSON (1997) und IVERSON und DENLINGER (2001) beschrieben wird. In diesem Modell wird eine murfähige Masse als Mischung bestehend aus einer newtonischen Flüssigkeit und Feststoffen beschrieben.

Wie schon in Kapitel 1.2.2 erwähnt, spielt der Porenwasserdruck in einer Mure eine wichtige Rolle. Die Entstehung von Porenwasserüberdruck fördert die Mobilität einer murefähigen Masse. Dabei wird der Scherwiderstand zwischen den Partikeln reduziert, weil sich die Schubspannung in einer Mischung proportional zur effektiven Spannung verhält (KAITNA, 2006). Nach TERZAGHI (1963, zitiert nach KAITNA, 2006) wird die Schubspannung wie folgt definiert:

$$\tau = \sigma' * \tan\varphi + c \quad (2)$$

In (2) ist  $\sigma'$  die effektive Spannung,  $\varphi$  der innere Reibungswinkel und  $c$  die Kohäsion.

Die effektive Spannung setzt sich dabei aus der Differenz von Normalspannung  $\sigma$  und Porenwasserdruck  $u$  zusammen (3).

$$\sigma' = \sigma - u \quad (3)$$

Genau so (nur ohne Kohäsion) wird in IVERSON (2013) die Gleichung nach Mohr-Coulomb (4) beschrieben. Diese stellt die Schubspannung  $\tau$  wie folgt dar:

$$\tau = (\sigma - u) * \tan\varphi \quad (4)$$

Sie definiert sich aus der Normalspannung  $\sigma$ , dem Porenwasserdruck  $u$  und dem inneren Reibungswinkel  $\varphi$  (IVERSON, 2013).

Aus dieser Gleichung lässt sich ableiten, dass die Schubspannung mit steigendem Porenwasserdruck abnimmt. Damit verringert sich auch der Widerstand, der der Mobilisierung einer murefähigen Masse entgegen wirkt.

Somit ist der Porenwasserdruck ein wichtiger Faktor für das Auslösen, Mobilisieren und Ablagern von Muren (IVERSON, 1997).

Im Zuge dieser Masterarbeit wird mit 2-Phasen-Gemischen gearbeitet. Diese bestehen aus einem flüssigen Teil (dem Fluid oder der Suspension bestehend aus Wasser und Tonmineral) und einem festen, groben Teil (Sand, Bruchkorn).

## 1.4. DISPERSION / SUSPENSION

In diesem Kapitel werden die Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten von Dispersionen und Suspensionen erarbeitet.

### 1.4.1. DISPERSION

Als eine Dispersion wird in der Chemie ein heterogenes Gemisch aus mindestens zwei Stoffen bezeichnet. Es gibt also mindestens einen Stoff (disperse Phase) der sich in einem anderen Stoff (Dispersionsmedium) fein verteilt. Man bezeichnet dies auch als kolloidale Lösung. Nach KNOBLAUCH und SCHNEIDER (2013) werden bei den kolloidalen Systemen fest/flüssig, welche als Dispersionen bezeichnet werden, zwei Arten unterschieden. Einerseits gibt es das Sol, hier erscheint das Kolloid als Flüssigkeit und andererseits gibt es das Gel, welches mehr oder weniger fest ist. Ein Kolloid kann also je nach Feststoffanteilen als Sol oder als Gel in Erscheinung treten. Diesbezüglich werden zwei Vorgänge unterschieden, Peptisation und Koagulation. Bei einem Sol sind die Kolloidteilchen weitgehend unabhängig von einander. Durch Koagulation (auch Ausflockung genannt) wird das Sol zu einem Gel und somit die zunächst voneinander unabhängigen Kolloidteilchen zu netz- oder wabenartigen Strukturen miteinander verbunden. Der umgekehrte Vorgang, vom Gel zum Sol, wird als Peptisation (Zerteilung) bezeichnet.

Bei einer Dispersion wird als Dispersionsmedium eine Flüssigkeit und als disperse Phase ein Feststoff oder ebenfalls eine Flüssigkeit verwendet. Die disperse Phase wird in dem Dispersionsmedium „dispergiert“.

Zu den wichtigsten Arten von Dispersionen gehören unter anderem Emulsionen und Suspensionen. Bei einer Suspension ist das Dispersionsmedium immer eine Flüssigkeit und die disperse Phase immer ein Feststoff. Bei der Emulsion sind beide Stoffe des Gemisches flüssig (KNOBLAUCH und SCHNEIDER, 2013).

#### 1.4.2. SUSPENSION

Eine Suspension ist, wie schon zuvor erwähnt, eine Unterart der Dispersionen und somit ein heterogenes Stoffgemisch aus zwei Stoffen, bestehend aus einer Flüssigkeit und den darin verteilten Feststoffen. Diese Feststoffpartikel werden zum Beispiel mit Hilfe von Mixern und oft auch durch zusätzlichen Einsatz von Dispergiermittel aufgeschlämmt und in Schwebelage gehalten.

Eine Suspension wird als eine grobdisperse Dispersion bezeichnet, welche zur Sedimentation bzw. zur Phasentrennung neigt. Die festen Stoffteilchen sind in der flüssigen Phase der Suspension „suspergiert“. KNOBLAUCH und SCHNEIDER (2013) beschreiben in diesem Zusammenhang die Verteilung von Feststoffen bis zu einer Teilchengröße von  $>10^{-3}$  mm in einer Flüssigkeit und nennen als Beispiel das Aufschlämmen von Lehm in Wasser.

Die Suspensionen mit denen in dieser Masterarbeit gearbeitet werden bestehen aus einem Tonmineral und Wasser. In Kapitel 1.5 wird genauer auf die Tonminerale und deren Eigenschaften, in Kapitel 3.1 auf die Zusammensetzung der Suspensionen eingegangen.

#### 1.5. RHEOLOGIE – TONMINERALE

Tonminerale bestehen aus einer Schichtung von Tetraedern und Oktaedern. Die Verknüpfung der Tetraeder und Oktaeder untereinander gelingt über gemeinsame Sauerstoffionen (siehe Abbildung 2) (JASMUND und LAGALY, 1993).

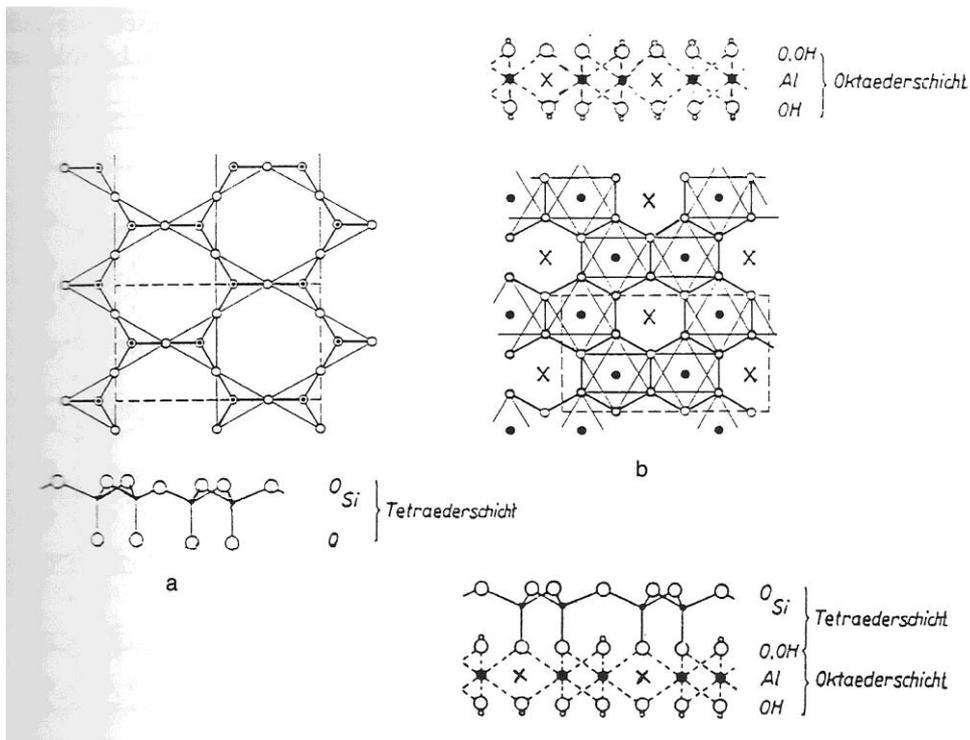


Abbildung 2: (a) Tetraeder- und (b) Oktaederschichten der Tonminerale (Quelle: Jasmund und Lagaly, 1993, Seite 3).

Die **Zweischichttonminerale** (1:1 Schichtsilicate), wie zum Beispiel die dioctaedrischen Aluminiumminerale der Kaolingruppe, bestehen aus je einer Tetraeder- und einer Oktaederschicht (JASMUND und LAGALY, 1993).

Bei den **Dreischichttonmineralen** (2:1 Schichtsilicate) ist an die vorhandene Oktaederschicht noch eine weitere (zweite) Tetraederschicht ankondensiert. Diese Gruppe von Tonmineralen weist eine große Vielfalt auf. Das für diese Arbeit interessante Dreischichttonmineral ist der Na-Smectit (JASMUND und LAGALY, 1993).

Tonmineralsuspensionen weisen oft ein unerwartetes Fließverhalten auf, welches für viele Anwendungen in der Technik ausgenutzt werden kann. Um die rheologischen Eigenschaften bzw. das Fließverhalten der in dieser Arbeit verwendeten Tonmineralien (in einer Suspension) zu analysieren wurden Untersuchungen mittels Viskometer durchgeführt. Dieses Verfahren wird in Kapitel 3.2 genauer erklärt.

### 1.5.1. KAOLINIT

Der Kaolinit ein Zweischichttonmineral. Die Teilchen der Kaoline sind gröber und reichen kaum unter die Fraktionen von  $<0,2\mu\text{m}$ . Ihre Form entspricht mehr oder weniger gut ausgeformten sechseckigen Plättchen, welche buch- oder geldrollenartig zusammengelagert sind.

Die Kaolinminerale entstehen vorwiegend durch die Zersetzung von feldspatführenden Silicatgesteinen entweder durch hydrothermale Lösungen oder durch die Verwitterung unter tropischen und subtropischen Klimabedingungen. In der folgenden Abbildung 3 sind die Plättchen des Kaolinit dargestellt (JASMUND und LAGALY, 1993).

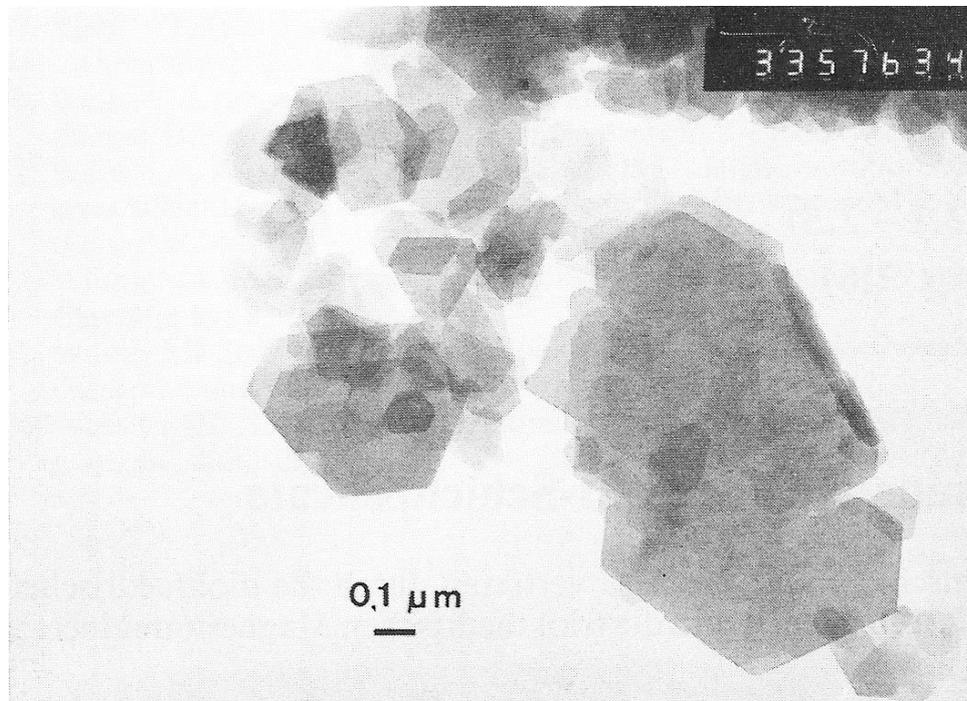


Abbildung 3: Kaolinit (Quelle: Jasmund und Lagaly, 1993, Seite 34).

### 1.5.2. NA-SMECTIT

Der Na-Smectit ist ein 3-Schicht-Tonmineral, das bedeutet er besteht aus einem Gerüst aus Tetraeder-Oktaeder-Tetraeder-Schichten. Dieses Tonmineral hat die Eigenschaft, dass es sehr quellfähig ist. Die Teilchen des Smectit sind sehr fein und können bis weit unter  $2\mu\text{m}$  reichen. Die Form bildet dünne, kleine Kristalle, die wie unregelmäßig begrenzte, verbogene, manchmal gefaltete und an den Rändern eingerollte Folienstückchen erscheinen (siehe Abbildung 4).

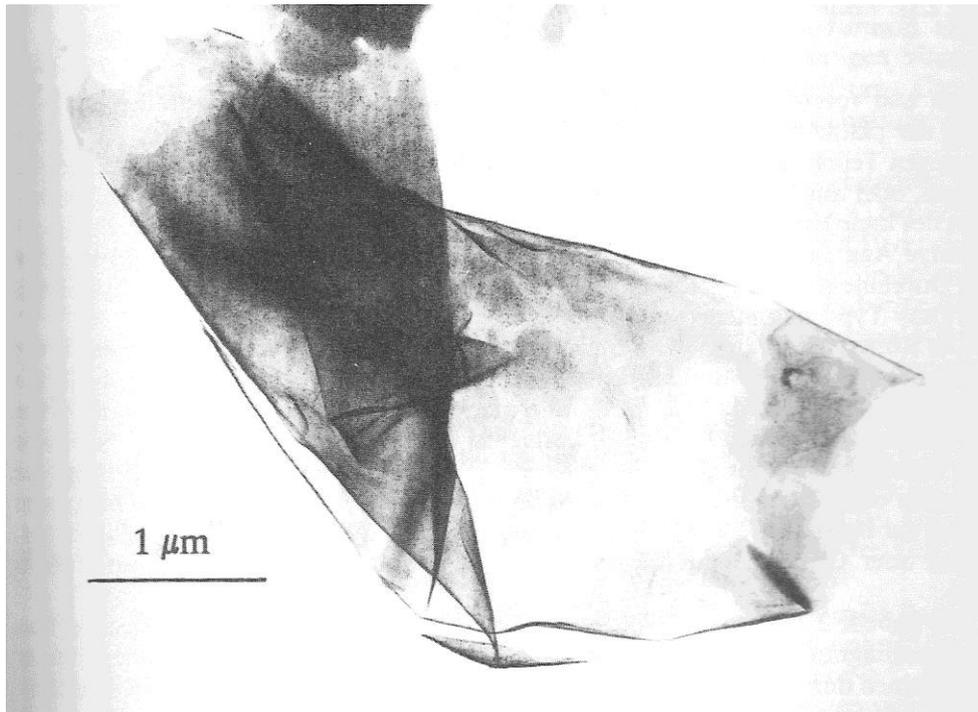


Abbildung 4: Montmorillonit (Quelle: Jasmund und Lagaly, 1993, Seite 49).

Eine wichtige aber recht ungewöhnliche Reaktion ist die Delamination von Na-Smectiten in Wasser und salzarmen Lösungen. Dabei fallen die Smectitkristalle weitgehend auseinander, unter den richtigen Bedingungen lösen sich die Silicatschichten vollständig voneinander und bilden somit kolloidale Dispersionen. Diese Eigenschaft kann vor allem für technische Anwendungen eine bedeutende Rolle spielen.

Der Na-Smectit gehört zu den Bentoniten, welche einen hohen Montmorillonitgehalt aufweisen. Somit gehört der Na-Smectit auch zur großen Gruppe der dioktaedrischen Montmorillonite. Die Bentonite entstehen meist als Umwandlungsprodukte von vulkanischen Tuffen oder sie werden als umgelagerte Tone in Sedimentgesteinsserien gefunden (JASMUND und LAGALY, 1993).

## 2. GRUNDLAGEN

### 2.1. ABSINKVERHALTEN VON PARTIKELN

Das Absinkverhalten von Partikeln ist im Allgemeinen abhängig von der Dichte und der Viskosität der Flüssigkeit. Berücksichtigt man auch die Eigenschaften der Partikel, so spielen deren Dichte, Form, Oberflächenstruktur und Größe eine wichtige Rolle (DIETRICH, 1982).

Ein Partikel kann in einer Flüssigkeit sinken, solange seine Dichte größer ist als die der umgebenden Flüssigkeit und solange die Gewichtskraft größer ist als die Auftriebskraft (TABUTEAU, 2007).

Ebenfalls von Bedeutung ist laut GEORGE und IVERSON (2011) der Porenwasserdruck, da dieser der Normalspannung entgegenwirkt und somit auch die interne Reibung der Partikel verringert.

Betrachtet man ein Gefäß in dem sich eine Wasser-Ton-Suspension befindetet, so herrscht ein hydrostatischer Druck  $P_{hyd}$  (siehe Abbildung 5). Wird ein größerer Partikel (Stein, etc.) dazu gegeben, so steigt der Druck in der Suspension während des Absinkens durch seine Beschleunigung an ( $P_t = P_{hyd} + P_*$ ) (siehe Abbildung 6) und es entsteht Porenwasserüberdruck. Der Partikel wird auf Grund seines Gewichtes so lange beschleunigen, bis die Gravitationskraft durch die Widerstandskräfte der Suspension ausgeglichen wird und somit der Partikel eine konstante Geschwindigkeit erreicht (DIETRICH, 1982). Ab diesem Zeitpunkt beginnt der zusätzlich entstandene Druck  $P_*$  zu dissipieren.

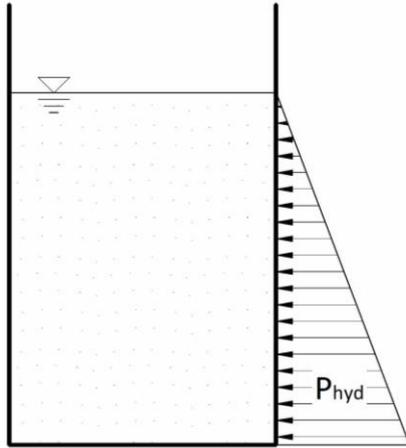


Abbildung 5: Hydrostatischer Druck der Mixtur in einem Zylinder.

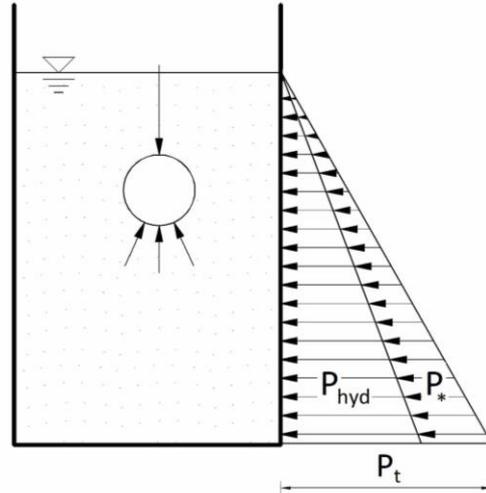


Abbildung 6: Zusätzlicher Druck durch Einbringen eines Partikels.

Das Absinkverhalten eines Partikels wird (wie von DIETRICH (1982) beschrieben) von der Widerstandskraft der Suspension (wird auch als „drag force“ bezeichnet) und der Größe des Partikels bestimmt. Je mehr Ton in der Wasser-Ton Suspension ist, desto dickflüssiger wird sie und umso höher ist die Widerstandskraft.

Diese Widerstandskraft wird durch einen Koeffizienten, den dimensionslosen Widerstandskoeffizienten  $C_D$ , berücksichtigt. Dieser ist abhängig von der relativen Größe der internen und viskosen Kräfte, welche durch die Reynolds-Zahl  $Re$  ausgedrückt werden (5):

$$Re = \frac{w_s * B}{\nu} \quad (5)$$

Wobei  $w_s$  die charakteristische Strömungsgeschwindigkeit des Fluids,  $B$  die repräsentative Länge des Partikels und  $\nu$  die kinematische Viskosität des Fluids ist (DIETRICH, 1982).

Probleme entstehen dann, wenn die Partikelform nicht rund sondern variabel und ungleich ist. In diesem Fall können keine eindeutigen, Partikel-beschreibenden Faktoren (Länge, Querschnittsfläche, etc.) angegeben werden. Außerdem ist die Oberfläche eines unregelmäßigen Partikels größer, er verdrängt mehr Flüssigkeit und auch der Druck und die Widerstandskraft sind, bei gleicher Sinkgeschwindigkeit (wie bei

einem runden Partikel), höher. Mit diesem Problem hat sich DIETRICH (1982) ebenfalls beschäftigt und meint, dass eine Variable alleine eine zu starke Vereinfachung ist, um alle Effekte, welche durch die Form eines Partikels beeinflusst werden, zu berücksichtigen. Somit beschreibt er den bisher einfachsten und meist verwendeten Berechnungsbeiwert (Shape Faktor), den Corey Shape Factor (CSF) (6).

$$CSF = \frac{c}{(ab)^{1/2}} \quad (6)$$

Dabei sind  $a$ ,  $b$  und  $c$  die längste, die mittlere und die kürzeste Achse des Partikels und stehen senkrecht aufeinander. Der Corey Shape Factor reicht von  $>0$  bis  $1,0$  und ergibt sich aus dem Verhältnis der Querschnittsflächen einer Kugel und der eines Ellipsoides. Je kleiner der CSF ist, desto flacher ist der Partikel (DIETRICH, 1982).

Auch CAMENEN (2007) und SHE et al. (2005) berichten, dass die Form bzw. die „Rundheit“ eines Partikels sehr wichtige, zu berücksichtigende Parameter sind, welche die Sinkgeschwindigkeit stark beeinflussen. CAMANEN (2007) beschreibt einen weiteren Shape Faktor, nämlich die Particle Roundness  $P$ . Dieser wird vor allem für die Formbestimmung von natürlich runden Partikeln sowie Bruchkörnern angewandt. SHE et al. (2005) beschreiben ebenfalls die Schwierigkeit, die Form natürlicher Partikel genau zu definieren. Um empirische Formeln zu entwickeln, wird einfach der Siebdurchmesser der Partikel (vor allem für Sand und kleinere Korngrößen) genutzt und somit die Form bzw. Größe festgelegt.

Außerdem beschäftigten sich SHE et al. (2005) mit dem Einfluss des Wandeffekts. Der Wandeffekt beschreibt den Einfluss einer vorhandenen Wand auf die Sinkgeschwindigkeit von Partikeln. Bei Experimenten die in einem Tank oder anderen Gefäßen durchgeführt werden (so wie in dieser Masterarbeit), sollte dies bewusst sein. Dieser Wandeffekt ergibt sich nun aus dem Zusammenhang zwischen dem Durchmesser des Gefäßes  $D_0$  und dem Partikeldurchmesser  $D$  und wird als  $D_0/D$  dargestellt. Je kleiner das Verhältnis ist, desto größer ist der Wandeffekt. Auch zu berücksichtigen ist, dass natürlich geformte Partikel nicht gerade absinken (was ein runder Partikel tun würde), sondern einem „Zick-Zack-Schema“ folgen. Durch den Einfluss der Wand wird ein natürlicher Partikel aber einen „geraderen“ Weg nehmen, als in einer unbegrenzten Flüssigkeit und somit eine höhere Geschwindigkeit

aufweisen. Dies gleicht wiederum die natürliche Tendenz einer begrenzten Flüssigkeit, die Sinkgeschwindigkeit der Partikel zu reduzieren, aus (SHE et al., 2005).

Geht man von einem schön gerundeten, kugelförmigen Partikel aus, so kann die Sinkgeschwindigkeit einfach berechnet werden, zum Beispiel mit dem Gesetz nach Stokes (siehe Kapitel 2.2.1).

## 2.2. SINKGESCHWINDIGKEITEN VON PARTIKELN

In den vergangenen Jahren haben sich viele Autoren mit dem Thema „Sinkgeschwindigkeiten von Partikeln“ beschäftigt und es wurde eine Vielzahl an Formeln dafür entwickelt.

SWAMEE und OJHA (1997) und CHENG (1997) zum Beispiel versuchten eine Formel für die Sinkgeschwindigkeit zu definieren, welche für natürliche Partikel und Bruchkörner verwendet werden soll.

AHRENS (2000 und 2003) beschäftigt sich mit einer vielfach verwendeten Formel von HALLERMEIER (1981). Die Schwierigkeit an diesem Ansatz ist, dass er aus der Beziehung zwischen Reynolds-Zahl und dem Archimedischen Prinzip (Archimedes buoyancy index) besteht.

Die meisten Autoren versuchen aus bereits veröffentlichten Formeln anderer Autoren noch bessere bzw. einfachere Formeln zu entwickeln. Aber alle Forschungen beruhen auf der Reynolds-Zahl.

Da die Sinkgeschwindigkeiten der Partikel an sich nicht relevant für die vorliegende Masterarbeit sind, wird nicht näher darauf eingegangen. Die für diese Masterarbeit wichtige Grundlage, in Bezug auf die Sinkgeschwindigkeiten, ist das Stoke'sche Gesetz. Es wird im folgenden Kapitel 2.2.1 erläutert.

### 2.2.1. ARÄOMETERVERFAHREN

Das Absinken bzw. Absetzen von Partikeln in einer Suspension kann zum Beispiel mittels Aräometerverfahren beobachtet werden. Bei diesem Verfahren von BOUYOUCOS und CASAGRANDE (zitiert nach PREGI, 1997) wird eine Suspension in einen Zylinder (6 cm Durchmesser) gegeben und anschließend mit destilliertem Wasser bis 1000 cm<sup>3</sup> Inhalt aufgefüllt

(siehe Abbildung 7). Anschließend wird die Suspension mit einem Mixer gut vermischt und in dem Moment, in dem der Mixer herausgezogen wird, wird eine Stoppuhr aktiviert und das Aräometer langsam in die Suspension gegeben. Somit sollte zum Zeitpunkt des Einsetzens des Aräometers eine möglichst gleichförmige Suspension vorliegen. Nach einer halben Minute wird die erste Ablesung an der Skala des Aräometers durchgeführt. Nach einer und zwei Minuten jeweils noch eine. Dadurch kann die zeitliche Änderung der Dichte in einer bestimmten Tiefe gemessen werden. Dieser Vorgang wird dreimal wiederholt und anschließend die Ergebnisse gemittelt (PREGL, 1997).

In einer zweiten Versuchsphase wird nach neuerlichem Durchmischen der Suspension die Uhrzeit zu Versuchsbeginn festgehalten und der Aräometer nur zu bestimmten Ablesezeiten (bei 5, 15, 45 min und 2, 4, 6, 24 Stunden) hineingegeben (PREGL, 1997).

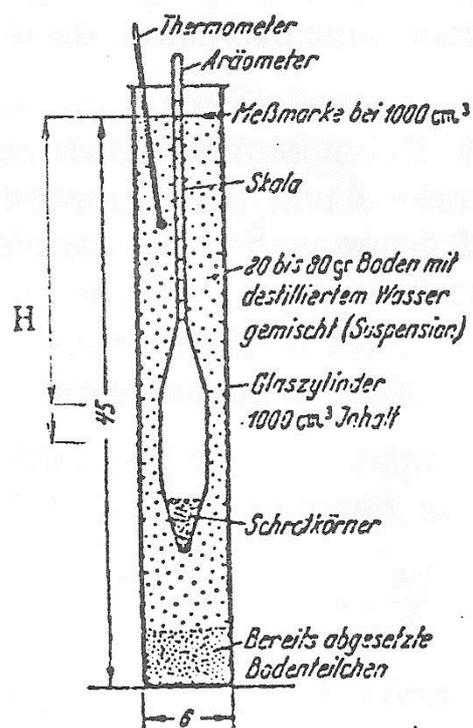


Abbildung 7: Darstellung des Aräometersversuchs (Quelle: Pregl, 1997, Seite 8).

Die Auswertung des Versuchs beruht auf dem Stoke'schen Gesetz (7):

$$v = \frac{2r^2(\rho_s - \rho'_w)g}{9\eta} \quad (7)$$

Es beschreibt die Sinkgeschwindigkeit eines kugelförmigen Partikels mit dem Radius  $r$  und der Dichte  $\rho_s$  in einer Flüssigkeit mit der Dichte  $\rho'_w$  und der dynamischen Viskosität  $\eta$  (PREGL, 1997).

Das Stokesche Gesetz ist allerdings nur auf Korngrößen mit einem Durchmesser zwischen 0,2mm und 0,2 $\mu$ m anwendbar (PREGL, 1997).

### 2.3. VERÄNDERUNG DES PORENWASSERDRUCKS

Für den Anstieg des Porenwasserdrucks in einer murfähigen Masse kann es verschiedene Gründe geben. In der Literatur wurde der Porenwasserdruck bis jetzt noch nicht häufig als entscheidender Faktor behandelt, deswegen ist es umso wichtiger sich in Zukunft damit auseinander zu setzen.

Es werden folgend die teilweise schon erwähnten Thesen über den Porenwasserdruck nochmals zusammengefasst:

Nach HAMPTON (1979) und PIERSON (1981) wird der Porenwasserdruck durch das Einwirken des Gewichts der Grobpartikel auf die Wasser-Tonsuspension bewirkt. Dieser Druckgradient darf nicht entweichen, um die Partikel in Schwebe zu halten. In einem stehenden Gemisch beginnen die Partikel mit der Zeit zu konsolidieren, der Porenwasserdruck zu dissipieren und die Partikel sinken.

In DIETRICH (1982) wird vor allem die Form eines Partikels als ausschlaggebend beurteilt. Durch eine unregelmäßige und ungleichförmige Gestalt hat der Partikel eine größere Oberfläche als eine ideale Kugel. Er muss somit beim Absinken mehr Wasser verdrängen, wodurch eine größere Reibungskraft und auch ein höherer Druck (bei gleicher Sinkgeschwindigkeit) entsteht.

Der Porenwasserdruck beeinflusst sowohl das Auslösen, den Transportvorgang, als auch die Ablagerung einer Mure stark (MAJOR,

2000 und IVERSON, 1997). Bei Experimenten mit unterschiedlichen Murmischungen wurde der Porenwasserdruck jeweils am Boden der Ablagerung gemessen. Die Ergebnisse der Dissipationszeiten variierten stark, was hauptsächlich auf die unterschiedliche Zusammensetzung der Murmischungen zurückgeführt wird. Bei Sand-Kies-Mischungen dissipierte der Porenwasserdruck deutlich schneller, als bei dickflüssigeren Lehm-Kies-Mischungen (MAJOR, 2000). Diese Untersuchungsergebnisse können durch die Gleichung für den Diffusions-Koeffizienten, welchen MAJOR (2000) als Maß für die Veränderung des Porenwasserüberdrucks sieht, bestätigt werden. Der Diffusions-Koeffizient wird wie folgt berechnet (8):

$$D = \frac{k * E_c}{\mu} \quad (8)$$

hierbei ist  $E_c$  [Pa] ist der Kompressionsmodul,  $k$  [m<sup>2</sup>] ist die hydraulische Permeabilität des porösen Mediums und  $\mu$  [Ns/m<sup>2</sup>] ist die dynamische Viskosität des Porenwassers. Die Gleichung besagt somit folgendes:

- Je höher die Viskosität des Mediums (das Medium ist somit dickflüssig bzw. breiig), umso kleiner wird der Diffusions-Koeffizient und desto länger bleibt der Porenwasserüberdruck hoch.
- Das Gleiche gilt für die umgekehrte Variante: je geringer die Viskosität des Mediums (das Medium ist also eher dünnflüssig), desto größer wird der Diffusions-Koeffizient und umso schneller sinkt der Porenwasserüberdruck ab.

## 2.4. EINDIMENSIONALE KONSOLIDATIONSTHEORIE

Unter Konsolidierung versteht man die zeitabhängige Verdichtung von einem porösen Medium, dessen Porenraum mit einer Flüssigkeit gefüllt ist, unter zusätzlicher Belastung. Die am meisten in der Natur vorkommenden porösen Medien sind Ablagerungen, die man als Korngerüst mit eingeschlossenen Porenräumen (gefüllt mit Luft und

Wasser) betrachten kann. Diese Ablagerungen können konsolidieren, wenn eine zusätzliche Belastung von außen auf ihre Oberfläche aufgebracht wird oder Gravitationskräfte darauf wirken (MAJOR, 2000).

An welchem Punkt ein Medium konsolidiert bzw. wie lange es dauert ist abhängig von den physikalischen Parametern der Partikel, dem Porenwasser und der Menge bzw. Größe der Ablagerung. MAJOR (2000) beschreibt drei Möglichkeiten, wie eine wassergesättigte Sedimentablagerung konsolidieren kann:

- das Porenwasser kann noch komprimiert werden
- die Partikel lassen sich umformen bzw. sind beweglich
- oder die Partikel können sich durch das Verdrängen des Porenwassers selbst neu anordnen und werden so zu einer dichteren Packung.

Die eindimensionale Konsolidierung von gesättigten Sedimenten kann dann eintreten, wenn das Wasser entweichen kann und somit die Porenräume kleiner werden (MAJOR, 2000).

In der folgenden Abbildung 8 ist eine schematische Darstellung der Konsolidierung aufgezeigt. Damit können die Vorgänge in einer aufgemischten und dann stehenden Suspension besser veranschaulicht und somit auch verstanden werden.

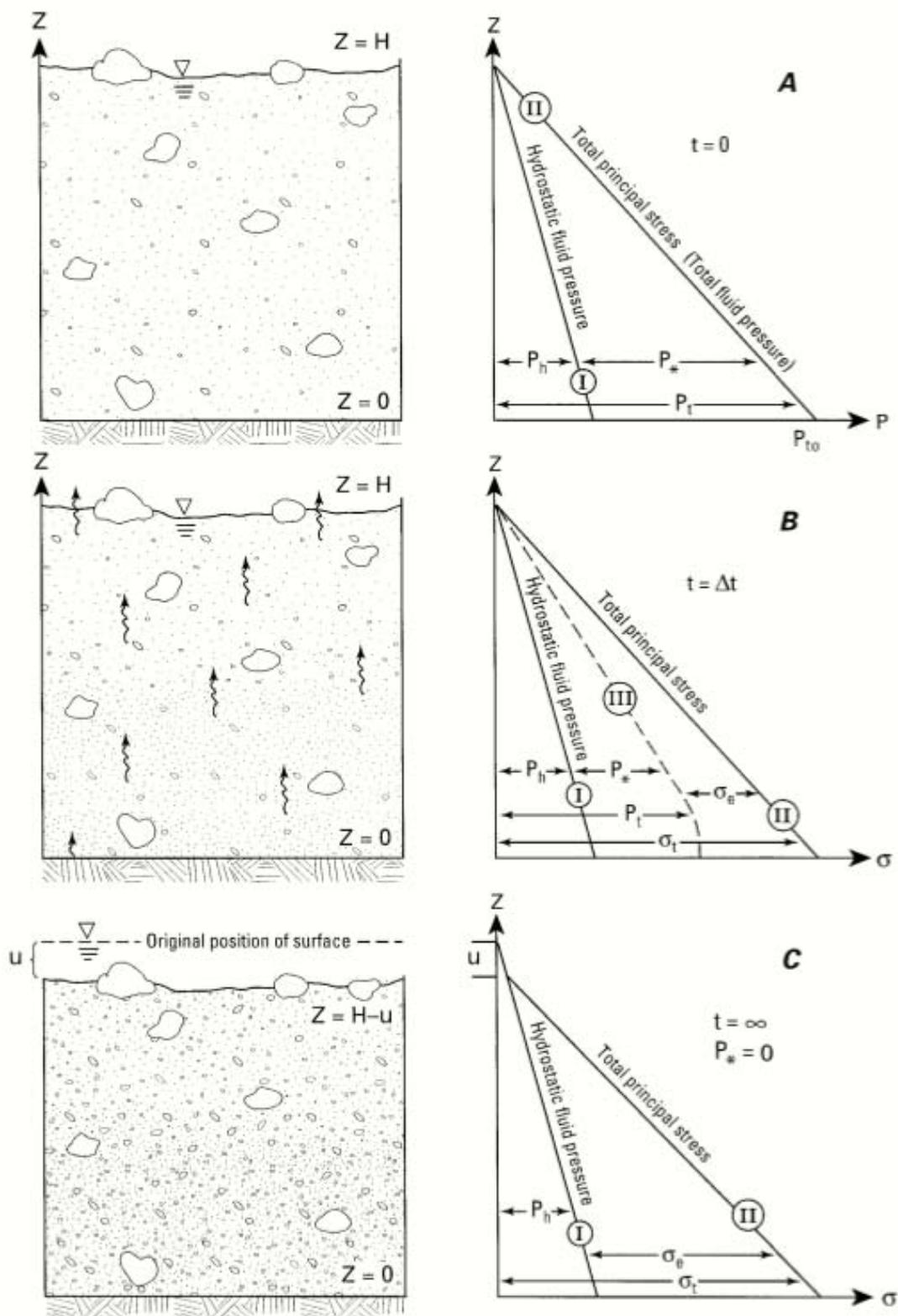


Abbildung 8: Bildliche Darstellung der Suspension und der darin verteilten Drücke und Spannungen, für die eindimensionale gravitationsbedingte Konsolidierung (Quelle: Major, 2000, Seite 67).

In Abbildung 8 ist das Koordinatensystem nach oben positiv definiert. Am Boden gilt  $Z=0$  und an der Oberfläche der Suspension  $Z=H$ .  $P_h$  ist der hydrostatische Druck,  $P_*$  ist der zusätzlich aufgebrachte Druck (Porenwasserüberdruck) und  $P_t$  ist der gesamte Druck.  $\sigma_t$  ist die Totalspannung,  $\sigma_e$  ist die effektive Normalspannung und  $u$  stellt die Absenkung der Suspensionsoberfläche dar. A) stellt die Ausgangssituation der Suspension dar. Der Gesamtdruck  $P_t$  entspricht dem Eigengewicht der Suspension. B) stellt die Konsolidierung zum Zeitpunkt  $\Delta t$  dar. Durch das Absinken der Partikel dissipiert der zusätzliche Druck  $P_*$ . Die Totalspannung bleibt aber während der Konsolidierung konstant und die effektive intergranuläre Spannung repräsentiert den Unterschied zwischen Totalspannung und totalem Druck. Wenn der Porenwasserüberdruck dissipiert, so wird die effektive Spannung größer. C) Beschreibt die Situation nach der Konsolidierung. Der zusätzliche Druck ist komplett dissipiert und der hydrostatische Druck hat sich wieder eingependelt (MAJOR, 2000).

Die theoretische und analytische Ausführung der Konsolidierungstheorie wird von MAJOR (2000) wie folgt beschrieben:

Der Ausdruck der Ausbreitung (Diffusion) des Porenwasserüberdrucks bildet die Grundlage für die Analyse der quasistatischen Konsolidierung. Dieser Ausdruck für die eindimensionale lineare Konsolidierung mit Einfluss der Diffusion des Porenwasserüberdrucks  $P_*$  wird folgendermaßen beschrieben (9):

$$\frac{\partial P_*}{\partial t} - D \frac{\partial^2 P_*}{\partial z^2} = 0 \quad (9)$$

Wobei der Diffusions-Koeffizient  $D = kE_c/\mu$  [ $m^2/s$ ] ist,  $E_c$  [Pa] ist der Kompressionsmodul,  $k$  [ $m^2$ ] ist die hydraulische Permeabilität des porösen Mediums und  $\mu$  [ $Ns/m^2$ ] ist die dynamische Viskosität des Porenwassers.

(9) beschreibt die Änderung des Porenwasserüberdrucks mit der Zeit und setzt diese gleich der örtlichen Diffusionsrate. Diese Gleichung ist nach MAJOR (2000) sowohl für gravitations-bedingte, als auch für die durch äußere Umstände ausgelöste Konsolidierung gültig.

Weiters gilt es noch die Anfangs- und die Randbedingungen festzulegen. Diese sind im Rahmen dieser Masterarbeit leicht zu definieren und ähnlich den Experimenten von MAJOR (2000):

- die Flüssigkeit kann nach Oben hin entweichen, daraus resultiert:  $P_* = 0$  an der Stelle  $Z = H$  (siehe auch Abbildung 8)
- die Flüssigkeit kann nicht durch den Boden entweichen, da dieser undurchlässig ist, dafür gilt:  $\partial P_*/\partial z = 0$  an der Stelle  $Z = 0$ .

Die eindimensionale Konsolidierungstheorie wird, unter Berücksichtigung der Randbedingungen, wie folgt gelöst (10):

$$P_* = 8P_{*0} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2 \pi^2} \cos(\lambda_n z) e^{-\lambda_n^2 D t} \quad (10)$$

dabei ist  $P_{*0}$  der anfängliche Porenwasserüberdruck zum Zeitpunkt  $t = 0$  und  $\lambda_n$  repräsentiert einen Eigenwert, der dazu dient, die Lösung den Randbedingungen anzupassen (MAJOR, 2000). Diese Gleichung wird mit Hilfe der Fourier-Reihen gelöst.

Im Zuge dieser Masterarbeit wird diese Formel für die Weiterverarbeitung bzw. Auswertung der Ergebnisse genutzt und in Kapitel 4.4 behandelt.

### 3. METHODEN

#### 3.1. SUSPENSIONEN

Im Vorfeld der Versuche wurde versucht, optimale Suspensionen zu entwickeln.

Zu Beginn wurden die Ton-Wasser Suspensionen gemischt. Zur Verfügung standen zwei verschiedene Tonminerale. Einerseits Kaolinit (Zweischicht-Tonmineral) und andererseits Na-Smectit (ein Dreischicht-Tonmineral).

Für jedes Tonmineral wurden vier Mischungen gefunden, eine dickflüssige, eine dünnflüssige und eine dazwischen, sowie eine Extremvariante, welche als sehr dickflüssig bezeichnet werden kann. Diese Mischungen werden mit dem jeweiligen  $C_v$ -Wert (der volumetrischen Sedimentkonzentration) der Flüssigkeit (Ton-Wasser-Suspension) beschrieben. In der folgenden Tabelle 1 können die Zusammensetzungen der Mischungen entnommen werden.

<b>Tonmineral</b>	<b>Verhältnis Ton [g] : Wasser [ml]</b>	<b>Dichte [kg/m<sup>3</sup>]</b>
Kaolinit - $C_{v,f}=0,28$	45:50	1,443
Kaolinit - $C_{v,f}=0,26$	40:50	1,37
Kaolinit - $C_{v,f}=0,21$	30:50	1,24
Kaolinit - $C_{v,f}=0,18$	20:50	1,14
Smectit - $C_{v,f}=0,05$	12,5:100	1,117
Smectit - $C_{v,f}=0,04$	10:100	1,08
Smectit - $C_{v,f}=0,03$	7,5:100	1,042
Smectit - $C_{v,f}=0,02$	5:100	1,001

Tabelle 1: Überblick der Ton-Wasser Suspensionen.

Wie aus der Tabelle ersichtlich wird, sind für die Mischungen mit Smectit weniger Anteile an Tonmineral im Verhältnis zu Wasser nötig, was sich durch die starke Quellfähigkeit des Smectit erklären lässt.

Im nächsten Schritt kommen die gröberen Sedimente dazu. Dafür wurden Sand, ein Bruchkorn (BK) von 2-4 mm und ein Bruchkorn von 4-32 mm gewählt. Es soll in Bezug auf den Grobkornanteil auch je zwei unterschiedliche Mischungen geben. Das bedeutet, dass jede Ton-Wasser-Mischung einmal mit ca. 50 Vol.-% (der gesamten Mischung) Grobanteil und ein weiteres Mal mit ca. 25 Vol.-% Grobanteil vermischt wird. In Tabelle 2 bis Tabelle 9 wird die endgültige Zusammensetzung der **Kaolinit**-Mischungen ersichtlich.

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %	Cv		Cv,t
<b>M0_25% Steine</b>	<b>Sand</b>	3,50%	0,00004	0,80	5,00%	<b>Cv,s</b>	0,25	0,46
	<b>2-4</b>	7,00%	0,00007	1,60	10,00%			
	<b>4-32</b>	14,00%	0,00014	3,20	20,00%			
	<b>Kaolinit</b>	21,00%	0,00021	4,90	30,63%			
	<b>Wasser</b>	54,50%	0,00055	5,50	34,38%			
<b>Σ =</b>		100,00%	0,00100	16,00	100,00%	<b>Cv,f</b>	0,278	

Tabelle 2: Zusammensetzung Mischung 0 mit  $C_{v,f}=0,28$  und 25 Vol% Grobpartikel.

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %	Cv		Cv,t
<b>M0_50% Steine</b>	<b>Sand</b>	7,00%	0,00007	1,60	8,79%	<b>Cv,s</b>	0,49	0,63
	<b>2-4</b>	14,00%	0,00014	3,20	17,57%			
	<b>4-32</b>	28,00%	0,00028	6,40	35,15%			
	<b>Kaolinit</b>	14,00%	0,00014	3,31	18,18%			
	<b>Wasser</b>	37,00%	0,00037	3,70	20,32%			
<b>Σ =</b>		100,00%	0,00100	18,21	100,00%	<b>Cv,f</b>	0,275	

Tabelle 3: Zusammensetzung Mischung 0 mit  $C_{v,f}=0,28$  und 50 Vol% Grobpartikel.

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %	Cv		Cv,t
<b>M1_25% Steine</b>	<b>Sand</b>	3,50%	0,00004	0,80	5,08%	<b>Cv,s</b>	0,25	0,44
	<b>2-4</b>	7,00%	0,00007	1,60	10,16%			
	<b>4-32</b>	14,00%	0,00014	3,20	20,32%			
	<b>Kaolinit</b>	19,50%	0,00020	4,51	28,63%			
	<b>Wasser</b>	56,00%	0,00056	5,64	35,81%			
<b>Σ =</b>		100,00%	0,00100	15,75	100,00%	<b>Cv,f</b>	0,258	

Tabelle 4: Zusammensetzung Mischung 1 mit  $C_{v,f}=0,26$  und 25 Vol% Grobpartikel.

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %
<b>M1_50% Steine</b>	<b>Sand</b>	7,00%	0,00007	1,60	8,87%
	<b>2-4</b>	14,00%	0,00014	3,20	17,74%
	<b>4-32</b>	28,00%	0,00028	6,40	35,48%
	<b>Kaolinit</b>	13,00%	0,00013	3,04	16,85%
	<b>Wasser</b>	38,00%	0,00038	3,80	21,06%
	<b>Σ = 100,00%</b>			0,00100	18,04

<b>Cv</b>		<b>Cv,t</b>
<b>Cv,s</b>	0,49	0,62
<b>Cv,f</b>	0,255	

Tabelle 5: Zusammensetzung Mischung 1 mit  $C_{v,f}=0,26$  und 50 Vol% Grobpartikel.

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %
<b>M2_25% Steine</b>	<b>Sand</b>	3,50%	0,00004	0,80	5,20%
	<b>2-4</b>	7,00%	0,00007	1,60	10,41%
	<b>4-32</b>	14,00%	0,00014	3,20	20,82%
	<b>Kaolinit</b>	16,00%	0,00016	3,80	24,72%
	<b>Wasser</b>	59,50%	0,00060	5,97	38,84%
	<b>Σ = 100,00%</b>			0,00100	15,37

<b>Cv</b>		<b>Cv,t</b>
<b>Cv,s</b>	0,25	0,41
<b>Cv,f</b>	0,212	

Tabelle 6: Zusammensetzung Mischung 2 mit  $C_{v,f}=0,21$  und 25 Vol% Grobpartikel.

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %
<b>M2_50% Steine</b>	<b>Sand</b>	7,00%	0,00007	1,60	8,99%
	<b>2-4</b>	14,00%	0,00014	3,20	17,98%
	<b>4-32</b>	28,00%	0,00028	6,40	35,96%
	<b>Kaolinit</b>	11,00%	0,00011	2,57	14,44%
	<b>Wasser</b>	40,00%	0,00040	4,03	22,64%
	<b>Σ = 100,00%</b>			0,00100	17,80

<b>Cv</b>		<b>Cv,t</b>
<b>Cv,s</b>	0,49	0,60
<b>Cv,f</b>	0,216	

Tabelle 7: Zusammensetzung Mischung 2 mit  $C_{v,f}=0,21$  und 50 Vol% Grobpartikel.

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %
<b>M3_25% Steine</b>	<b>Sand</b>	3,50%	0,00004	0,80	5,34%
	<b>2-4</b>	7,00%	0,00007	1,60	10,69%
	<b>4-32</b>	14,00%	0,00014	3,20	21,38%
	<b>Kaolinit</b>	13,50%	0,00014	3,12	20,84%
	<b>Wasser</b>	62,00%	0,00062	6,25	41,75%
	<b>Σ = 100,00%</b>			0,00100	14,97

<b>Cv</b>		<b>Cv,t</b>
<b>Cv,s</b>	0,25	0,38
<b>Cv,f</b>	0,179	

Tabelle 8: Zusammensetzung Mischung 3 mit  $C_{v,f}=0,18$  und 25 Vol% Grobpartikel.

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %
<b>M3_50% Steine</b>	<b>Sand</b>	7,00%	0,00007	1,60	9,13%
	<b>2-4</b>	14,00%	0,00014	3,20	18,25%
	<b>4-32</b>	28,00%	0,00028	6,40	36,51%
	<b>Kaolinit</b>	9,00%	0,00009	2,11	12,04%
	<b>Wasser</b>	42,00%	0,00042	4,22	24,07%
	<b>Σ = 100,00%</b>			0,00100	17,53

<b>Cv</b>		<b>Cv,t</b>
<b>Cv,s</b>	0,49	0,58
<b>Cv,f</b>	0,176	

Tabelle 9: Zusammensetzung Mischung 3 mit  $C_{v,f}=0,18$  und 50 Vol% Grobpartikel.

In Tabelle 10 bis Tabelle 17 werden die Zusammensetzungen für die **Smectit**-Mischungen dargestellt.

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %
<b>M0_25% Steine</b>	<b>Sand</b>	3,50%	0,00004	0,80	5,84%
	<b>2-4</b>	7,00%	0,00007	1,60	11,68%
	<b>4-32</b>	14,00%	0,00014	3,20	23,36%
	<b>Smectit</b>	3,50%	0,00004	0,90	6,57%
	<b>Wasser</b>	72,00%	0,00072	7,20	52,55%
	<b>Σ = 100,00%</b>			0,00100	13,70

<b>Cv</b>		<b>Cv,t</b>
<b>Cv,s</b>	0,25	0,28
<b>Cv,f</b>	0,046	

Tabelle 10: Zusammensetzung Mischung 0 mit  $C_{v,f}=0,05$  und 25 Vol% Grobpartikel.

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %
<b>M0_50% Steine</b>	<b>Sand</b>	7,00%	0,00007	1,60	9,58%
	<b>2-4</b>	14,00%	0,00014	3,20	19,16%
	<b>4-32</b>	28,00%	0,00028	6,40	38,32%
	<b>Smectit</b>	2,50%	0,00003	0,60	3,59%
	<b>Wasser</b>	48,50%	0,00049	4,90	29,34%
	<b>Σ = 100,00%</b>			0,00100	16,70

<b>Cv</b>		<b>Cv,t</b>
<b>Cv,s</b>	0,49	0,52
<b>Cv,f</b>	0,049	

Tabelle 11: Zusammensetzung Mischung 0 mit  $C_{v,f}=0,05$  und 50 Vol% Grobpartikel.

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %	Cv		Cv,t
<b>M1_25% Steine</b>	<b>Sand</b>	3,50%	0,00004	0,80	5,87%	<b>Cv,s</b>	0,25	0,28
	<b>2-4</b>	7,00%	0,00007	1,60	11,75%			
	<b>4-32</b>	14,00%	0,00014	3,20	23,49%			
	<b>Smectit</b>	3,00%	0,00003	0,73	5,36%			
	<b>Wasser</b>	72,50%	0,00073	7,29	53,52%	<b>Cv,f</b>	0,040	
	<b>Σ = 100,00%</b>		0,00100	13,62	100,00%			

Tabelle 12: Zusammensetzung Mischung 1 mit  $C_{v,f}=0,04$  und 25 Vol% Grobpartikel.

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %	Cv		Cv,t
<b>M1_50% Steine</b>	<b>Sand</b>	7,00%	0,00007	1,60	9,63%	<b>Cv,s</b>	0,49	0,51
	<b>2-4</b>	14,00%	0,00014	3,20	19,27%			
	<b>4-32</b>	28,00%	0,00028	6,40	38,53%			
	<b>Smectit</b>	2,00%	0,00002	0,49	2,95%			
	<b>Wasser</b>	49,00%	0,00049	4,92	29,62%	<b>Cv,f</b>	0,039	
	<b>Σ = 100,00%</b>		0,00100	16,61	100,00%			

Tabelle 13: Zusammensetzung Mischung 1 mit  $C_{v,f}=0,04$  und 50 Vol% Grobpartikel.

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %	Cv		Cv,t
<b>M2_25% Steine</b>	<b>Sand</b>	3,50%	0,00004	0,80	5,94%	<b>Cv,s</b>	0,25	0,27
	<b>2-4</b>	7,00%	0,00007	1,60	11,88%			
	<b>4-32</b>	14,00%	0,00014	3,20	23,76%			
	<b>Smectit</b>	2,00%	0,00002	0,49	3,64%			
	<b>Wasser</b>	73,50%	0,00074	7,38	54,79%	<b>Cv,f</b>	0,026	
	<b>Σ = 100,00%</b>		0,00100	13,47	100,00%			

Tabelle 14: Zusammensetzung Mischung 2 mit  $C_{v,f}=0,03$  und 25 Vol% Grobpartikel.

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %	Cv		Cv,t
<b>M2_50% Steine</b>	<b>Sand</b>	7,00%	0,00007	1,60	9,69%	<b>Cv,s</b>	0,49	0,5
	<b>2-4</b>	14,00%	0,00014	3,20	19,37%			
	<b>4-32</b>	28,00%	0,00028	6,40	38,74%			
	<b>Smectit</b>	1,40%	0,00001	0,33	2,00%			
	<b>Wasser</b>	49,60%	0,00050	4,99	30,21%	<b>Cv,f</b>	0,027	
	<b>Σ = 100,00%</b>		0,00100	16,52	100,00%			

Tabelle 15: Zusammensetzung Mischung 2 mit  $C_{v,f}=0,03$  und 50 Vol% Grobpartikel.

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %	Cv		Cv,t
<b>M3_25% Steine</b>	<b>Sand</b>	3,50%	0,00004	0,80	5,97%	<b>Cv,s</b>	0,25	0,26
	<b>2-4</b>	7,00%	0,00007	1,60	11,93%			
	<b>4-32</b>	14,00%	0,00014	3,20	23,86%			
	<b>Smectit</b>	1,50%	0,00002	0,37	2,76%			
	<b>Wasser</b>	74,00%	0,00074	7,44	55,48%	<b>Cv,f</b>	0,020	
	<b>Σ = 100,00%</b>			0,00100	13,41	100,00%		

Tabelle 16: Zusammensetzung Mischung 3 mit  $C_{v,f}=0,02$  und 25 Vol% Grobpartikel.

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %	Cv		Cv,t
<b>M3_50% Steine</b>	<b>Sand</b>	7,00%	0,00007	1,60	9,71%	<b>Cv,s</b>	0,49	0,5
	<b>2-4</b>	14,00%	0,00014	3,20	19,43%			
	<b>4-32</b>	28,00%	0,00028	6,40	38,86%			
	<b>Smectit</b>	1,00%	0,00001	0,25	1,52%			
	<b>Wasser</b>	50,00%	0,00050	5,02	30,48%	<b>Cv,f</b>	0,020	
	<b>Σ = 100,00%</b>			0,00100	16,47	100,00%		

Tabelle 17: Zusammensetzung Mischung 3 mit  $C_{v,f}=0,02$  und 50 Vol% Grobpartikel.

Mit diesen zusammengestellten Mischungen werden die Versuche in der Versuchsanlage durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Kapitel 4.2 beschrieben.

Zusätzlich haben zwei Bakkalaureats-Studenten LAMPLMAIR und EDER (2014) die gleichen Versuche mit anderen Mischungen durchgeführt. Anstatt der Tonminerale wurde Stober Lehm verwendet. Diese Mischungen sind wie folgt (siehe Tabelle 18 bis Tabelle 23) zusammengesetzt:

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %	Cv		Cv,t
<b>Grundmischung</b>	<b>Sand</b>	5,97%	0,00050	1,34	8,00%	<b>Cv,s</b>	0,42	0,597
	<b>2-4</b>	11,94%	0,00100	2,69	16,00%			
	<b>0-32</b>	23,88%	0,00199	5,38	32,00%			
	<b>Stober Lehm</b>	17,91%	0,00149	4,03	24,00%	<b>Cv,f</b>	0,308	
	<b>Wasser</b>	40,30%	0,00336	3,36	20,00%			
	<b>Σ =</b>	100,00%	0,00834	16,80	100,00%			

Tabelle 18: Zusammenstellung der Grundmischung mit  $C_{v,f}=0,31$  (Lamplmair und Eder, 2014).

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %	Cv		Cv,t
<b>Grob</b>	<b>Sand</b>	5,97%	0,00050	1,34	9,42%	<b>Cv,s</b>	0,42	0,418
	<b>2-4</b>	11,94%	0,00100	2,69	18,85%			
	<b>0-32</b>	23,88%	0,00199	5,38	37,70%			
	<b>Stober Lehm</b>	0,00%	0,00000	0,00	0,00%	<b>Cv,f</b>	0,000	
	<b>Wasser</b>	58,21%	0,00485	4,85	34,03%			
	<b>Σ =</b>	100,00%	0,00834	14,26	100,00%			

Tabelle 19: Zusammenstellung der Mischung ohne Lehm mit  $C_{v,f}=0,00$  (Lamplmair und Eder, 2014).

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %	Cv		Cv,t
<b>Fein</b>	<b>Sand</b>	0,00%	0,00000	0,00	0,00%	<b>Cv,s</b>	0	0,308
	<b>2-4</b>	0,00%	0,00000	0,00	0,00%			
	<b>0-32</b>	0,00%	0,00000	0,00	0,00%			
	<b>Stober Lehm</b>	30,77%	0,00257	6,93	54,55%	<b>Cv,f</b>	0,308	
	<b>Wasser</b>	69,23%	0,00577	5,77	45,45%			
	<b>Σ =</b>	100,00%	0,00834	12,70	100,00%			

Tabelle 20: Zusammenstellung der Mischung ohne grobe Partikel mit  $C_{v,f}=0,31$  (Lamplmair und Eder, 2014).

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %	Cv		Cv,t
Anteil Stober Lehm 3/4	Sand	5,97%	0,00050	1,34	8,31%	Cv,s	0,42	0,55 2
	2-4	11,94%	0,00100	2,69	16,63%			
	0-32	23,88%	0,00199	5,38	33,26%	Cv,f	0,23 1	
	Stober Lehm	13,43%	0,00112	3,02	18,71%			
	Wasser	44,78%	0,00373	3,73	23,10%			
	Σ =		100,00%	0,00834	16,17	100,00%		

Tabelle 21: Zusammenstellung der Mischung mit 75% Lehm mit  $C_{v,f}=0,23$  (Lamplmair und Eder, 2014).

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %	Cv		Cv,t
Anteil Stober Lehm 1/2	Sand	5,97%	0,00050	1,34	8,65%	Cv,s	0,42	0,507
	2-4	11,94%	0,00100	2,69	17,31%			
	0-32	23,88%	0,00199	5,38	34,61%	Cv,f	0,154	
	Stober Lehm	8,96%	0,00075	2,02	12,98%			
	Wasser	49,26%	0,00411	4,11	26,44%			
	Σ =		100,00%	0,00834	15,53	100,00%		

Tabelle 22: Zusammenstellung der Mischung mit 50% Lehm mit  $C_{v,f}=0,15$  (Lamplmair und Eder, 2014).

		Vol. / %	Vol. / m <sup>3</sup>	m / kg	m / %	Cv		Cv,t
Anteil Stober Lehm 1/4	Sand	5,97%	0,00050	1,34	9,02%	Cv,s	0,42	0,463
	2-4	11,94%	0,00100	2,69	18,04%			
	0-32	23,88%	0,00199	5,38	36,09%	Cv,f	0,077	
	Stober Lehm	4,48%	0,00037	1,01	6,77%			
	Wasser	53,73%	0,00448	4,48	30,08%			
	Σ =		100,00%	0,00834	14,90	100,00%		

Tabelle 23: Zusammenstellung der Mischung mit 25% Lehm mit  $C_{v,f}=0,08$  (Lamplmair und Eder, 2014).

Die Ergebnisse der mit diesen Mischungen durchgeführten Versuche, werden ebenfalls in Kapitel 4.3 beschrieben.

### 3.2. RHEOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN MITTELS VISKOMETER

Eine rheologische Untersuchung mittels Viskometer dient dazu, Informationen über das Fließverhalten einer Flüssigkeit, in diesem Fall einer Tonsuspension, zu gewinnen.



Abbildung 9: Bohlin Visco 88.

Beim Messverfahren mit dem verwendeten konzentrischen Zylinderviscometer (Bohlin Visco 88, siehe Abbildung 9) wird die zu untersuchende Suspension zwischen zwei Flächen, also im engen Zwischenraum der zwei konzentrischen Zylinder, geschert. Wird einer der beiden Zylinder in Rotation versetzt, so wirkt auf Grund des Widerstandes der Flüssigkeit gegen die Rotation ein Drehmoment auf den anderen Zylinder. Wie stark dieses Drehmoment auf den ruhigen Zylinder einwirkt hängt von der Viskosität der Flüssigkeit ab (zähere Flüssigkeiten verursachen größere Drehmomente) (LAGALY et al., 1997). Das bedeutet, dass bei der gegenseitigen Verschiebung der Flächen unter der Wirkung einer Kraft ein Geschwindigkeitsgefälle entsteht, nämlich die Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  (siehe Abbildung 10). Der Geschwindigkeitsbereich ist so zu definieren, dass die verursachte Strömung laminar bleibt und nicht turbulent wird. Somit ist die

Schubspannung  $\tau$  zur Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  proportional (11) und wird, solange das Verhältnis proportional bleibt, als newtonisches Fließen bezeichnet:

$$\tau = \eta * \dot{\gamma} \quad (11)$$

Die Proportionalitätskonstante  $\eta$  wird als Viskosität bezeichnet (JASMUND und LAGALY, 1993). Die Viskosität beschreibt also den Widerstand, den ein System dem Fließvorgang entgegensetzt (LAGALY et al., 1997).

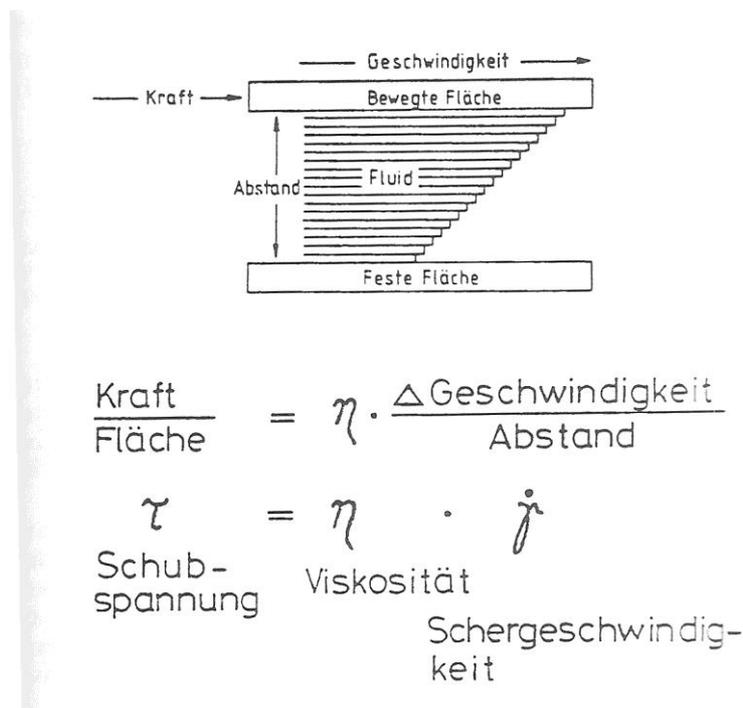


Abbildung 10: Darstellung der Viskosität bei laminarer Strömung (Quelle: Jasmund und Lagaly, 1993, Seite 121).

Im Allgemeinen fließen Suspensionen mit Tonmineralien nur bei niedrigen Massenanteilen newtonisch. Bei höheren Konzentrationen der Tonmineralien wird das Fließverhalten eher pseudoplastisch oder sogar plastisch, wenn die Fließgrenze auftritt (JASMUND und LAGALY, 1993).

Die Ergebnisse der Viskosimetermessungen sind in Kapitel 4.1 erläutert.

### 3.3. VERSUCHSAUFBAU DRUCKMESSUNGEN

Die Versuchsanlage besteht aus einem Plexiglas-Zylinder mit einem inneren Durchmesser von 18,9 cm. Der Ganze Aufbau ist an einem Tisch so montiert, dass ein kippen des Zylinders möglich ist. Diese Form und der Aufbau der Versuchsanlage ist optimal für das Messen der Drücke in verschiedenen Höhen. Die Möglichkeit des Kippens der Röhre erleichterte das Reinigen nach jeder Messung. Oben ist der Zylinder offen und unten mit einem abnehmbaren Deckel dicht verschlossen (siehe Abbildung 11), wodurch die Versuchsanlage für Flüssigkeiten undurchlässig wird. In diesem Deckel sind außerdem ein Wasserablass und ein Drucksensor (Sensor 4) eingebaut. Zwei weitere Drucksensoren sind seitlich, in einer Höhe von 5 cm (Sensor 3) und 20 cm (Sensor 1), in den Zylinder eingebaut (siehe Abbildung 12). Die Messungen des seitlich eingebauten Sensors auf 5 cm Höhe (Sensor 3) wurden bei den Auswertungen nicht berücksichtigt, da dieser Sensor nicht richtig funktionierte. Die Werte des Sensor 1 werden zwar teils mit in den Diagrammen dargestellt, für die Berechnungen werden die Werte aber nicht verwendet, da auch dieser Sensor mit der Zeit verfälschte Werte aufzeichnete (auf Grund von Luftblasen im Ölreservoir).



Abbildung 11: Versuchsanlage.



Abbildung 12: Versuchsanlage mit installierten Drucksensoren.

Die Sensoren 1 und 4 stammen von der Firma KELLER AG für Druckmesstechnik (siehe Abbildung 13) und sind vom Bautyp PR-25Y. Der maximal messbare Druck beträgt 2,5bar mit einer Schwankungsbreite von -0,1 bis 0,1bar.



Abbildung 13: Drucksensor.

Sensor 4 ist unterhalb der Bodenplatte eingebaut und muss somit vor den Versuchen mit Wasser bis zum „Nullniveau“ aufgefüllt werden. Der Sensor 1 ist seitlich oben (auf 20 cm Höhe) angebracht und ist wie in Abbildung 14 und Abbildung 15 zu sehen, an ein Reservoir, welches verschlossen und komplett mit Öl gefüllt ist, angebaut. Am vorderen Ende des Reservoirs ist eine flexible Membran befestigt, welche die Impulse weitergeben kann. Diese Membran wird, durch ein feinmaschiges Metallnetz, vor dem Aufprall der groben Partikel geschützt. Der Wasserdruck kann aber ohne Probleme durch das Metallnetz an die Membran weitergeleitet werden und somit auch an den Drucksensor.

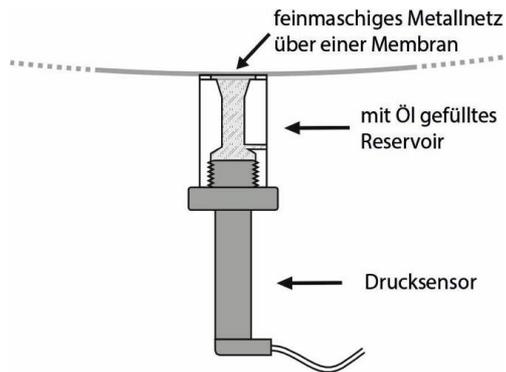


Abbildung 14: Drucksensor in Öl-Reservoir (Quelle: KAITNA).



Abbildung 15: Drucksensor in Öl-Reservoir (Quelle: KAITNA).

Die Aufzeichnung der Daten erfolgte mit der Software Catman, welche die Erfassung, Verarbeitung und Visualisierung der Daten ermöglicht. Zu beachten war aber, den untersten Sensor dementsprechend bis zum „Nullniveau“ mit Wasser anzufüllen und vor jeder Messung die Sensoren auf „Null“ zu stellen. Jede Mischung wurde mit einem Gesamtvolumen von 10 Liter zusammengestellt. Dadurch konnte eine möglichst gleichbleibende Drucksäule bzw. Füllhöhe im Zylinder erreicht werden. Die Messungen wurden in der Regel mit einer Frequenz von 50 Hertz, je eine halbe Stunde lang durchgeführt. Davon ausgenommen sind die sehr dickflüssigen Mischungen für Smectit ( $C_{v,f}=0,05$ ) und Kaolinit ( $C_{v,f}=0,28$ ), welche mit einer Frequenz von 5 Hertz und je drei Stunden lang gemessen wurden.

## 4. RESULTATE

### 4.1. VISKOMETERMESSUNGEN

Die Viskometermessungen wurden mit den verschiedenen Tonmineral-Wasser-Mischungen durchgeführt. Für den Kaolinit und den Smectit gibt es je vier verschieden konzentrierte Mischungen. Die Ergebnisse sind in den folgenden Diagrammen ersichtlich.

Für den Kaolinit wurden alle drei Mischungen mit 50ml Wasser eingerührt. Die dünnste Mischung enthält 20g Kaolinit, die mittlere Mischung 30g, die dickflüssigste Mischung 40g und die sehr dickflüssige Mischung 45g.

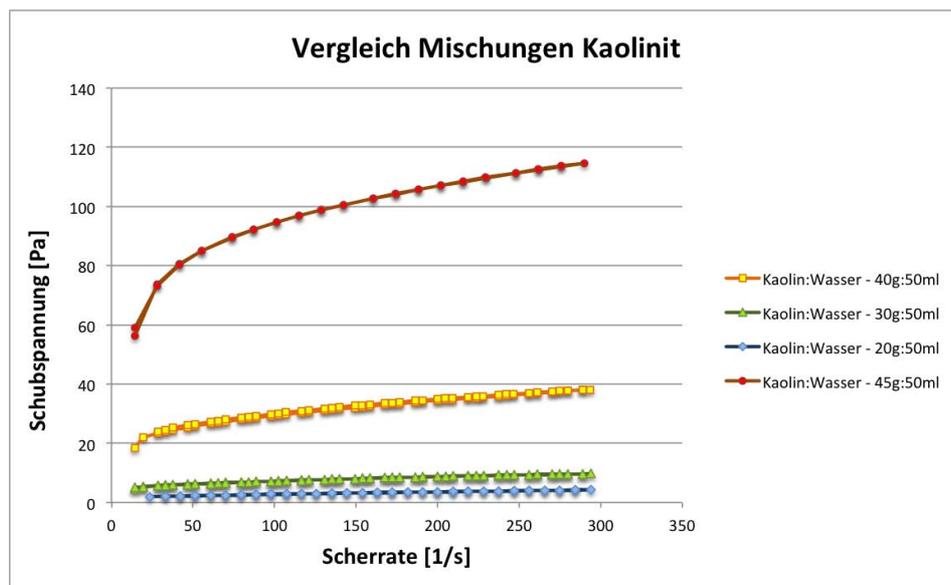


Abbildung 16: Vergleich der Kaolinit-Mischungen.

Wie man aus der Abbildung 16 entnehmen kann, zeigt die Mischungen mit 40g bzw. 45g Kaolinit eine deutlich höhere Schubspannung auf, als die beiden dünneren Mixturen.

Bei den Mischungen mit Smectit wurden jeweils 100ml Wasser verwendet und die Anteile des Tonminerals beschränken sich auf 5g, 7,5g, 10g und 12,5g. Da der Smectit stark quellfähig ist und mit nur wenig Anteil des Tonminerals schnell dickflüssig wird, sind nur so kleine Mengen nötig.

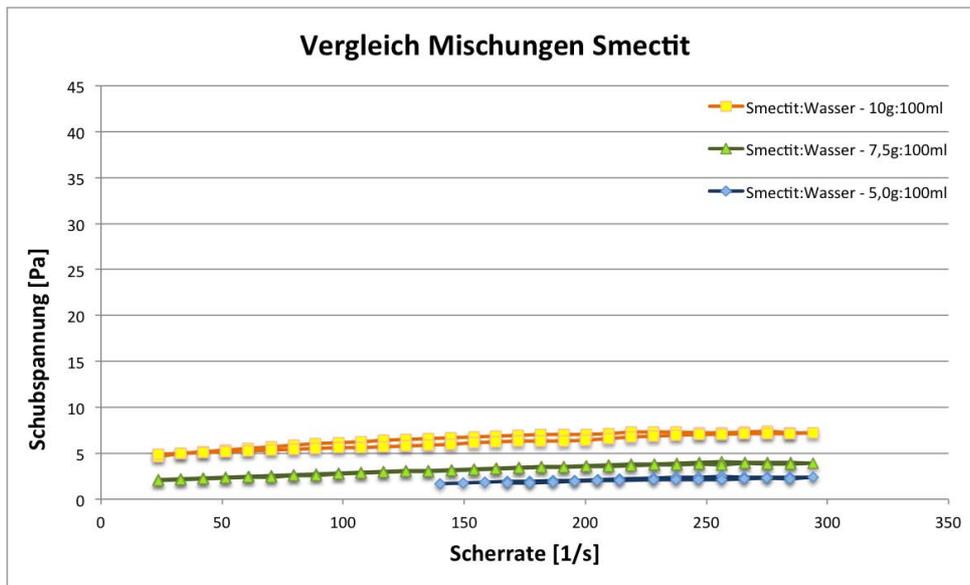


Abbildung 17: Vergleich der Smectit-Mischungen.

Wie Abbildung 17 zeigt ist die Schubspannung der Smectit-Mischungen im Vergleich zu den Kaolinit-Mischungen relativ gering.

Auffallend ist beim Herstellen der Suspensionen, dass der Smectit relativ schnell dickflüssig wird. Rührt man ihn aber neuerlich um, so wird er für kurze Zeit wieder flüssiger. Dies zeigt, dass die Viskosität der Smectit-Mischungen vom Bewegungszustand abhängig ist, was dieses Ergebnis erklärt. Dieses Verhalten einer Flüssigkeit wird auch als thixotrop bezeichnet.

Bei der Verwendung von Smectit in der Technik und vor allem auf Baustellen, wird er meist vor dem Einsatz noch ca. 24 Stunden stehen gelassen, um noch mehr zu quellen. Da für die Versuche auch ein 24 Stunden gequellter Smectit verwendet werden soll, wurden die Viskometerversuche ebenfalls nochmals 24 Stunden später durchgeführt (siehe Abbildung 18).

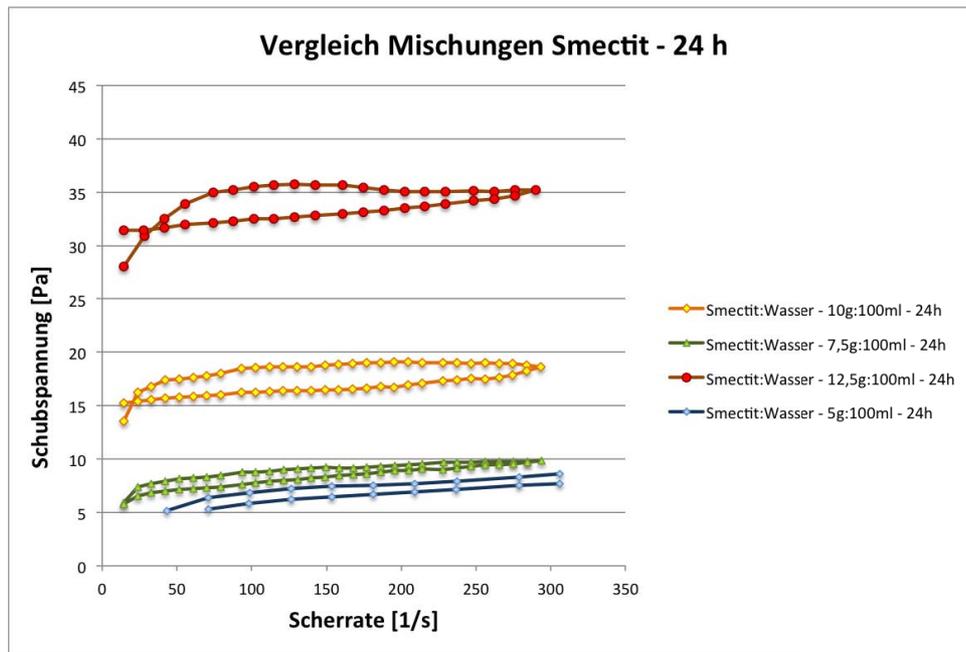


Abbildung 18: Vergleich der Smectit-Mischungen mit 24 Stunden gequollenem Smectit.

Abbildung 18 zeigt deutlich, dass der Smectit, der 24 Stunden zugedeckt stehen gelassen wurde, eine höhere Schubspannung aufweist wie der sofort getestete. Somit werden Annäherungen an die Ergebnisse mit dem Kaolinit erzielt.

In der nachfolgenden Tabelle 24 sind die Werte für die Viskosität und die Grenzscherubspannung der einzelnen Mischungen eingetragen, je einmal für eine Scherrate von 0 bis ca. 50 und ein weiteres Mal für 0 bis ca. 300. Die Werte zu Beginn der Messung (0-50) sind für diese Arbeit interessant, da hier die Schergeschwindigkeit noch gering ist und somit die Viskosität noch höher, genau wie es für die stehende Mischung im Zylinder relevant ist.

Mischungen	$\tau_{\gamma 0-50}$ [N/m <sup>2</sup> ]	$\mu_{0-50}$ [Ns/m <sup>2</sup> ]	$\tau_{\gamma 0-300}$ [N/m <sup>2</sup> ]	$\mu_{0-300}$ [Ns/m <sup>2</sup> ]
Kaolinit - C <sub>v,f</sub> =0,28	57,333	1,3547	73,345	0,1632
Kaolinit - C <sub>v,f</sub> =0,26	17,246	0,6995	23,5	0,0545
Kaolinit - C <sub>v,f</sub> =0,21	4,4009	0,1582	5,5449	0,0156
Kaolinit - C <sub>v,f</sub> =0,18	1,7069	0,0448	1,9088	0,0083
Smectit - C <sub>v,f</sub> =0,05	27,208	0,628	31,803	0,013
Smectit - C <sub>v,f</sub> =0,04	13,654	0,3848	16,002	0,0097
Smectit - C <sub>v,f</sub> =0,03	5,6459	0,2015	6,9637	0,0107
Smectit - C <sub>v,f</sub> =0,02	4,358	0,0697	5,7717	0,0098

Tabelle 24: Überblick über die Werte der Grenzschubspannungen und die Viskosität der einzelnen Mischungen, je von einer Schergeschwindigkeit von 0-50s<sup>-1</sup> und einer Schergeschwindigkeit von 0-300s<sup>-1</sup>.

## 4.2. ABSINKVERHALTEN DER WASSER-TON-SUSPENSIONEN

Das Absinkverhalten der Tonpartikel im Wasser ist sehr interessant zu beobachten, da das Verhalten bei Kaolinit und Smectit sehr unterschiedlich ist.

Beim Kaolinit haben sich die Tonpartikel über längere Zeit (2-3 Tage) abgesetzt und oberhalb hat sich ein Wasserfilm gebildet (siehe Abbildung 19 und Abbildung 20).



Abbildung 19: Kaolinit  $C_{v,f}=0,21$ .



Abbildung 20: Kaolinit  $C_{v,f}=0,26$ .

Beim Smectit hingegen haben sich keine Partikel abgesetzt. Der Smectit verbindet sich mit dem Wasser und quillt, sodass sich die einzelnen Partikel nicht mehr absetzen (siehe Abbildung 21 und Abbildung 22). Die Masse wird zu einer Art Pudding und erst bei Beanspruchung (Mischen, Kippen, etc.) löst sich die Verfestigung. Dieses Verhalten wird wie schon zuvor erwähnt als thixotrop bezeichnet.



Abbildung 21: Smectit  $C_{v,f}=0,02$ .



Abbildung 22: Smectit  $C_{v,f}=0,04$ .

### 4.3. DRUCKMESSUNGEN

Für jede der zwölf Mischungen wird die Verteilung der Drücke über die Zeit gemessen und jede Messung in Form eines Diagrammes ausgewertet. Es werden aber nur ausgewählte Diagramme dargestellt, um einen kurzen Einblick zu geben. Die restlichen Diagramme sind im Anhang zu finden.

Die Messdauer für jede Messung beträgt ca. 1800 Sekunden, das entspricht etwa einer halben Stunde. Dargestellt werden jeweils ein Diagramm mit dem Druckverlauf und ein Diagramm, das das Druckverhältnis zum hydrostatischen Druck der Mischung herstellt. Die dazu angegebenen Werte (zur besseren Übersicht gerundet) zeigen deutlich den abgebauten Druck.

Die folgenden vier Diagramme stellen die Messungen der jeweils dickflüssigen Mischungen, mit einem Anteil von 25% groben Partikeln, dar. In Abbildung 23 und Abbildung 24 sind der Druckverlauf und das Druckverhältnis des absoluten Drucks  $P$  zum hydrostatischen Druck des Fluids  $P_{\text{hyd},f}$  (Kaolinit) zu sehen und in Abbildung 25 und Abbildung 26 dasselbe für den Smectit.

Anfangsdruck: 4770 Pa

abgebauter Druck: 220 Pa

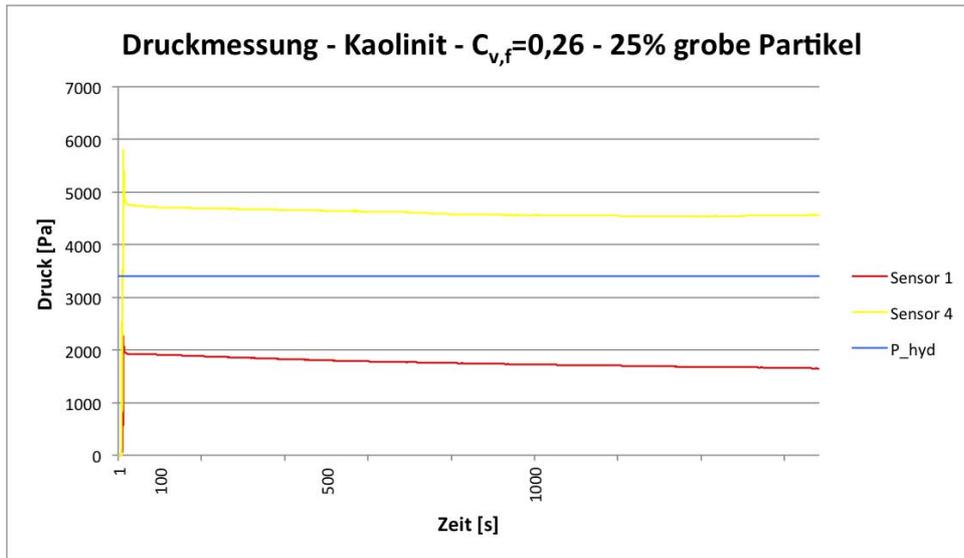


Abbildung 23: Messung des Druckverlaufs für die dickflüssige Mischung des kaolinit mit einem  $C_{v,f}=0,26$  und 25% Anteil an groben Partikeln.

Anfangsdruck: 126 %

abgebauter Druck: 27 %

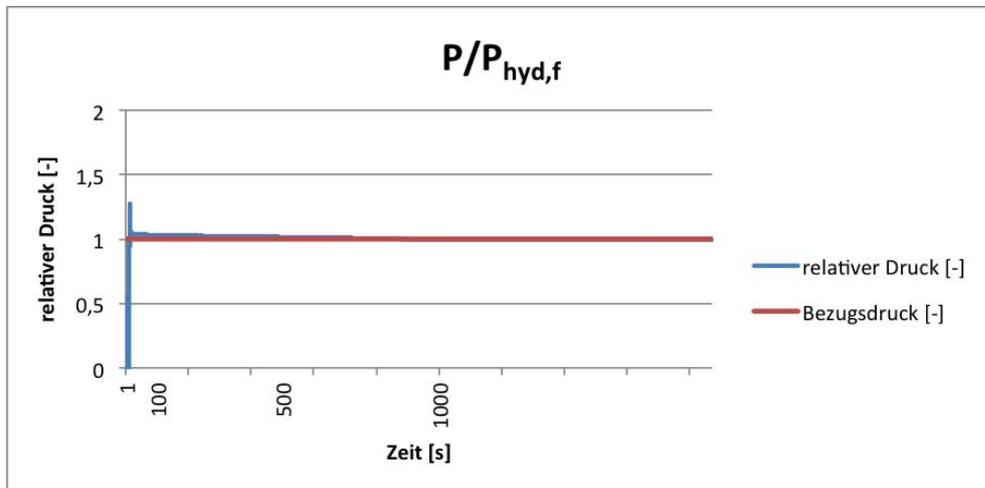


Abbildung 24: Relativer Druck für die dickflüssige Mischung des kaolinit mit einem  $C_{v,f}=0,26$  und 25% Anteil an groben Partikeln.

Anfangsdruck: 4750 Pa

abgebauter Druck: 170 Pa

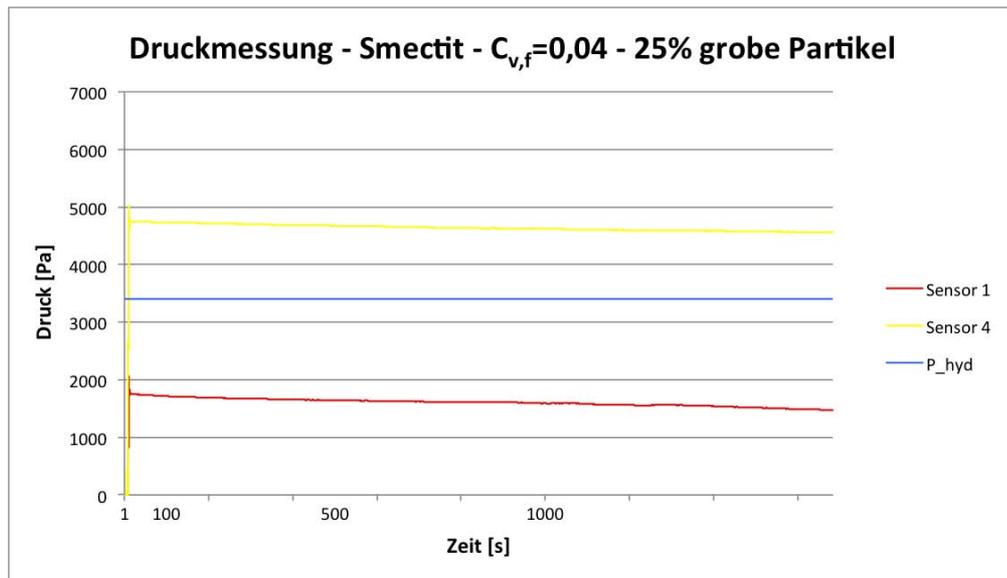


Abbildung 25: Messung des Druckverlaufs für die dickflüssige Mischung des Smectit mit einem  $C_{v,f}=0,04$  und 25% Anteil an groben Partikeln.

Anfangsdruck: 137 %

abgebauter Druck: 11 %

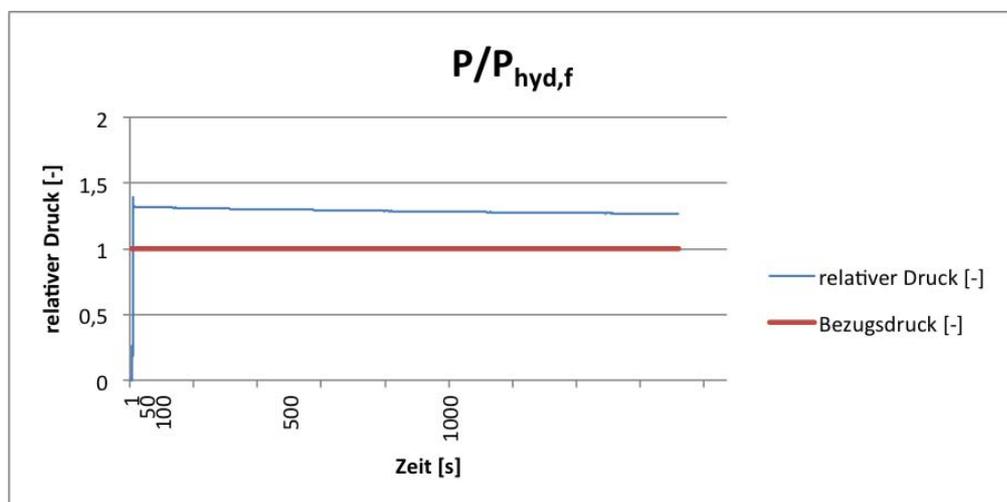


Abbildung 26: Relativer Druck für die dickflüssige Mischung des Smectit mit einem  $C_{v,f}=0,04$  und 25% Anteil an groben Partikeln.

Zum Vergleich werden die Diagramme der selben dickflüssigen Mischungen, aber mit einem Anteil von 50% an groben Partikeln, dargestellt (siehe Abbildung 27 bis Abbildung 30).

Anfangsdruck: 6320 Pa

abgebauter Druck: 100 Pa

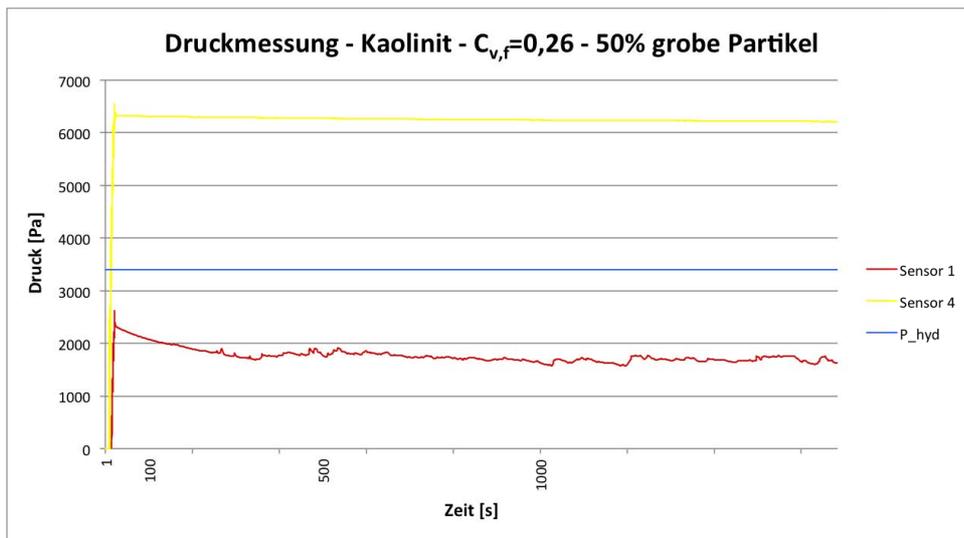


Abbildung 27: Messung des Druckverlaufs für die dickflüssige Mischung des Kaolinit mit einem  $C_{v,f}=0,26$  und 50% Anteil an groben Partikeln.

Anfangsdruck: 143 %

abgebauter Druck: 8 %

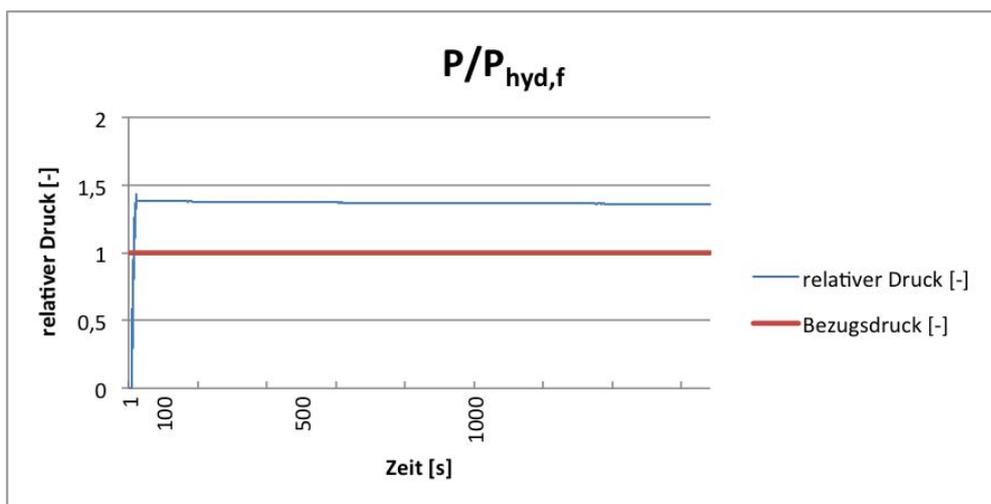


Abbildung 28: Relativer Druck für die dickflüssige Mischung des Kaolinit mit einem  $C_{v,f}=0,26$  und 50% Anteil an groben Partikeln.

Anfangsdruck: 5920 Pa

abgebauter Druck: 50 Pa

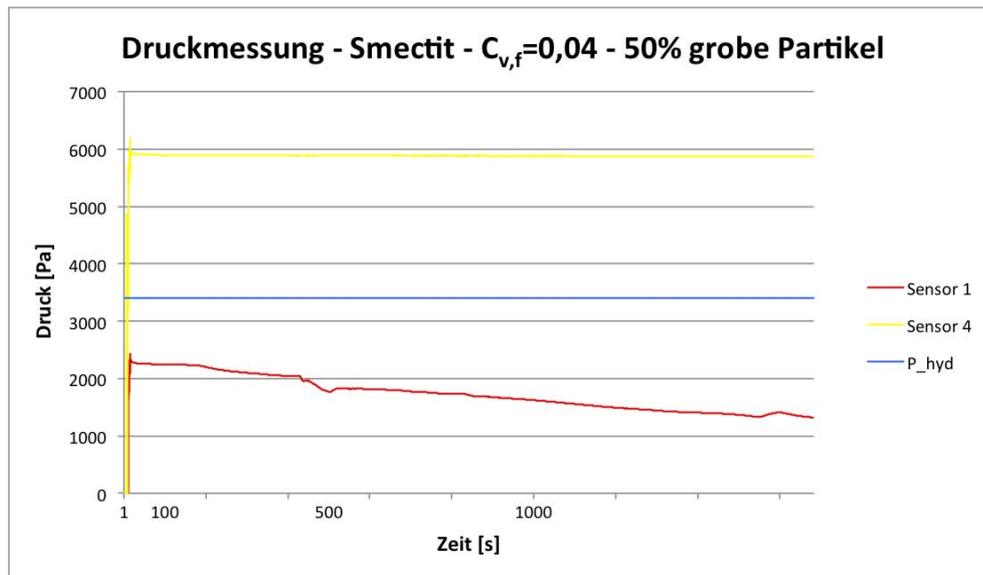


Abbildung 29: Messung des Druckverlaufs für die dickflüssige Mischung des Smectit mit einem  $C_{v,f}=0,04$  und 50% Anteil an groben Partikeln.

Anfangsdruck: 165 %

abgebauter Druck: 3 %

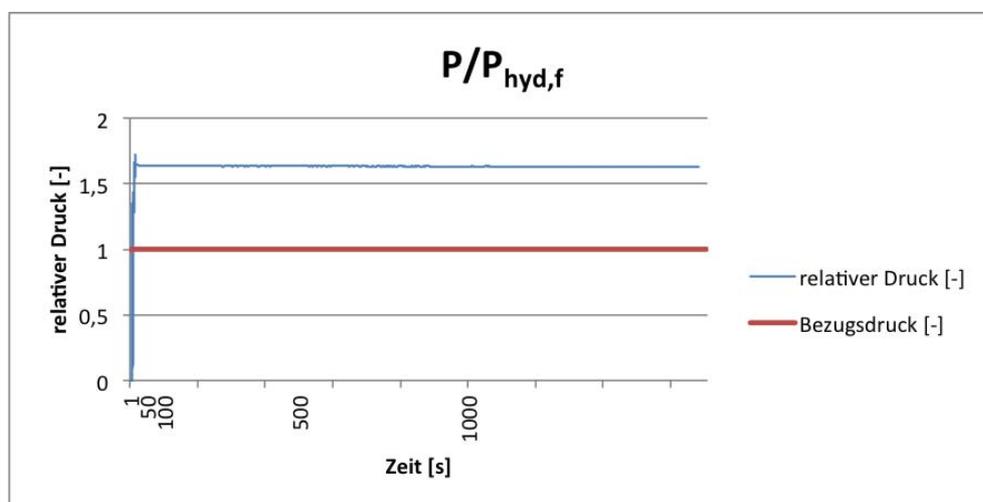


Abbildung 30: Relativer Druck für die dickflüssige Mischung des Smectit mit einem  $C_{v,f}=0,04$  und 50% Anteil an groben Partikeln.

In der folgenden Abbildung 31 soll zusammenfassend ein Überblick über den mittleren Anfangsdruck jeder einzelnen Mischung gegeben werden.

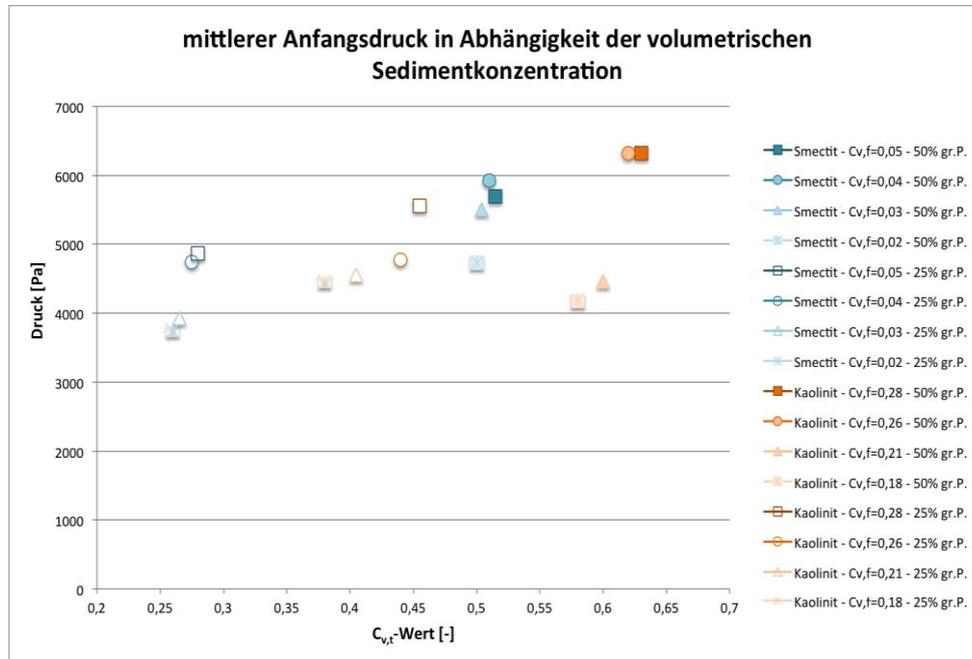


Abbildung 31: Mittlerer Anfangsdruck jeder Mischung.

Die Verteilung der mittleren Anfangsdrücke zeigt deutlich, dass jene Mischungen mit einem hohem C<sub>v,t</sub>-Wert (volumetrischen Sedimentkonzentration der gesamten Mischung) auch einen hohen Anfangsdruck aufweisen. Ebenfalls zu erkennen ist, dass die Kaolinit-Mischungen sowohl einen höheren C<sub>v,t</sub>-Wert (auf Grund des höheren Tongehalts) als auch einen höheren mittleren Anfangsdruck aufweisen als die Smectit-Mischungen (siehe Abbildung 31).

Die Versuchsergebnisse der zwei Bakkalaureats-Studenten (LAMPLMAIR und EDER, 2014), die die gleichen Versuche mit anderen Mischungen durchgeführt haben, sind in Abbildung 32 dargestellt. Dabei wurde Stoober Lehm verwendet. Es wurden folgende Mischungen zusammengesetzt:

- eine breiige, murartige Mischung („Grundmischung“)
- eine Mischung mit nur den groben Partikeln und Wasser („Grob“)
- eine Mischung mit nur den feinen Partikeln (Lehm) und Wasser („Fein“)
- und weitere Lehm-Wasser-Suspensionen mit 75 Vol.-%, 50 Vol.-% und 25 Vol.-% Anteil an Lehm.

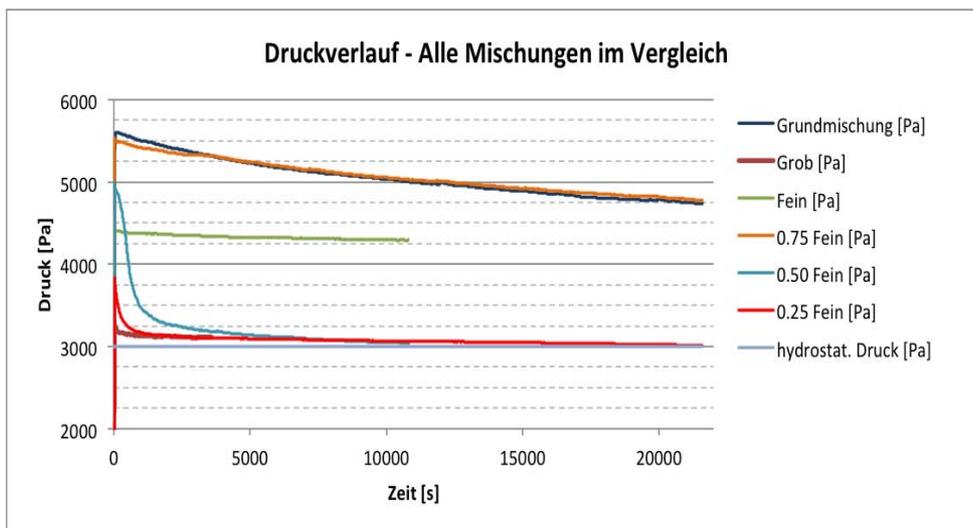


Abbildung 32: Messung der Druckverteilung für die Mischungen mit Stoober Lehm (LAMPLMAIR und EDER, 2014, Seite 17).

Wie in Abbildung 32 zu erkennen ist, bleibt der Druck der Grundmischung und der der 75 Vol.-% Lehm-Mischung lange hoch und sinkt nur langsam konstant ab. Für die flüssigeren Mischungen sinkt der Druck relativ schnell (nach 2-3 Minuten) ab. Somit können Mischungen mit höherer Viskosität bzw. höherer Dichte den Druck länger hoch halten.

Auch für diese Mischungen wurde der mittlere Anfangsdruck ermittelt und der volumetrischen Sedimentkonzentration  $C_{v,t}$  gegen übergestellt (siehe Abbildung 33).

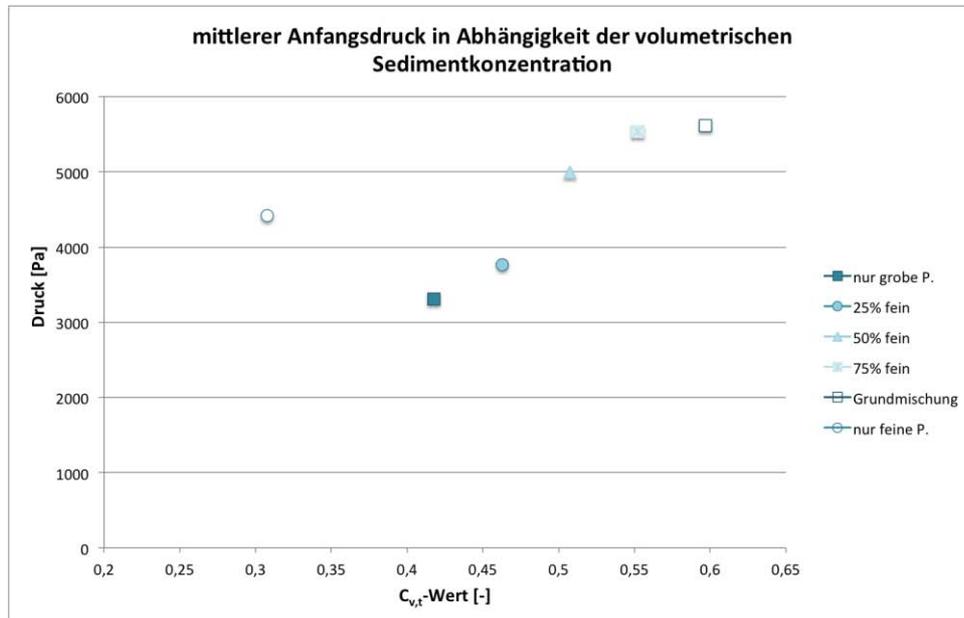


Abbildung 33: mittlerer Anfangsdruck der Mischungen mit Stoober Lehm.

Wie in Abbildung 33 gut zu erkennen ist, steigt der mittlere Anfangsdruck mit zunehmender Sedimentkonzentration. Allein die Mischung mit dem fehlenden Grobanteil der Partikel („nur feine P.“) reißt auf Grund der deutlich geringeren Sedimentkonzentration aus.

#### 4.4. VERÄNDERUNG DES PORENWASSERÜBERDRUCKS – DER DIFFUSIONS-KOEFFIZIENT

Nachdem der Verlauf des Drucks durch die Messungen ermittelt wurde, gilt es nun zu analysieren wie sich der Druck verändert hat und warum bzw. durch welche Faktoren.

Um die Veränderung des Druckverlaufes zu definieren, wird der Diffusions-Koeffizient nach MAJOR (2000) (siehe Kapitel 2.3 und 2.4) heran gezogen.

Die einzige Unbekannte in der Lösung der eindimensionalen Konsolidierungstheorie (10) ist der Diffusions-Koeffizient  $D$ , für  $P_{*0}$  wird der Wert des gemessenen, anfänglichen Porenwasserüberdrucks eingesetzt.

Durch die Wahl von  $D$  kann die Kurve der berechneten Werte bzw. des mathematischen Modells so angepasst werden, dass sich diese an die Kurve der gemessenen Werte annähert. Die Werte für den Diffusions-Koeffizienten sind sehr sensitiv und bewegen sich (nach den im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen) in einer Bandbreite von  $10^{-5}$  bis  $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Der Wert für den Diffusionskoeffizienten (siehe Formel (8)) verringert sich mit zunehmender Viskosität  $\mu$  der Mischungen. Dieser Zusammenhang kann durch die nachfolgenden Diagramme (siehe Abbildungen 34 bis 41) bestätigt werden.

Diese Diagramme wurden einerseits auf Grundlage des hydrostatischen Drucks des reinen Wassers und andererseits des hydrostatischen Drucks des Fluids, also der Wasser-Ton-Mischung berechnet. Die folgenden Diagramme zeigen die Ergebnisse der Kaolinit Mischungen mit 25 Vol.-% Anteil an groben Partikeln und auf Grundlage des hydrostatischen Wasserdrucks. Zuerst wird immer das eingezoomte Diagramm gezeigt und danach das gleiche Diagramm im Vergleich zum hydrostatischen Druck (dabei kann die Kurve des gemessenen Drucks hinter der des mathematischen Modells liegen). Die restlichen Diagramme sind im Anhang bzw. auf der beigelegten Daten-CD zu finden.

$$D = 5,5 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

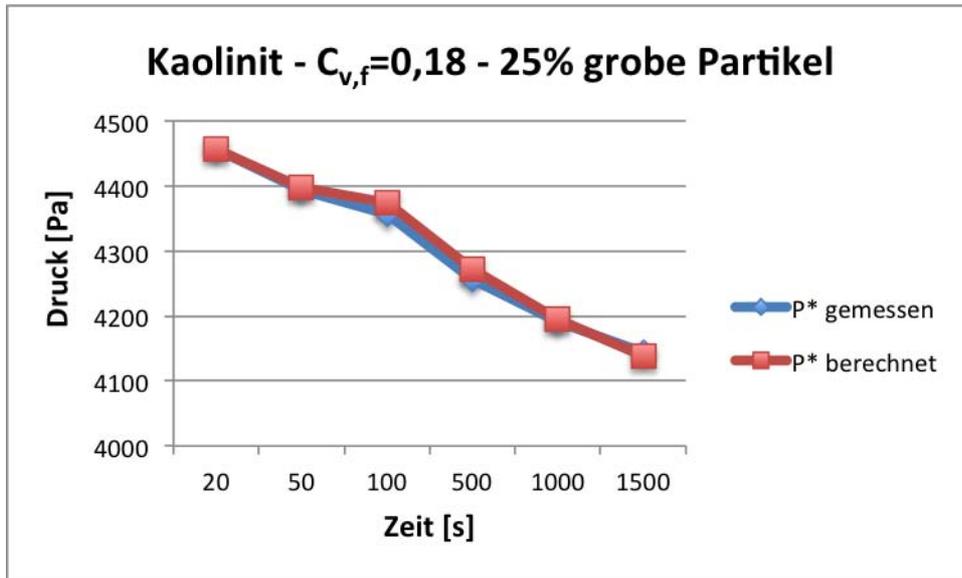


Abbildung 34: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells.

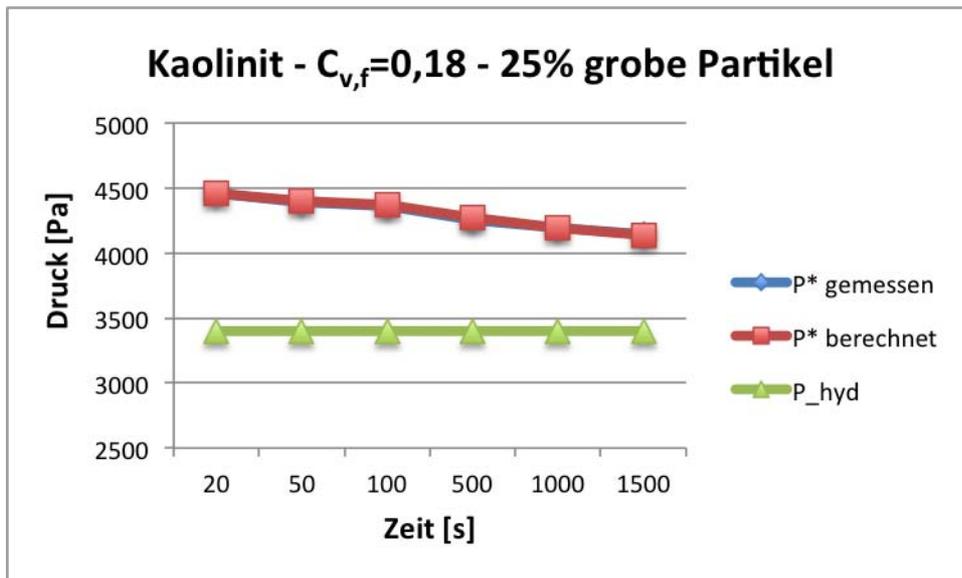


Abbildung 35: Überblick mit hydrostatischem Wasserdruck.

Der Diffusions-Koeffizient für die dünnflüssige Mischung des Kaolinit  $C_{v,f}=0,18$  ist mit einem Wert von  $5,5 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  eher hoch, was bedeutet, dass die Partikel schneller absinken und somit der Porenwasserüberdruck schneller abgebaut wird. Dieser Effekt setzt nach ca. drei Minuten ein.

$$D = 2,7 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

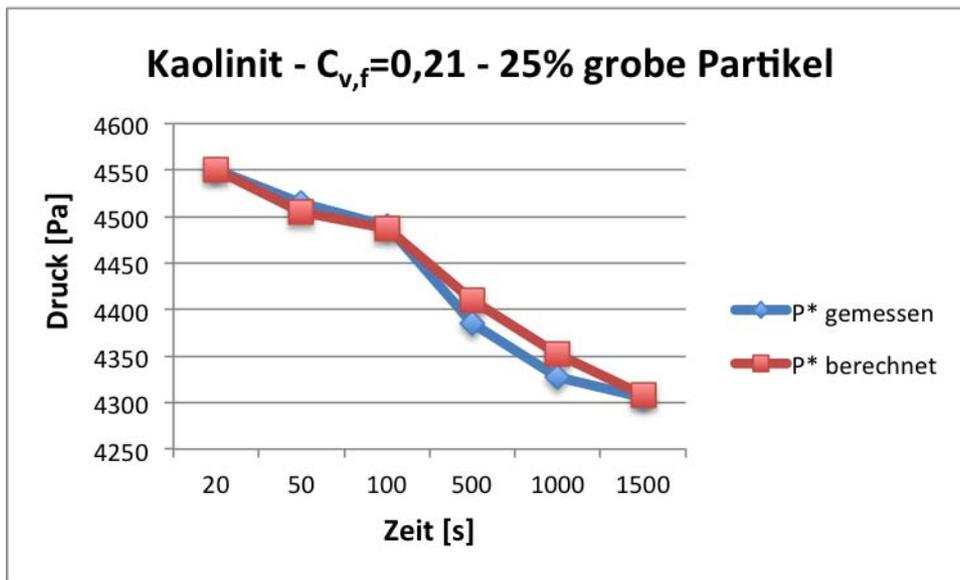


Abbildung 36: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells.

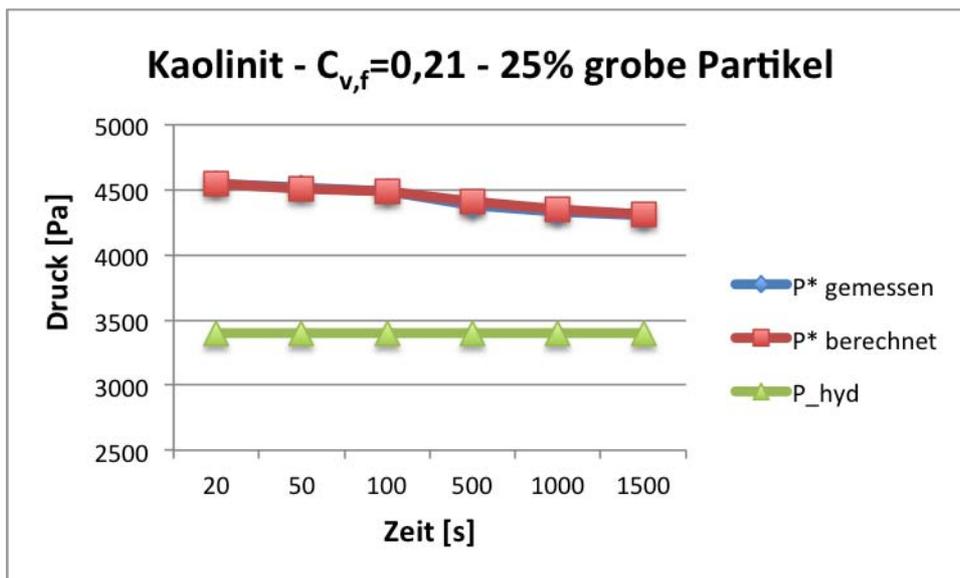


Abbildung 37: Überblick mit hydrostatischem Wasserdruck.

Für die mittlere Mischung des Kaolinit  $C_{v,f}=0,21$  ist der D-Wert mit  $2,7 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  kaum erwähnenswert größer geworden.

$$D = 9 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

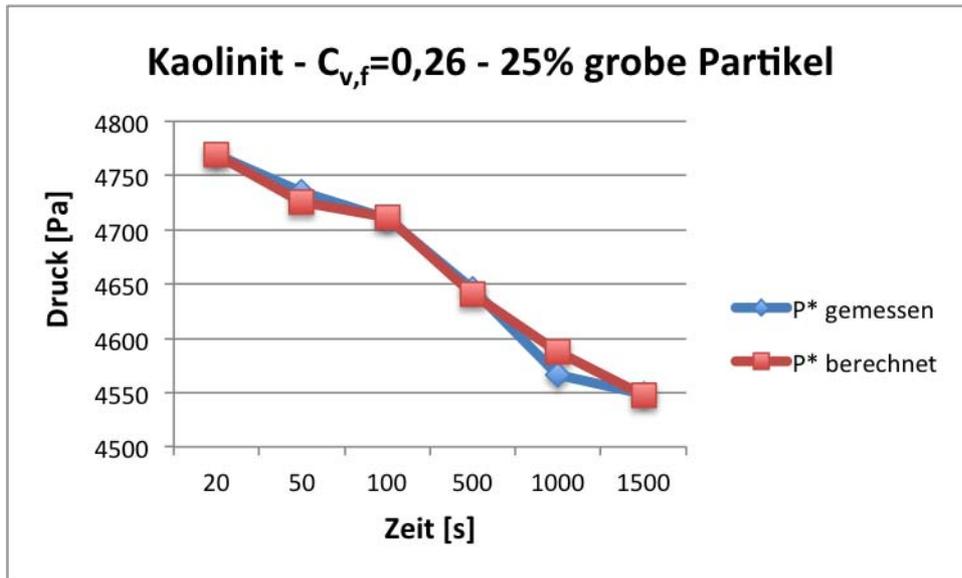


Abbildung 38: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells.

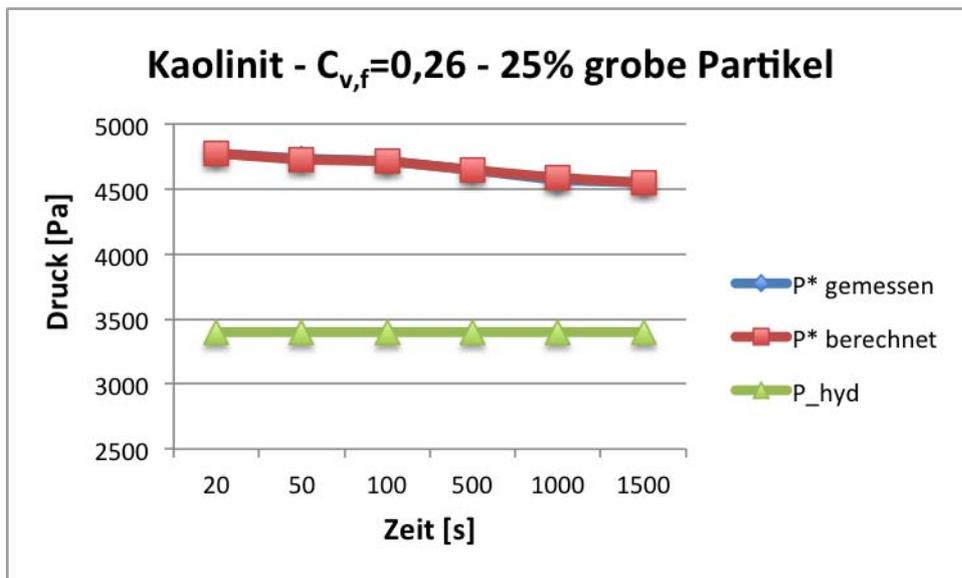


Abbildung 39: Überblick mit hydrostatischem Wasserdruck.

Bei der dickflüssigen Mischung des Kaolinit  $C_{v,f}=0,26$  ist der D-Wert mit  $9 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  schon kleiner geworden. Das bedeutet, dass sich der Porenwasserüberdruck schon etwas langsamer abgebaut wird.

$$D = 7,5 * 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$$

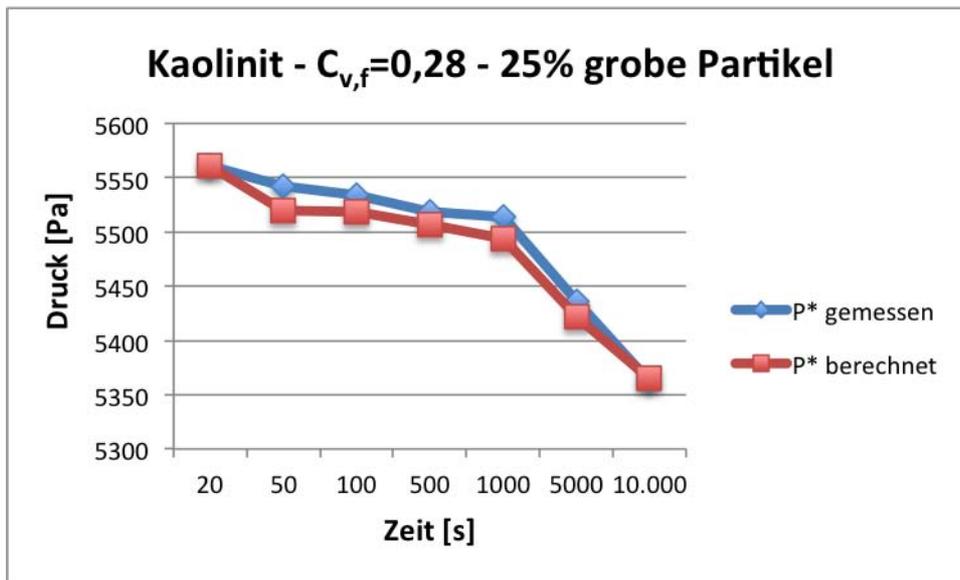


Abbildung 40: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells.

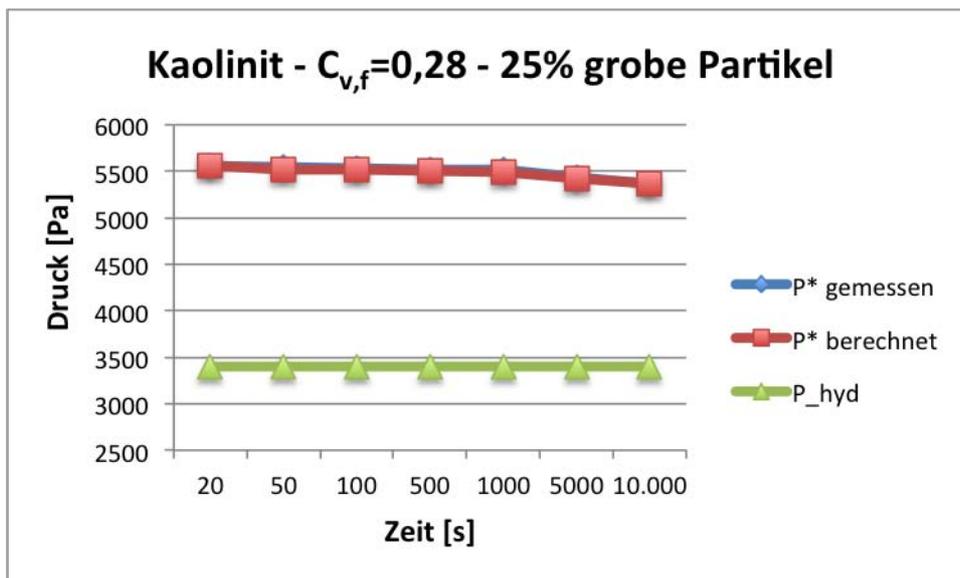


Abbildung 41: Überblick mit hydrostatischem Wasserdruck.

Die sehr dickflüssige Mischung des Kaolinit  $C_{v,f}=0,28$  hat den D-Wert von  $7,5*10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ . Dieser Wert hat sich wieder deutlich verringert und auch aus Abbildung 40 ist zu entnehmen, dass sich der Porenwasserüberdruck erst später (nach ca. 15 Minuten) abbaut.

Vergleicht man alle diese Diagramme, ist zu erkennen, dass der Diffusionskoeffizient kleiner wird, je dickflüssiger die Wasser-Ton-Mischung wird bzw. je höher dessen Viskosität ist. Dies bestätigt die Formel für den Diffusions-Koeffizienten  $D$  (8).

Die Diagramme für die restlichen Berechnungen (Kaolinit – 50%, Smectit – 25% und Smectit – 50%) sind aus Gründen der Übersichtlichkeit im Anhang zu finden.

In den zuvor gezeigten Diagrammen passen die Werte des math. Modells sehr gut zu den gemessenen Werten. Es gibt allerdings auch Fälle, wo diese nicht so gut passen. Das bedeutet, dass das mathematische Modell nicht immer mit der Realität übereinstimmt (siehe Abbildung 42). Vor allem bei den dickflüssigen Mischungen mit 50 Vol.-% Anteil an groben Partikeln.

$$D = 7 * 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$$

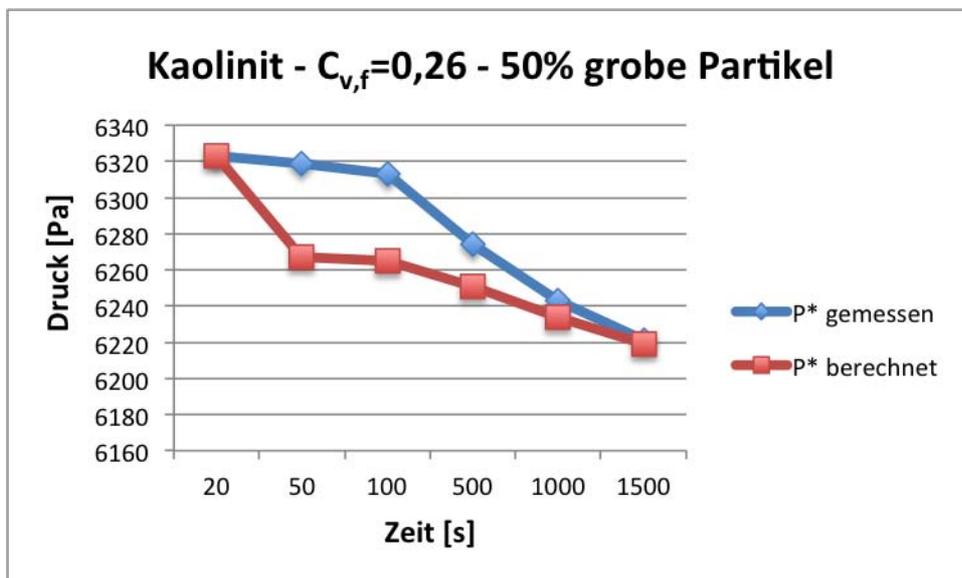


Abbildung 42: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells.

Mit den Messungen von LAMPLMAIR und EDER (2014) wurden ebenfalls die Werte für den Diffusions-Koeffizienten berechnet. Da die dabei verwendeten Mischungen Extremvarianten darstellen, sind auch die D-Werte dementsprechend „extrem“ und zeigen eine deutliche Veränderung auf (siehe Abbildung 43 bis Abbildung 48).

$$D = 3,5 * 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

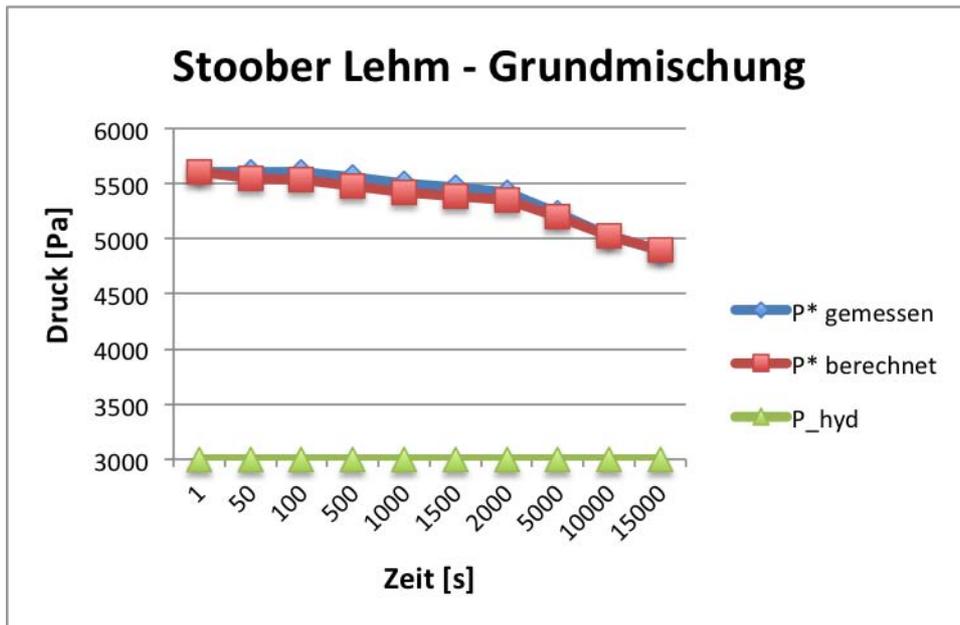


Abbildung 43: Druckverlauf des gemessenen Drucks, Darstellung des mathematischen Modells und der hydrostatische Wasserdruck.

Die Grundmischung mit dem Stooper Lehm, welche einer Mure entsprechen könnte, weist einen recht geringen D-Wert auf. Der Druck bleibt relativ lange hoch und beginnt erst nach ca. 30 Minuten deutlich zu sinken (siehe Abbildung 43).

Lediglich die reine Wasser-Lehm-Mischung weist einen noch geringeren D-Wert ( $5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ) auf (siehe Abbildung 44). Die Lehm-Partikel sind somit länger in Schwebelag, was durch den fehlenden Einfluss (Absinken) der groben Partikel unterstützt wird.

$$D = 5 * 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$$

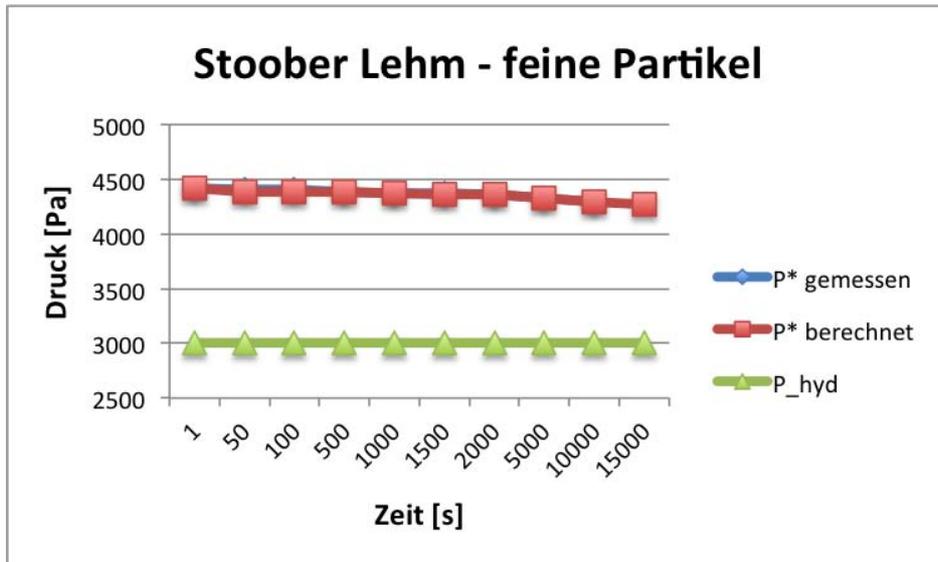


Abbildung 44: Druckverlauf des gemessenen Drucks, Darstellung des mathematischen Modells und der hydrostatische Wasserdruck.

Reduziert man den Lehmanteil im Wasser-Lehm-Gemisch, so sinkt der Druck deutlich schneller ab. Das zeigt, dass die Partikel deutlich schneller sinken und somit steigt der D-Wert an (siehe Abbildung 45 bis Abbildung 47).

$$D = 2,5 * 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

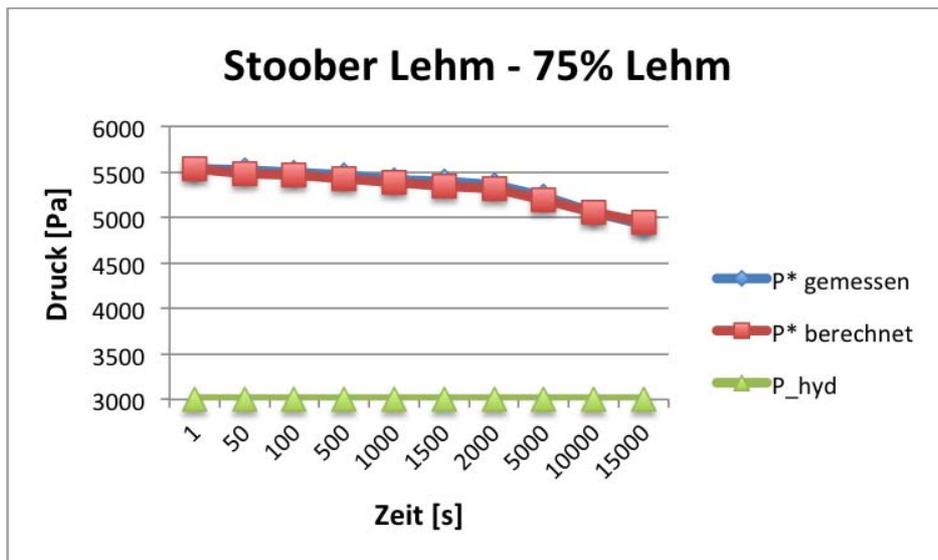


Abbildung 45: Druckverlauf des gemessenen Drucks, Darstellung des mathematischen Modells und der hydrostatische Wasserdruck.

$$D = 3,5 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

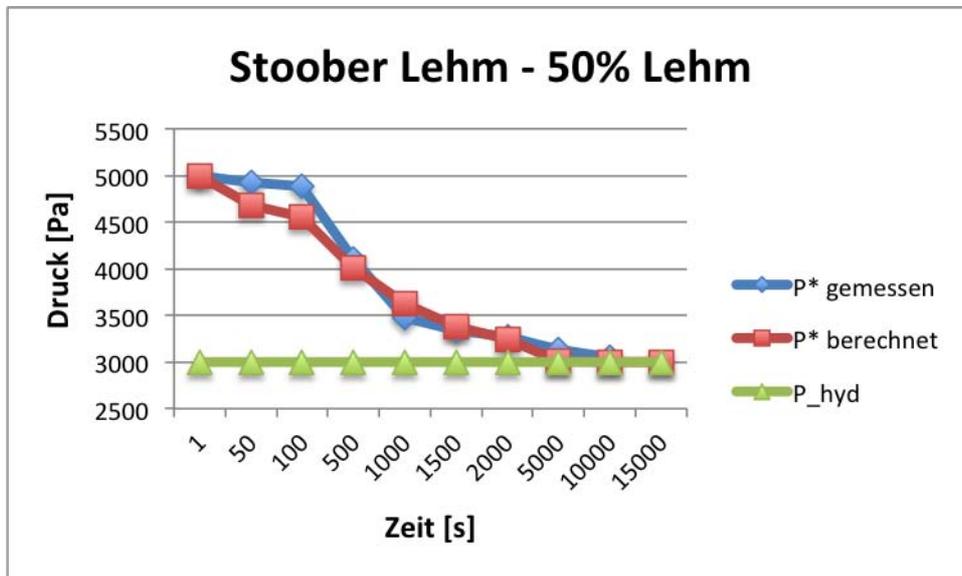


Abbildung 46: Druckverlauf des gemessenen Drucks, Darstellung des mathematischen Modells und der hydrostatische Wasserdruck.

$$D = 5 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

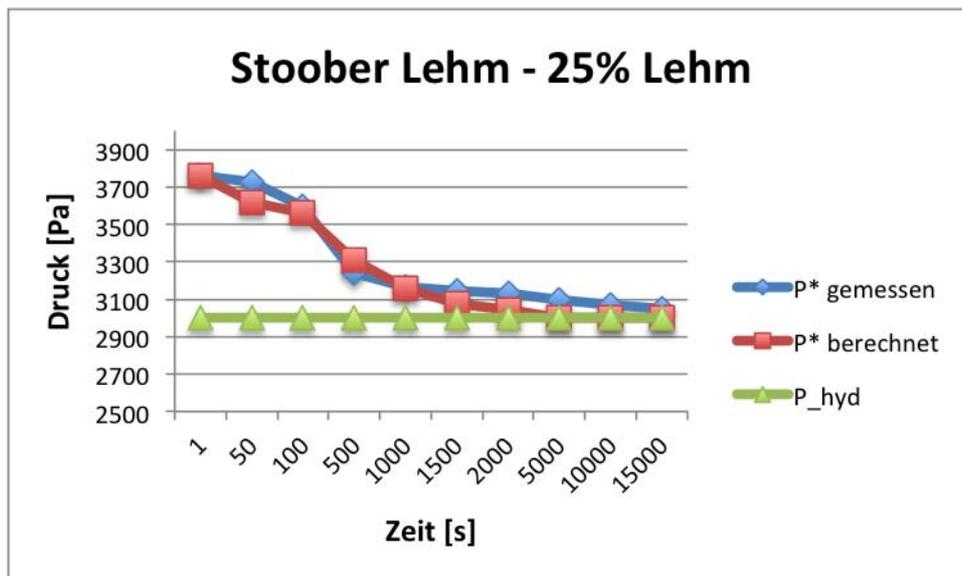


Abbildung 47: Druckverlauf des gemessenen Drucks, Darstellung des mathematischen Modells und der hydrostatische Wasserdruck.

$$D = 6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

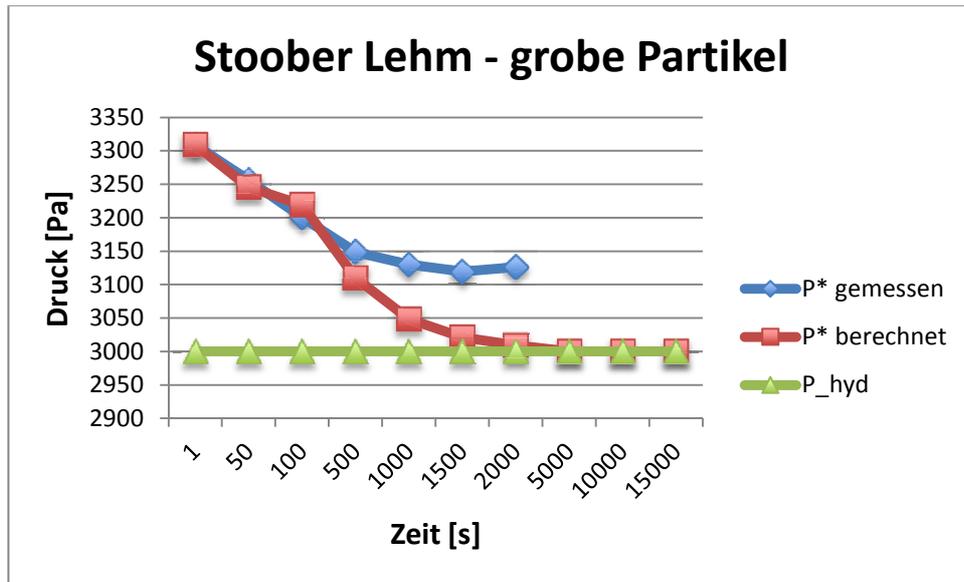


Abbildung 48: Druckverlauf des gemessenen Drucks, Darstellung des mathematischen Modells und der hydrostatische Wasserdruck.

Die Extremmischung mit reinem Wasser und den groben Partikeln zeigt, dass der Druck schnell abfällt und somit die Partikel schnell absinken. Das würde auch den D-Wert von  $6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  bestätigen, denn je kleiner der Wert, desto schneller fällt der Druck. Obwohl diese Mischung keinen Lehmanteil aufweist, ist der Wert für den Diffusions-Koeffizienten sehr ähnlich den Lehmmischungen mit geringem Lehmanteil. Grund dafür ist die hohe Sensitivität des Diffusions-Koeffizienten.

Bei diesen Diagrammen ist die Schwankungsbreite für den Diffusions-Koeffizienten deutlich höher als bei den zuvor gezeigten Diagrammen (ohne Extremvarianten). Das zeigt die Sensitivität des D-Wertes auf und bestätigt die These im Zusammenhang mit der Viskosität der Mischung.

#### 4.5. ÄNDERUNG DES DIFFUSIONS-KOEFFIZIENTEN

Die Änderung des Diffusions-Koeffizienten ist laut (8) abhängig von der Veränderung der Viskosität der Mischung. Um dies darzustellen wurden Diagramme erstellt, welche den D-Wert dem Tongehalt in Volums-% und dem  $C_{v,f}$ - bzw. dem  $C_{v,s}$ -Wert gegenüberstellen.

Zuerst wurde der Diffusions-Koeffizient dem Volumenanteil an Ton bzw. Lehm gegenübergestellt (siehe Abbildung 49, Abbildung 50 und Abbildung 51).

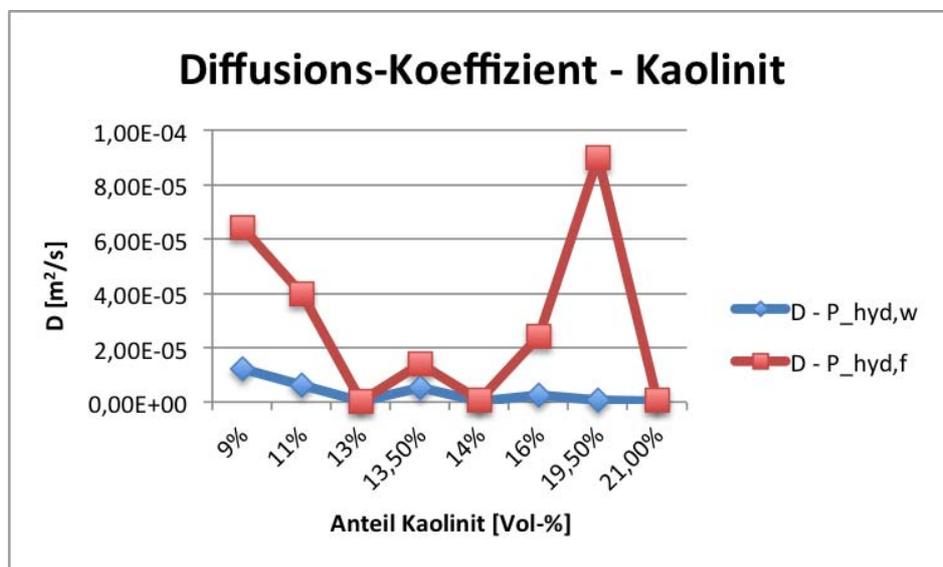


Abbildung 49: Diffusions-Koeffizient für Kaolinit.

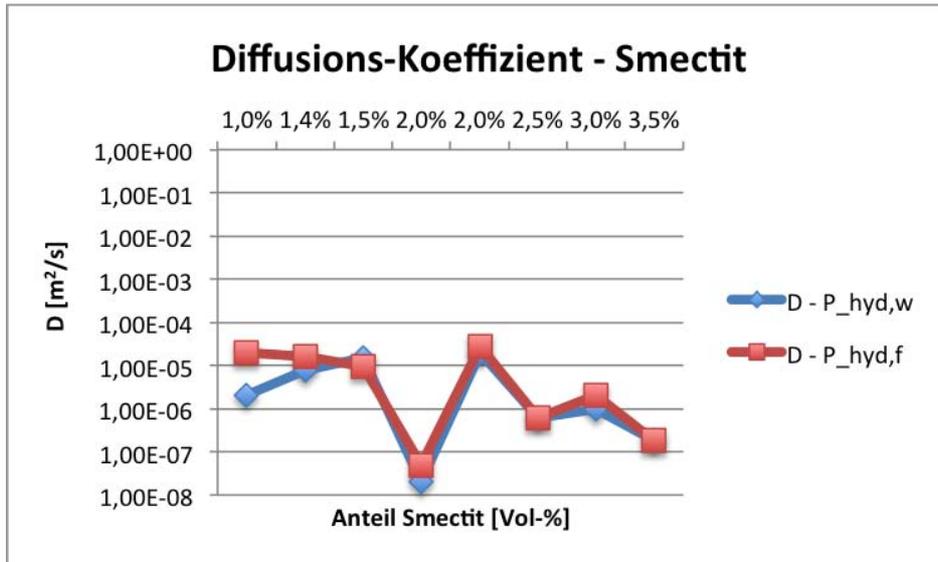


Abbildung 50: Diffusions-Koeffizient für Smectit.

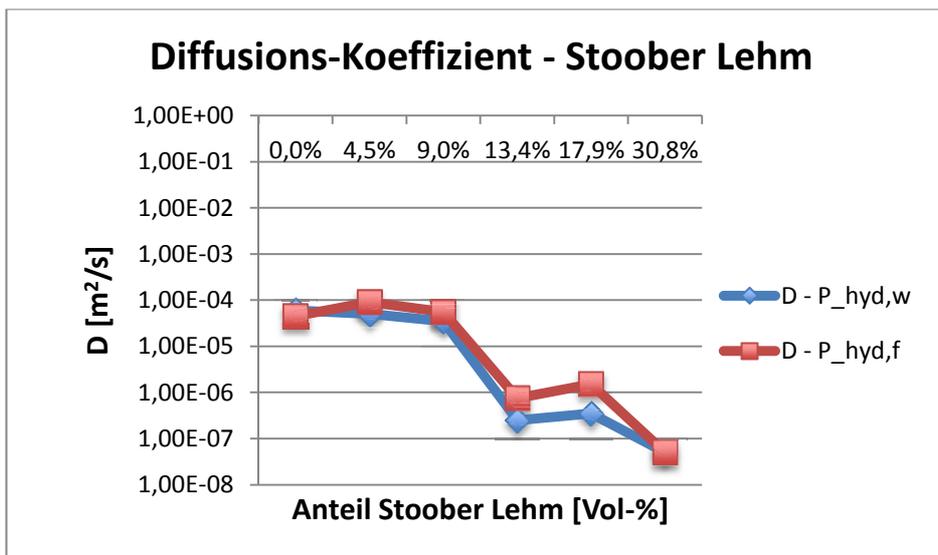


Abbildung 51: Diffusions-Koeffizient für Stoober Lehm.

Diese Diagramme zeigen den Unterschied der Diffusions-Koeffizienten bezogen auf den hydrostatischen Druck von Wasser (blau) bzw. der Ton-Wasser-Mischung (rot, Fluid). Beim Smectit (siehe Abbildung 50) und beim Stoober Lehm (siehe Abbildung 51) sind diese zwei Kurven ziemlich deckungsgleich. Die dickflüssige Mischung ( $C_{v,f}=0,26$ ) mit 50% groben Partikeln des Smectit stellt jedoch einen deutlichen Ausreißer dar. Beim Kaolinit (siehe Abbildung 49) sind die zwei Kurven nicht so deckungsgleich und drei Mischungen (sehr dickflüssig ( $C_{v,f}=0,28$ ) – 50%

grobe Partikel, dickflüssig ( $C_{v,f}=0,26$ ) – 50% und 25% grobe Partikel) stellen sich als Ausreißer dar.

In einem weiteren Schritt wird dem D-Wert der Anteil an Ton (in Volums-%,  $C_{v,f}$ -Wert) gegenübergestellt.

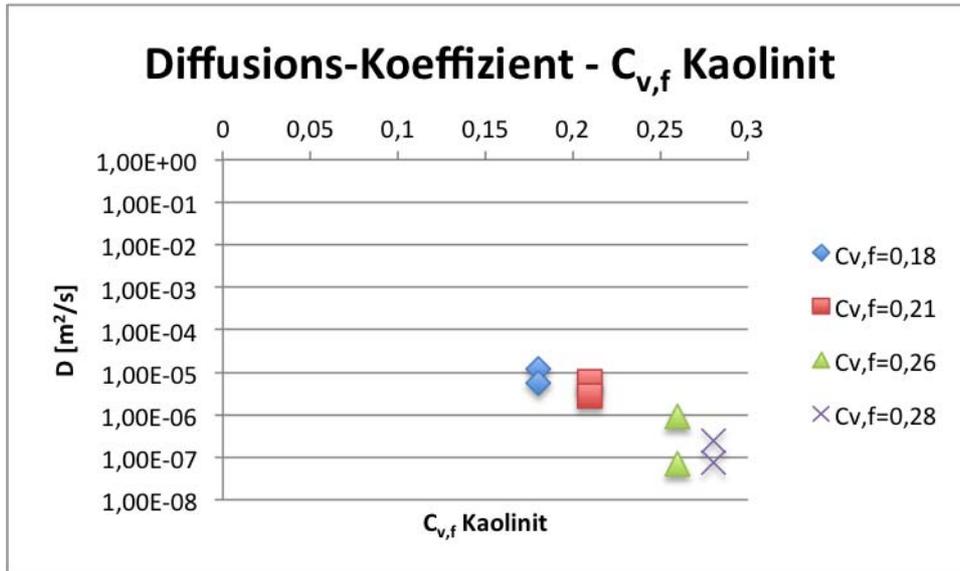


Abbildung 52: Diffusions-Koeffizient im Vergleich zum Tongehalt der Kaolinit-Mischungen.

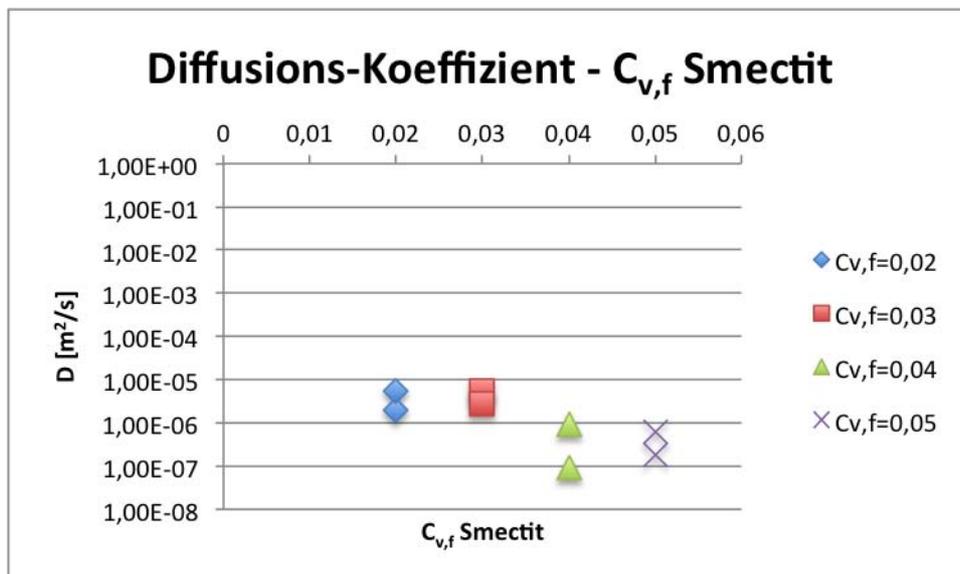


Abbildung 53: Diffusions-Koeffizient im Vergleich zum Tongehalt der Smectit-Mischungen.

Wie aus Abbildung 52 und Abbildung 53 zu entnehmen ist, weisen die Mischungen mit dem geringeren Anteil an Ton einen höheren D-Wert auf. Das bestätigt sowohl die zuvor gezeigten Ergebnisse und auch die Abhängigkeit vom Diffusions-Koeffizienten von der Viskosität (siehe Formel (8)).

Auch die Extremvarianten mit den Werten von LAMPLMAIR und EDER (2014) bestätigen die Thesen (siehe Abbildung 54).

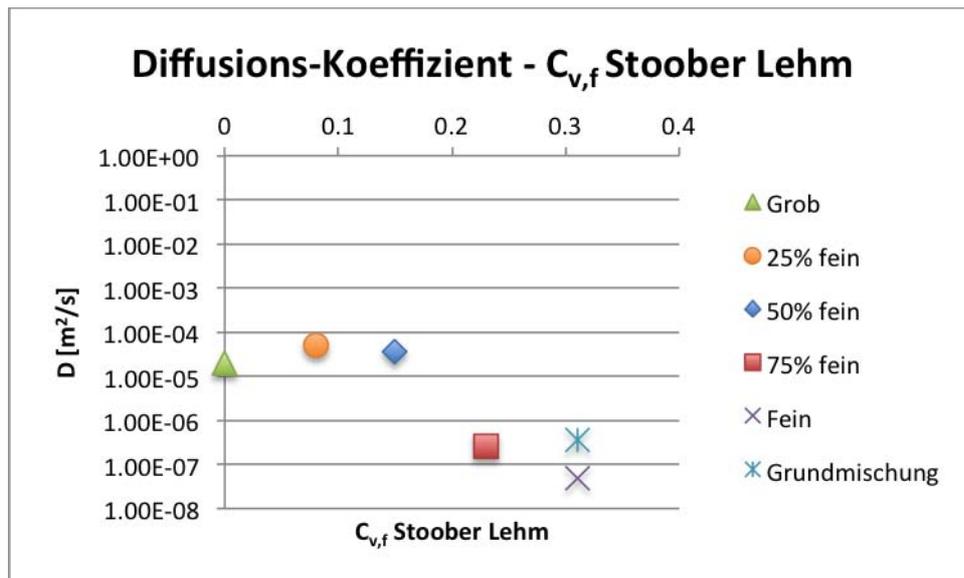


Abbildung 54: Diffusions-Koeffizient im Vergleich zum Tongehalt der Mischungen mit Stoober Lehm.

Die Gegenüberstellung des  $C_{v,s}$ -Wert (Anteil Vol.-% an groben Partikeln) zum Diffusions-Koeffizienten zeigt, dass die D-Werte bei den Mischungen mit 50% Anteil an groben Partikeln geringfügig weiter auseinander liegen (siehe Abbildung 55 und Abbildung 56).

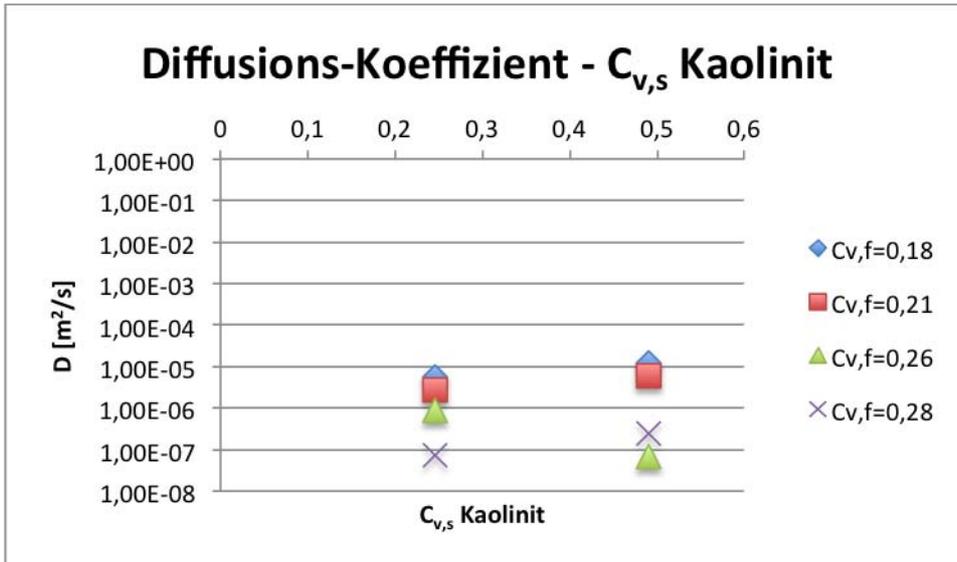


Abbildung 55: Diffusions-Koeffizient im Vergleich zum Gehalt der groben Partikel der Kaolinit-Mischungen.

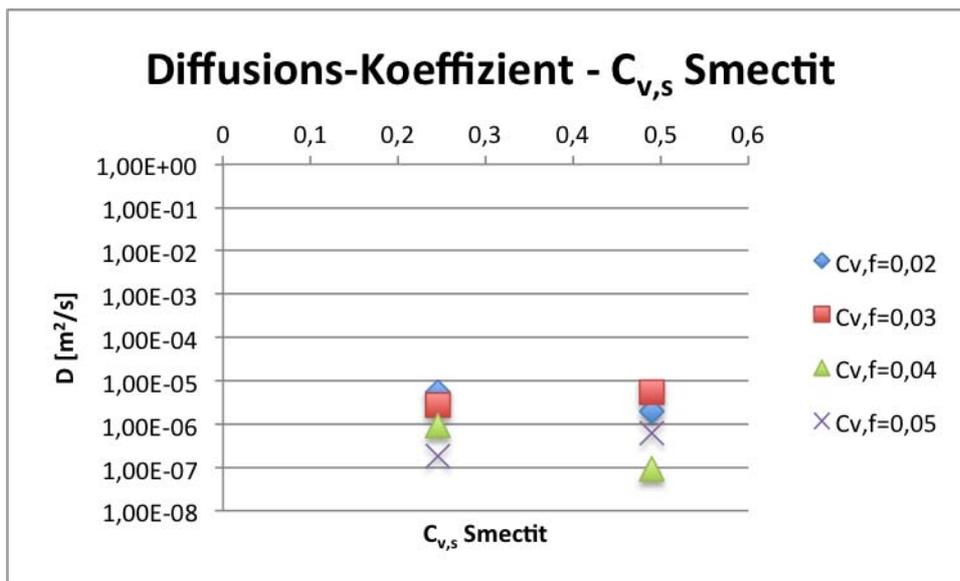


Abbildung 56: Diffusions-Koeffizient im Vergleich zum Gehalt der groben Partikel der Smectit-Mischungen.

## 5. DISKUSSION

Die Ergebnisse zeigen, dass es bei hier untersuchten Mischungen vor allem auf den Gehalt an Ton oder Lehm ankommt. Je höher der Anteil an Feinsedimenten ist, desto länger halten sich die Partikel in Schwebelage und somit bleibt der Druck länger hoch. Da sich der Druck bei den „sehr dickflüssigen“ und „dickflüssigen“ Mischungen lang hoch halten kann, erweist es sich als sinnvoll die Messungen über längeren Zeitraum (mindestens drei Stunden) durchzuführen. Dadurch wird ersichtlich, dass eine deutliche Setzung bzw. Druckabfall erst nach ca. einer halben Stunde beginnt.

Bei den Mischungen mit geringerem Tongehalt sowie bei der Extremvariante „Grob“ (nur Wasser mit groben Partikeln) kann deutlich beobachtet werden, wie sich die Partikel nach kurzer Zeit rasch abgesetzt haben (nach ca. 3 Minuten).

Die unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeiten und somit der variierende Druckabbau sind in erster Linie auf die verschiedenen Korngrößen zurückzuführen. Die feinen Partikel (wie Ton und Lehm) können durch Zähigkeitskräfte der Flüssigkeit in Schwebelage gehalten werden und gelten somit als Teil der Flüssigkeit. Haben sich diese kleinsten Partikel nach längerer Zeitspanne auch abgesetzt, sind sie nicht mehr Teil der Flüssigkeit. Nach IVERSON (1997) gelten nur jene Teilchen als Teil der Flüssigkeit, die eine Sinkgeschwindigkeit  $<0,001\text{m/s}$  besitzen, weil diese eine längere Zeitdauer als ein typischer Murgang brauchen, um sich abzusetzen. Das gilt für Partikel mit einem Korndurchmesser von weniger als  $0,05\text{mm}$ . Bei den groben Partikeln reichen die Zähigkeitskräfte der Flüssigkeit nicht aus, um sie in Schwebelage zu halten. Dafür wären andere Partikel und turbulente Bedingungen notwendig (IVERSON, 1997). Haben sich die groben Partikel abgesetzt, sind die Zwischenräume mit dem Fluid gefüllt. Haben sich die Tonpartikel nach einer längeren Zeitspanne auch abgesetzt, bildet sich an der Oberfläche eine reine Wasserschicht und es herrscht der hydrostatische Wasserdruck. Die im Zuge dieser Masterarbeit durchgeführten Versuche mit Kaolinit können die Aussage von IVERSON (1997) bestätigen. Jene, die aber mit Smectit durchgeführt wurden, zeigen, dass durch die hohe Viskosität und das thixotrope Verhalten des Smectit auch größere Partikel wie Kies in Schwebelage gehalten werden können.

Nicht nur die Messungen, Ergebnisse und Auswertungen, sondern auch die mathematische Berechnung des Diffusions-Koeffizienten (8) nach MAJOR (2000) zeigt, dass die Änderung des Drucks von der Viskosität und somit von der Zähflüssigkeit (Ton-/Lehmgehalt) der Mischungen abhängig ist. MAJOR (2000) beschreibt die Diffusivität als indirekt proportional zur Viskosität einer Flüssigkeit. Die Viskosität von Murmischungen, welche einen hohen Anteil an kolloidalem Ton (Kaolinit) oder Ton, der stark mit Wasser reagiert (Smectit), enthalten, kann einen großen Einfluss auf die Porenwasser-Hydraulik haben. Der Wert für den Diffusions-Koeffizienten ist sehr sensitiv, das zeigt die Änderung des Wertes bei einer Änderung der Viskosität der Mischungen. Im Falle dieser Masterarbeit bewegen sich die Werte zwischen  $10^{-5}$  bis  $10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$ . Dies beschreibt auch MAJOR (2000) in seinen Studien. Dabei variiert sein Wert für den Diffusions-Koeffizienten im Bereich von  $10^{-5}$  bis  $10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ . Murablagerungen, die hauptsächlich aus Sand und Kies, mit wenig Ton/Lehm Anteil (<2%), bestehen, weisen einen charakteristischen Diffusions-Koeffizienten von  $10^{-2}$  bis  $10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$  auf. Besitzt die Murablagerung einen höheren Anteil an Ton oder Lehm (2-4%), so sinkt der Wert für die Diffusivität auf  $10^{-6}$  bis  $10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ . Für diesen Fall (wenn eine Mischung Ton oder Lehm enthält) ist eine zufriedenstellende Vorhersage des Konsolidierungszeitpunktes möglich (MAJOR, 2000).

Bei der, im Zuge dieser Masterarbeit, getesteten Mischung mit reinem Wasser und den groben Partikeln (siehe Abbildung 48) fällt der Wert für den Diffusions-Koeffizienten allerdings nicht so hoch aus ( $6 \cdot 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ ), wie von MAJOR (2000) beschrieben ( $10^{-2}$  bis  $10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ ). Eine Anpassung der Werte würde eine starke Abweichung der berechneten Kurve von der gemessenen zur Folge haben. Die Erklärung dafür ist, dass die Kurve des gemessenen Druckverlaufes nicht, wie die des Berechneten, auf den hydrostatischen Wasserdruck zurück fällt. Ein Grund für den nicht kompletten Rückgang auf den hydrostatischen Wasserdruck ist nicht offensichtlich, da auch das Füllvolumen angepasst wurde und der 30cm Wassersäule entspricht.

Noch ein erwähnenswerter Punkt ist, dass der Wert des Diffusions-Koeffizienten nicht viel über den absoluten Wert des Porenwasserüberdrucks sagt, sondern nur den Verlauf des Abbaus beschreibt. Somit kann unter anderem auch erklärt werden, dass der Wert des Diffusions-Koeffizienten, der (zuvor erwähnten) getesteten

Mischung mit reinem Wasser und den groben Partikeln (siehe Abbildung 48), den anderen sehr ähnlich ist.

## 6. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die aus den durchgeführten Versuchen erhaltenen Ergebnisse zeigen, dass die Zusammensetzung einer Murmischung eine große Rolle spielt. Sie beeinflusst in erster Linie die Viskosität, welche wiederum sehr ausschlaggebend für die Sinkgeschwindigkeit der Partikel in einem Gemisch ist und das Fließverhalten einer Mure bestimmt. Somit kann ein hoher Ton- oder Lehmgehalt größere Partikel (wie Sand und Kies) länger in Schwebelage halten, was den Porenwasserüberdruck langsamer dissipieren lässt. Bei der Veränderung des Druckverlaufs über die Zeit, welche mit Hilfe des Diffusions-Koeffizienten  $D$  berechnet wurde, konnten deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen zusammengesetzten Mischungen beobachtet werden. Je höher der Feinanteil der Mischung ist, desto geringer wird der Wert für  $D$ , was wiederum einen länger hoch bleibenden Druck beschreibt. Je größer der Wert für den Diffusions-Koeffizienten und je geringer der Feinanteil in der Mischung, desto schneller sinkt der Druck wieder ab.

Anhand der Ergebnisse können auch die im Vorfeld aufgestellten Thesen bestätigt werden:

- eine breite Kornverteilung hält die Partikel länger in Schwebelage und somit den Druck länger hoch.
- ein hoher Anteil an feinen Partikeln hält den Druck ebenfalls lange hoch.

Lediglich ein hoher Anteil an groben Partikeln zeigt keinen deutlichen Einfluss auf den Porenwasserüberdruck.

Da aus den Versuchen, welche im Zuge dieser Masterarbeit durchgeführt wurden, interessante und aussagekräftige Ergebnisse resultieren, ist es sicher lohnenswert sich weiter mit diesem Thema zu beschäftigen und noch weitere Versuche durchzuführen, vor allem im Bereich der groben Partikel.

Wichtig wäre es, darauf zu achten, dass die Messungen (bei einem entsprechend hohen Feinpartikelanteil) über einen längeren Zeitraum (mindestens 3 Stunden) durchgeführt werden. Außerdem sind die seitlich eingebauten Messensoren (wenn dessen Werte von Interesse sind) regelmäßig zu überprüfen (ob das Ölreservoir keine Luftblasen

enthält), da diese sonst nicht richtig reagieren und dementsprechend falsche Werte liefern.

Ein deutlicher Nachteil dieser Versuchsmethode ist, dass keine „richtigen“ Anfangswerte gemessen werden können. Durch das Einschütten der Mischungen in den Zylinder entstehen Anfangs zu große Druckimpulse, dessen Werte nicht als die des höchsten Überdrucks gewertet werden können. Auf Grund dieser Tatsache fehlen die anfänglichen Werte für den Porenwasserüberdruck. Für die Ergebnisse dieser Masterarbeit wurden die ersten „normal hohen“ Werte ausgewertet.

Auch die Abweichungen der tatsächlich auftretenden Drücke zu den errechneten Drücken ergeben sich durch die im Vorfeld der Versuche angenommenen Rohdichten von  $2300\text{kg/m}^3$  für die groben und feinen Partikel.

Außerdem sind auch die konstanten Laborbedingungen und die limitierten Korngrößenverteilungen als Einfluss auf die Ergebnisse kritisch zu betrachten und sind deshalb nur bedingt auf die Realität übertragbar. Unterschiedliche atmosphärische Bedingungen (Niederschlag, Temperatur, geologische Verhältnisse, etc.), andere Korngrößenverhältnisse und der Ablagerungsort einer Mure beeinflussen das Absetzverhalten. Die Durchlässigkeit des realen Bodens, mögliche Nachrutschungen und der mögliche Wildholzanteil wurden im Zuge dieser Versuche nicht berücksichtigt.



## 7. LITERATURVERZEICHNIS

AULITZKY H. (1973): Hochwasser, Muren, Lawinen. Information über Wasserwirtschaft und Katastrophenschutz. Heft 2 der Schriftreihe „Wasserwirtschaft“, 1. Auflage. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft (BMLF), Wien.

AHRENS J.P. (2000): A Fall-Velocity Equation. In: Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. Nr. 126, Seiten 99-102.

AHRENS J.P. (2003): Simple Equations to Calculate Fall Velocity and Sediment Scale Parameter. In: Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. Nr. 129, Seiten 146-150.

BANGOLD R.A. (1954): Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. Royal Society London. Proc., Ser. A, Nr. 225, Seiten 49-63.

CAMENEN B. (2007): Simple and General Formula for the Settling Velocity of Particles. In: Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 133, Nr. 2, Seiten 229-233.

CHENG N.-S. (1997): Simplified Settling Velocity Formula for Sediment Particle. In: Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 123, Nr. 2, Seiten 149-152.

DIETRICH W.E. (1982): Settling Velocity of Natural Particles. Water Resources Research, Vol. 18, Nr. 6, Seiten 1615-1626.

GEORGE D.L., IVERSON R.M. (2011): A two-phase debris-flow model that includes coupled evolution of volume fractions, granular dilatancy, and

pore-fluid pressure. In: Italian Journal of Engineering Geology and Environment – Book, Seiten 415-424.

HALLERMEIER R.J. (1981): Terminal settling velocity of commonly occurring sand grains. In: Sedimentology, Nr. 28, Seiten 859-865.

HAMPTON M.A. (1975): Competence of fine-grained debris flows. In: Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 45, Nr. 4, Seiten 834-844.

HAMPTON M.A. (1979): Buoyancy in debris flows. In: Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 49, Nr. 3, Seiten 753-758.

HÜBL J. (1995): Muren: Prozesse und Ablagerungsformen. Dissertation, Universität für Bodenkultur, Wien.

IVERSON R.M. (1997): The Physics of debris flows. Cascades Volcano Observatory. U.S. Geological Survey. Vancouver, Washington.

IVERSON R.M., DENLINGER R.P. (2001): Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain. 1. Coulomb mixture theory. In: Journal of Geophysical Research, Vol. 106, Nr. B1, Seiten 537-552.

IVERSON R.M. (2013): Mechanics of Debris Flows and Rock Avalanches. In: Handbook of Environmental Fluid Dynamics, Vol. 1, Seiten 573-587.

JASMUND K., LAGALY G. (1993): Tonminerale und Tone: Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt. Steinkopff Verlag, Darmstadt.

KAITNA R. (2006): Debris Flow Experiments in a Roating Drum. Dissertation, Universität für Bodenkultur, Wien.

KNOBLAUCH H. und SCHNEIDER U. (2013): Bauchemie. 7. Auflage. Werner Verlag, Köln.

LAGALY G., SCHULZ O., ZIMEHL R. (1997): Dispersionen und Emulsionen: eine Einführung in die Kolloidik feinverteilter Stoffe einschließlich der Tonminerale. Steinkopff Verlag, Darmstadt.

EDER M., LAMPLMAIR S. (2014): Versuche zur Dissipation von Porenwasserdruck bei Muren. Bakkalaureatsarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien.

LANGSTON R.B., JENNE E.A., PASK J.A. (1966): Effect of impurities on the rheology of two kaolins. In: Clays and Clay Mineralogy, Monograph, Earth Science Series 25, Seiten 381-398.

MAJOR J.J. (2000): Gravity-driven Consolidation of Granular Slurries – Implications for Debris-Flow Deposition and Deposit Characteristics. In: Journal of Sedimentary Research. Vol. 70, Nr. 1, Seiten 64-83.

PIERSON T.C. (1981): Dominant particle support mechanisms in debris flows at Mt Thomas, New Zealand, and implications for flow mobility. Sedimentology 28, Elsevier Publishing Company, Amsterdam. Seiten 49-60.

PIERSON T.C. (1985): Effects of Slurry Composition on Debris Flow Dynamics, Rudd Canyon, Utah. In: Delineation of Landslide, Flash Flood, and Debris Flow Hazards in Utah (ed. By BOWLES D.S.), Utah water research laboratory, General series, G-85/03, Seiten 132-152.

PREGL O. (1997): Handbuch der Geotechnik. Auszug für die Lehrveranstaltung. Laboratoriumsübungen zu Erd- und Grundbau. Eigenverlag des Institutes für Geotechnik. Universität für Bodenkultur. Wien. Seiten 6-8.

RODINE J.D., JOHNSON A.M. (1976): The ability of debris, heavily freighted with coarse clastic materials, to flow on gentle slopes. *Sedimentology* 23, Elsevier Publishing Company, Amsterdam. Seiten 213-234.

RUDOLF-MIKLAU F., MOSER A., HÜBL J., KOCIU A., KRISSEL H., LANG E., LÄNGER E., PICHLER A., RACHOY C., SCHNETZER I., SITTER F., SKOLAUT C., TILCH N., TOTSCHNIG R. (2009): Alpine Naturkatastrophen. Lawinen, Muren, Felsstürze, Hochwässer. Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT (Hrsg.). Leopold Stocker Verlag, Graz – Stuttgart.

SHE K., TRIM L., POPE D. (2005): Fall Velocities of natural sediment particles: a simple mathematical presentation of the fall velocity law. In: *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 43, Nr. 2, Seiten 189-195.

SWAMEE P.K., OJHA C.S.P. (1997): Drag Coefficient and Fall Velocity of Non-spherical Particles. In: *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 117, Nr. 5, Seiten 660-667.

TABUTEAU H. (2007): Drag force on a sphere in a steady motion through a yield-stress fluid. In: *Journal of Rheology*. Vol. 51, Seiten 125-137.

TERZAGHI K. (1963): *Theoretical Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Son.

## 7.1. INTERNETQUELLEN

SCHMIDT M. (2004): Chemie verstehen.

[http://www.cumschmidt.de/s\\_phasen01.htm](http://www.cumschmidt.de/s_phasen01.htm), zuletzt abgerufen am  
25.02.2014

## 8. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Beziehung von „Strength“ zum Wassergehalt in vier versch. Ton-Wasser-Mischungen (Quelle: HAMPTON, 1975, Seite 836). .....	9
Abbildung 2: (a) Tetraeder- und (b) Oktaederschichten der Tonminerale (Quelle: Jasmund und Lagaly, 1993, Seite 3).....	14
Abbildung 3: Kaolinit (Quelle: Jasmund und Lagaly, 1993, Seite 34). .....	15
Abbildung 4: Montmorillonit (Quelle: Jasmund und Lagaly, 1993, Seite 49).....	16
Abbildung 5: Hydrostatischer Druck der Mixtur in einem Zylinder. ....	18
Abbildung 6: Zusätzlicher Druck durch Einbringen eines Partikels. ....	18
Abbildung 7: Darstellung des Aräometersversuchs (Quelle: Pregel, 1997, Seite 8). ....	21
Abbildung 8: Bildliche Darstellung der Suspension und der darin verteilten Drücke und Spannungen, für die eindimensionale gravitationsbedingte Konsolidierung (Quelle: Major, 2000, Seite 67).....	25
Abbildung 9: Bohlin Visco 88. ....	36
Abbildung 10: Darstellung der Viskosität bei laminarer Strömung (Quelle: Jasmund und Lagaly, 1993, Seite 121).....	37
Abbildung 11: Versuchsanlage. ....	38
Abbildung 12: Versuchsanlage mit installierten Drucksensoren.....	38
Abbildung 13: Drucksensor.....	39
Abbildung 14: Drucksensor in Öl-Reservoir (Quelle: KAITNA). ....	40
Abbildung 15: Drucksensor in Öl-Reservoir (Quelle: KAITNA). ....	40
Abbildung 16: Vergleich der Kaolinit-Mischungen.....	41
Abbildung 17: Vergleich der Smectit-Mischungen.....	42
Abbildung 18: Vergleich der Smectit-Mischungen mit 24 Stunden gequollenem Smectit.....	43
Abbildung 19: Kaolinit $C_{v,f}=0,21$ .....	45
Abbildung 20: Kaolinit $C_{v,f}=0,26$ .....	45
Abbildung 21: Smectit $C_{v,f}=0,02$ .....	45

Abbildung 22: Smectit $C_{v,f}=0,04$ .....	45
Abbildung 23: Messung des Druckverlaufs für die dickflüssige Mischung des kaolinit mit einem $C_{v,f}=0,26$ und 25% Anteil an groben Partikeln.....	47
Abbildung 24: Relativer Druck für die dickflüssige Mischung des kaolinit mit einem $C_{v,f}=0,26$ und 25% Anteil an groben Partikeln. ....	47
Abbildung 25: Messung des Druckverlaufs für die dickflüssige Mischung des Smectit mit einem $C_{v,f}=0,04$ und 25% Anteil an groben Partikeln.....	48
Abbildung 26: Relativer Druck für die dickflüssige Mischung des Smectit mit einem $C_{v,f}=0,04$ und 25% Anteil an groben Partikeln. ....	48
Abbildung 27: Messung des Druckverlaufs für die dickflüssige Mischung des Kaolinit mit einem $C_{v,f}=0,26$ und 50% Anteil an groben Partikeln.....	49
Abbildung 28: Relativer Druck für die dickflüssige Mischung des Kaolinit mit einem $C_{v,f}=0,26$ und 50% Anteil an groben Partikeln. ....	49
Abbildung 29: Messung des Druckverlaufs für die dickflüssige Mischung des Smectit mit einem $C_{v,f}=0,04$ und 50% Anteil an groben Partikeln.....	50
Abbildung 30: Relativer Druck für die dickflüssige Mischung des Smectit mit einem $C_{v,f}=0,04$ und 50% Anteil an groben Partikeln. ....	50
Abbildung 31: Mittlerer Anfangsdruck jeder Mischung. ....	51
Abbildung 32: Messung der Druckverteilung für die Mischungen mit Stoober Lehm (LAMPLMAIR und EDER, 2014, Seite 17). ....	52
Abbildung 33: mittlerer Anfangsdruck der Mischungen mit Stoober Lehm. ....	53
Abbildung 34: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells. ....	55
Abbildung 35: Überblick mit hydrostatischem Wasserdruck. ....	55
Abbildung 36: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells. ....	56
Abbildung 37: Überblick mit hydrostatischem Wasserdruck. ....	56
Abbildung 38: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells. ....	57
Abbildung 39: Überblick mit hydrostatischem Wasserdruck. ....	57

Abbildung 40: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells. ....	58
Abbildung 41: Überblick mit hydrostatischem Wasserdruck. ....	58
Abbildung 42: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells. ....	59
Abbildung 43: Druckverlauf des gemessenen Drucks, Darstellung des mathematischen Modells und der hydrostatische Wasserdruck. ....	60
Abbildung 44: Druckverlauf des gemessenen Drucks, Darstellung des mathematischen Modells und der hydrostatische Wasserdruck. ....	61
Abbildung 45: Druckverlauf des gemessenen Drucks, Darstellung des mathematischen Modells und der hydrostatische Wasserdruck. ....	61
Abbildung 46: Druckverlauf des gemessenen Drucks, Darstellung des mathematischen Modells und der hydrostatische Wasserdruck. ....	62
Abbildung 47: Druckverlauf des gemessenen Drucks, Darstellung des mathematischen Modells und der hydrostatische Wasserdruck. ....	62
Abbildung 48: Druckverlauf des gemessenen Drucks, Darstellung des mathematischen Modells und der hydrostatische Wasserdruck. ....	63
Abbildung 49: Diffusions-Koeffizient für Kaolinit. ....	64
Abbildung 50: Diffusions-Koeffizient für Smectit. ....	65
Abbildung 51: Diffusions-Koeffizient für Stoober Lehm. ....	65
Abbildung 52: Diffusions-Koeffizient im Vergleich zum Tongehalt der Kaolinit-Mischungen. ....	66
Abbildung 53: Diffusions-Koeffizient im Vergleich zum Tongehalt der Smectit-Mischungen. ....	66
Abbildung 54: Diffusions-Koeffizient im Vergleich zum Tongehalt der Mischungen mit Stoober Lehm. ....	67
Abbildung 55: Diffusions-Koeffizient im Vergleich zum Gehalt der groben Partikel der Kaolinit-Mischungen. ....	68
Abbildung 56: Diffusions-Koeffizient im Vergleich zum Gehalt der groben Partikel der Smectit-Mischungen. ....	68
Abbildung 57: Absoluter Druck für Kaolinit $C_{v,f} = 0,26$ mit 25% Anteil grobe Partikel. ...	89

Abbildung 58: Relativer Druck für kaolinit $C_{v,f} = 0,26$ und 25% Anteil grobe Partikel...	89
Abbildung 59: Absoluter Druck für Kaolinit $C_{v,f} = 0,26$ mit 50% Anteil grobe Partikel. .	90
Abbildung 60: Relativer Druck für kaolinit $C_{v,f} = 0,26$ und 50% Anteil grobe Partikel...	90
Abbildung 61: Absoluter Druck für Kaolinit $C_{v,f} = 0,21$ mit 25% Anteil grobe Partikel. .	91
Abbildung 62: Relativer Druck für kaolinit $C_{v,f} = 0,21$ und 25% Anteil grobe Partikel...	91
Abbildung 63: Absoluter Druck für Kaolinit $C_{v,f} = 0,21$ mit 50% Anteil grobe Partikel. .	92
Abbildung 64: Relativer Druck für kaolinit $C_{v,f} = 0,21$ und 50% Anteil grobe Partikel...	92
Abbildung 65: Absoluter Druck für Kaolinit $C_{v,f} = 0,18$ mit 25% Anteil grobe Partikel. .	93
Abbildung 66: Relativer Druck für kaolinit $C_{v,f} = 0,18$ und 25% Anteil grobe Partikel...	93
Abbildung 67: Absoluter Druck für Kaolinit $C_{v,f} = 0,18$ mit 50% Anteil grobe Partikel. .	94
Abbildung 68: Relativer Druck für kaolinit $C_{v,f} = 0,18$ und 50% Anteil grobe Partikel...	94
Abbildung 69: Absoluter Druck für Smectit $C_{v,f} = 0,04$ mit 25% Anteil grobe Partikel. .	95
Abbildung 70: Relativer Druck für Smectit $C_{v,f} = 0,04$ und 25% Anteil grobe Partikel...	95
Abbildung 71: Absoluter Druck für Smectit $C_{v,f} = 0,04$ mit 50% Anteil grobe Partikel. .	96
Abbildung 72: Relativer Druck für Smectit $C_{v,f} = 0,04$ und 50% Anteil grobe Partikel...	96
Abbildung 73: Absoluter Druck für Smectit $C_{v,f} = 0,03$ mit 25% Anteil grobe Partikel. .	97
Abbildung 74: Relativer Druck für Smectit $C_{v,f} = 0,03$ und 25% Anteil grobe Partikel...	97
Abbildung 75: Absoluter Druck für Smectit $C_{v,f} = 0,03$ mit 50% Anteil grobe Partikel. .	98
Abbildung 76: Relativer Druck für Smectit $C_{v,f} = 0,03$ und 50% Anteil grobe Partikel...	98
Abbildung 77: Absoluter Druck für Smectit $C_{v,f} = 0,02$ mit 25% Anteil grobe Partikel. .	99
Abbildung 78: Relativer Druck für Smectit $C_{v,f} = 0,02$ und 25% Anteil grobe Partikel...	99
Abbildung 79: Absoluter Druck für Smectit $C_{v,f} = 0,02$ mit 50% Anteil grobe Partikel.	100
Abbildung 80: Relativer Druck für Smectit $C_{v,f} = 0,02$ und 50% Anteil grobe Partikel.	100
Abbildung 81: Absoluter Druck für Kaolinit $C_{v,f} = 0,28$ mit 25% Anteil grobe Partikel.	101
Abbildung 82: Relativer Druck für Kaolinit $C_{v,f} = 0,28$ und 25% Anteil grobe Partikel.	101
Abbildung 83: Absoluter Druck für Kaolinit $C_{v,f} = 0,28$ mit 50% Anteil grobe Partikel.	102
Abbildung 84: Relativer Druck für Kaolinit $C_{v,f} = 0,28$ und 50% Anteil grobe Partikel.	102

Abbildung 85: Absoluter Druck für Smectit $C_{v,f}= 0,05$ mit 25% Anteil grobe Partikel.	103
Abbildung 86: Relativer Druck für Smectit $C_{v,f}= 0,05$ und 25% Anteil grobe Partikel.	103
Abbildung 87: Absoluter Druck für Smectit $C_{v,f}= 0,05$ mit 50% Anteil grobe Partikel.	104
Abbildung 88: Relativer Druck für Smectit $C_{v,f}= 0,05$ und 50% Anteil grobe Partikel.	104
Abbildung 89: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells. ....	105
Abbildung 90: Überblick mit hydrostatischem Druck.....	105
Abbildung 91: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells. ....	106
Abbildung 92: Überblick mit hydrostatischem Druck.....	106
Abbildung 93: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells. ....	107
Abbildung 94: Überblick mit hydrostatischem Druck.....	107
Abbildung 95: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells. ....	108
Abbildung 96: Überblick mit hydrostatischem Druck.....	108
Abbildung 97: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells. ....	109
Abbildung 98: Überblick mit hydrostatischem Druck.....	109
Abbildung 99: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells. ....	110
Abbildung 100: Überblick mit hydrostatischem Druck. ....	110
Abbildung 101: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells. ....	111
Abbildung 102: Überblick mit hydrostatischem Druck. ....	111
Abbildung 103: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells. ....	112
Abbildung 104: Überblick mit hydrostatischem Druck. ....	112
Abbildung 105: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells. ....	113

Abbildung 106: Überblick mit hydrostatischem Druck.....	113
Abbildung 107: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells. ....	114
Abbildung 108: Überblick mit hydrostatischem Druck.....	114
Abbildung 109: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells. ....	115
Abbildung 110: Überblick mit hydrostatischem Druck.....	115
Abbildung 111: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells. ....	116
Abbildung 112: Überblick mit hydrostatischem Druck.....	116
Abbildung 113: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells. ....	117
Abbildung 114: Überblick mit hydrostatischem Druck.....	117
Abbildung 115: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells. ....	118
Abbildung 116: Überblick mit hydrostatischem Druck.....	118
Abbildung 117: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells. ....	119
Abbildung 118: Überblick mit hydrostatischem Druck.....	119
Abbildung 119: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells. ....	120
Abbildung 120: Überblick mit hydrostatischem Druck.....	120

## 9. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Überblick der Ton-Wasser Suspensionen. ....	28
Tabelle 2: Zusammensetzung Mischung 0 mit $C_{v,f}=0,28$ und 25 Vol% Grobpartikel.....	29
Tabelle 3: Zusammensetzung Mischung 0 mit $C_{v,f}=0,28$ und 50 Vol% Grobpartikel.....	29
Tabelle 4: Zusammensetzung Mischung 1 mit $C_{v,f}=0,26$ und 25 Vol% Grobpartikel.....	29
Tabelle 5: Zusammensetzung Mischung 1 mit $C_{v,f}=0,26$ und 50 Vol% Grobpartikel.....	30
Tabelle 6: Zusammensetzung Mischung 2 mit $C_{v,f}=0,21$ und 25 Vol% Grobpartikel.....	30
Tabelle 7: Zusammensetzung Mischung 2 mit $C_{v,f}=0,21$ und 50 Vol% Grobpartikel.....	30
Tabelle 8: Zusammensetzung Mischung 3 mit $C_{v,f}=0,18$ und 25 Vol% Grobpartikel.....	30
Tabelle 9: Zusammensetzung Mischung 3 mit $C_{v,f}=0,18$ und 50 Vol% Grobpartikel.....	31
Tabelle 10: Zusammensetzung Mischung 0 mit $C_{v,f}=0,05$ und 25 Vol% Grobpartikel...31	
Tabelle 11: Zusammensetzung Mischung 0 mit $C_{v,f}=0,05$ und 50 Vol% Grobpartikel...31	
Tabelle 12: Zusammensetzung Mischung 1 mit $C_{v,f}=0,04$ und 25 Vol% Grobpartikel...32	
Tabelle 13: Zusammensetzung Mischung 1 mit $C_{v,f}=0,04$ und 50 Vol% Grobpartikel...32	
Tabelle 14: Zusammensetzung Mischung 2 mit $C_{v,f}=0,03$ und 25 Vol% Grobpartikel...32	
Tabelle 15: Zusammensetzung Mischung 2 mit $C_{v,f}=0,03$ und 50 Vol% Grobpartikel...32	
Tabelle 16: Zusammensetzung Mischung 3 mit $C_{v,f}=0,02$ und 25 Vol% Grobpartikel...33	
Tabelle 17: Zusammensetzung Mischung 3 mit $C_{v,f}=0,02$ und 50 Vol% Grobpartikel...33	
Tabelle 18: Zusammenstellung der Grundmischung mit $C_{v,f}=0,31$ (Lamplmair und Eder, 2014). ....	34
Tabelle 19: Zusammenstellung der Mischung ohne Lehm mit $C_{v,f}=0,00$ (Lamplmair und Eder, 2014). ....	34
Tabelle 20: Zusammenstellung der Mischung ohne grobe Partikel mit $C_{v,f}=0,31$ (Lamplmair und Eder, 2014). ....	34
Tabelle 21: Zusammenstellung der Mischung mit 75% Lehm mit $C_{v,f}=0,23$ (Lamplmair und Eder, 2014). ....	35
Tabelle 22: Zusammenstellung der Mischung mit 50% Lehm mit $C_{v,f}=0,15$ (Lamplmair und Eder, 2014). ....	35

Tabelle 23: Zusammenstellung der Mischung mit 25% Lehm mit $C_{v,f}=0,08$ (Lamplmair und Eder, 2014).....	35
Tabelle 24: Überblick über die Werte der Grenzscherbspannungen und die Viskosität der einzelnen Mischungen, je von einer Schergeschwindigkeit von 0-50 und einer Schergeschwindigkeit von 0-300. ....	44



## 10. ANHANG

### Druckverläufe und Druckverhältnisse – Messdauer 1800 sek (=1/2 h)

#### **Kaolinit:**

Anfangsdruck: 4770 Pa

abgebauter Druck: 220 Pa

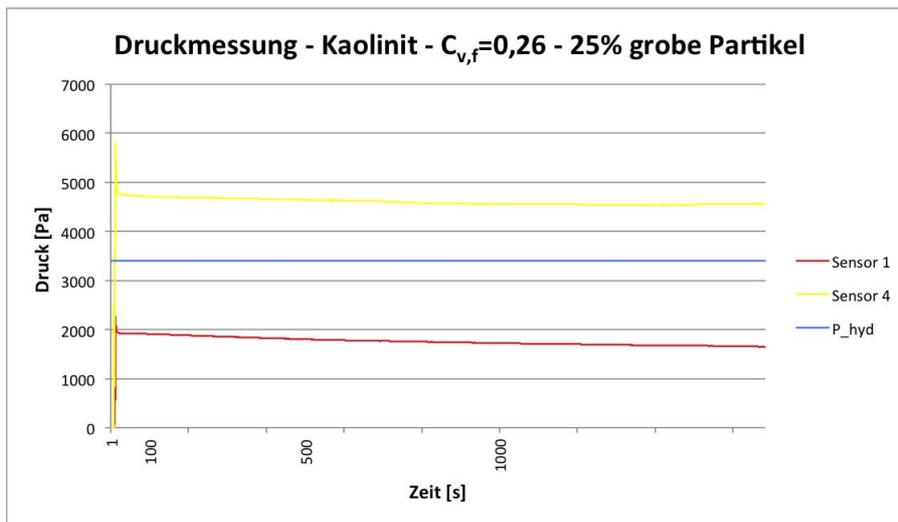


Abbildung 57: Absoluter Druck für Kaolinit  $C_{v,f}= 0,26$  mit 25% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 126 %

abgebauter Druck: 27 %

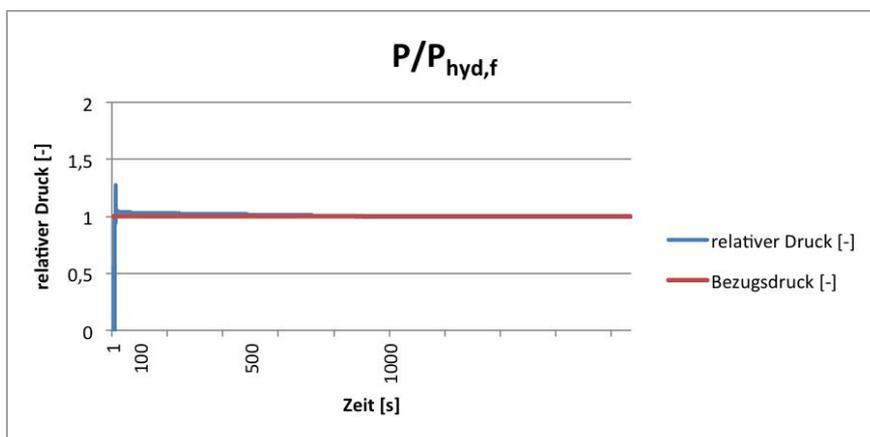


Abbildung 58: Relativer Druck für kaolinit  $C_{v,f}= 0,26$  und 25% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 6320 Pa  
abgebauter Druck: 100 Pa

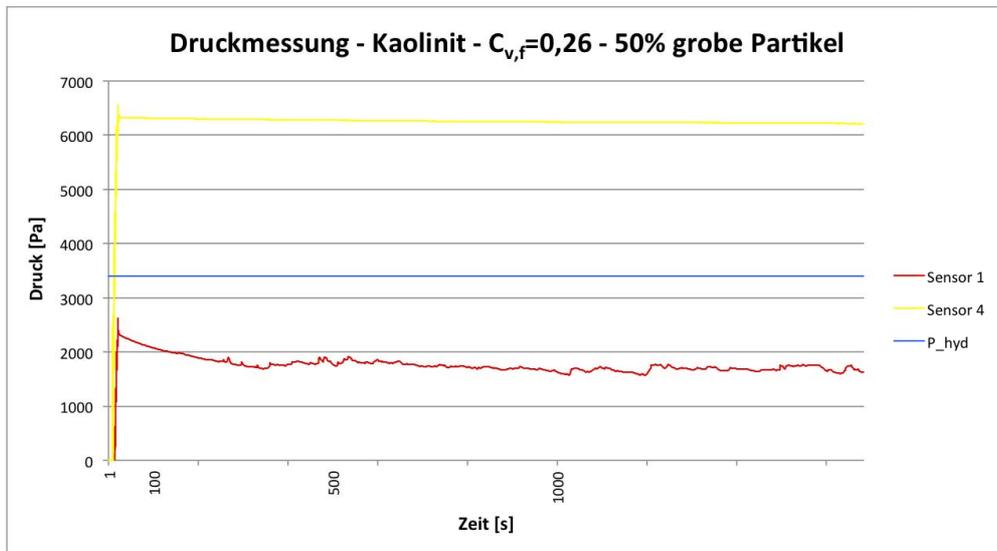


Abbildung 59: Absoluter Druck für Kaolinit  $C_{v,f}= 0,26$  mit 50% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 143 %  
abgebauter Druck: 8 %

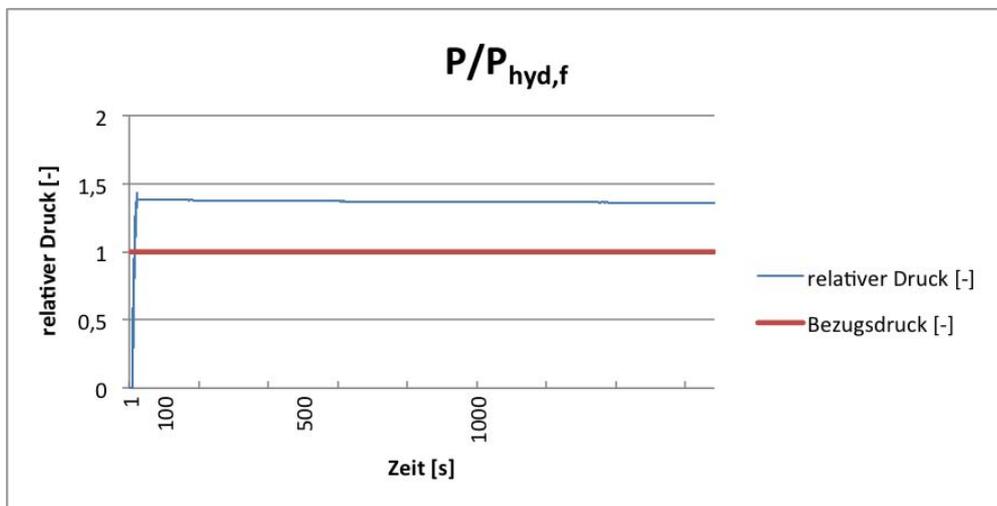


Abbildung 60: Relativer Druck für kaolinit  $C_{v,f}= 0,26$  und 50% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 4550 Pa  
 abgebauter Druck: 250 Pa

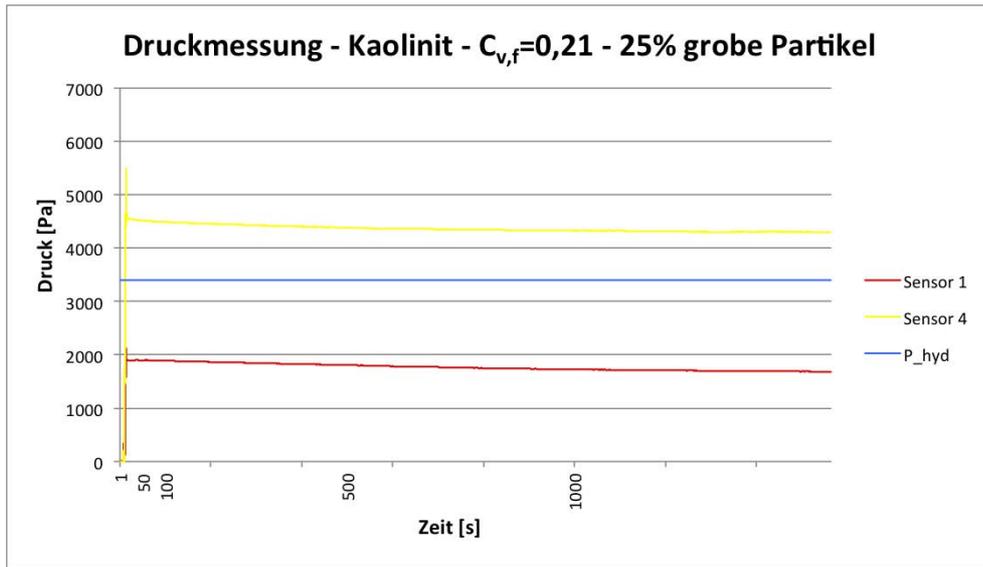


Abbildung 61: Absoluter Druck für Kaolinit  $C_{v,f}= 0,21$  mit 25% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 110 %  
 abgebauter Druck: 7 %

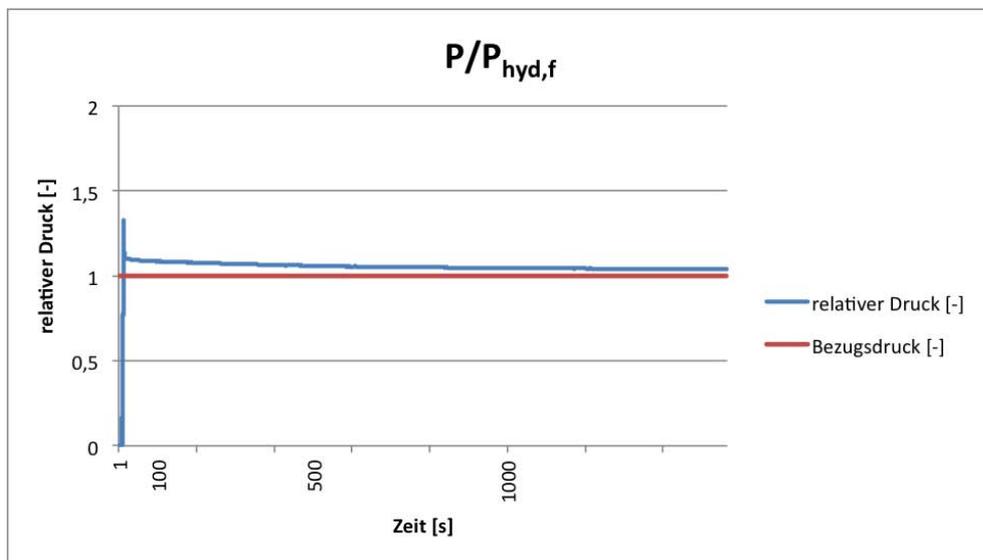


Abbildung 62: Relativer Druck für kaolinit  $C_{v,f}= 0,21$  und 25% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 4460 Pa  
abgebauter Druck: 340 Pa

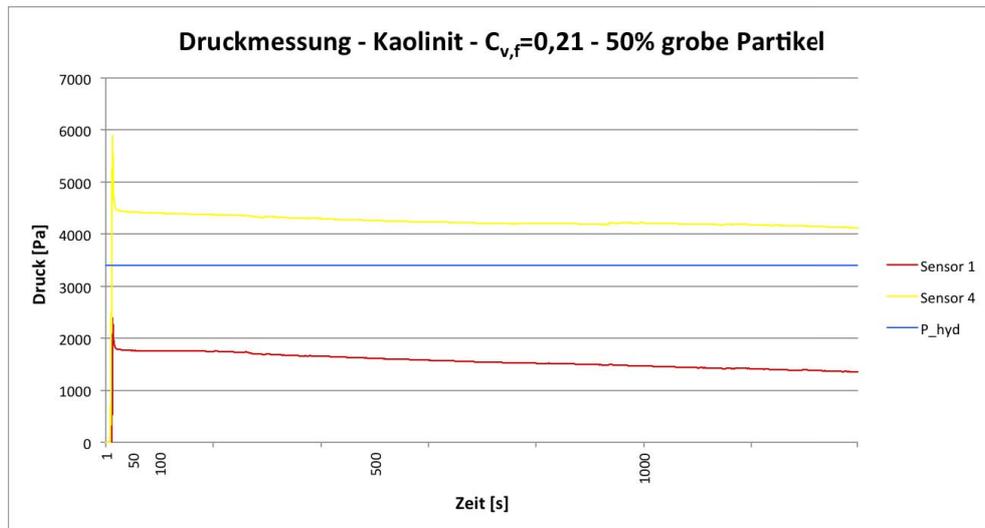


Abbildung 63: Absoluter Druck für Kaolinit  $C_{v,f}= 0,21$  mit 50% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 120 %  
abgebauter Druck: 21 %

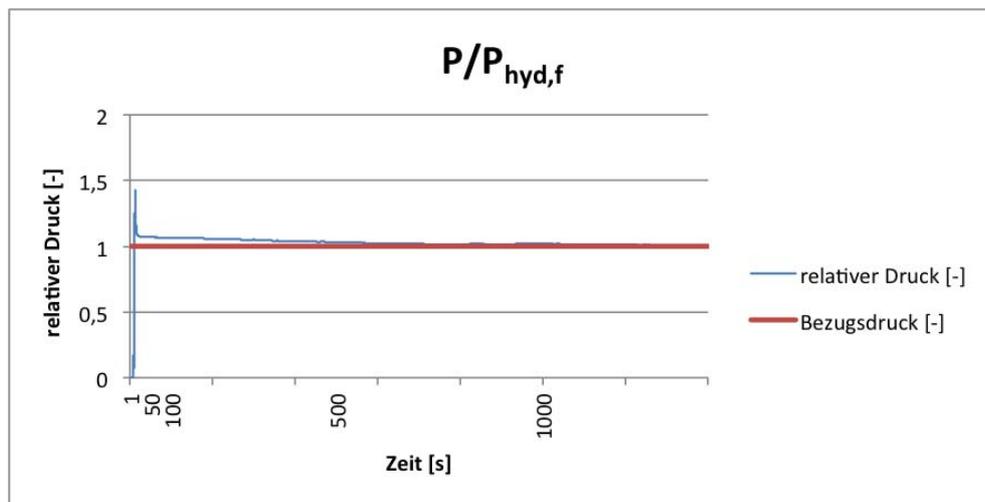


Abbildung 64: Relativer Druck für kaolinit  $C_{v,f}= 0,21$  und 50% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 4460 Pa

abgebauter Druck: 320 Pa

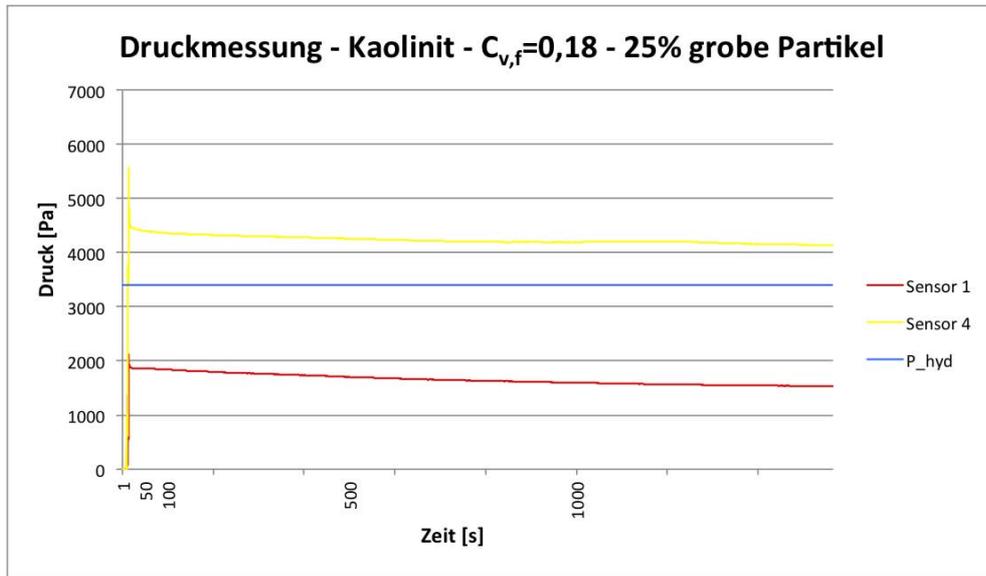


Abbildung 65: Absoluter Druck für Kaolinit  $C_{v,f}=0,18$  mit 25% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 143 %

abgebauter Druck: 35 %

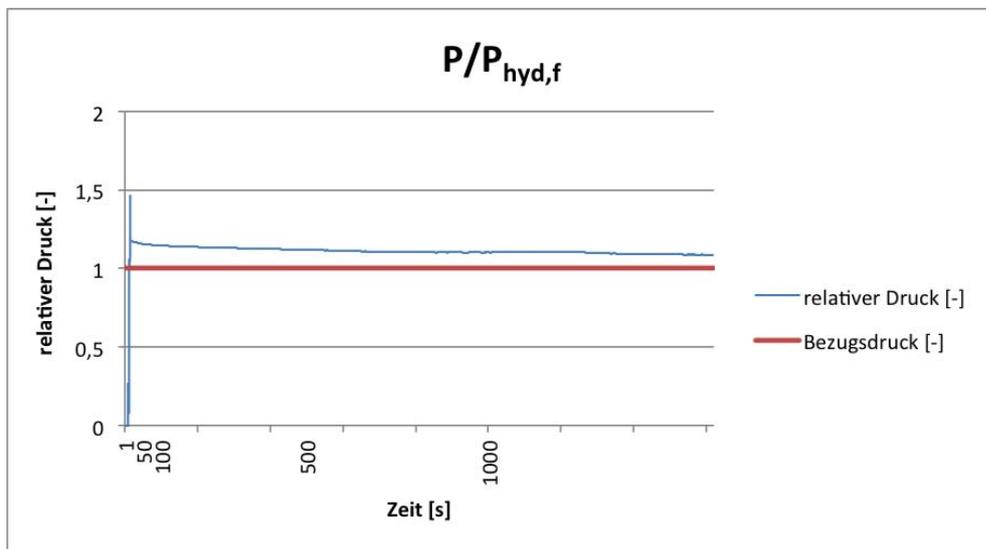


Abbildung 66: Relativer Druck für kaolinit  $C_{v,f}=0,18$  und 25% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 4180 Pa

abgebauter Druck: 360 Pa

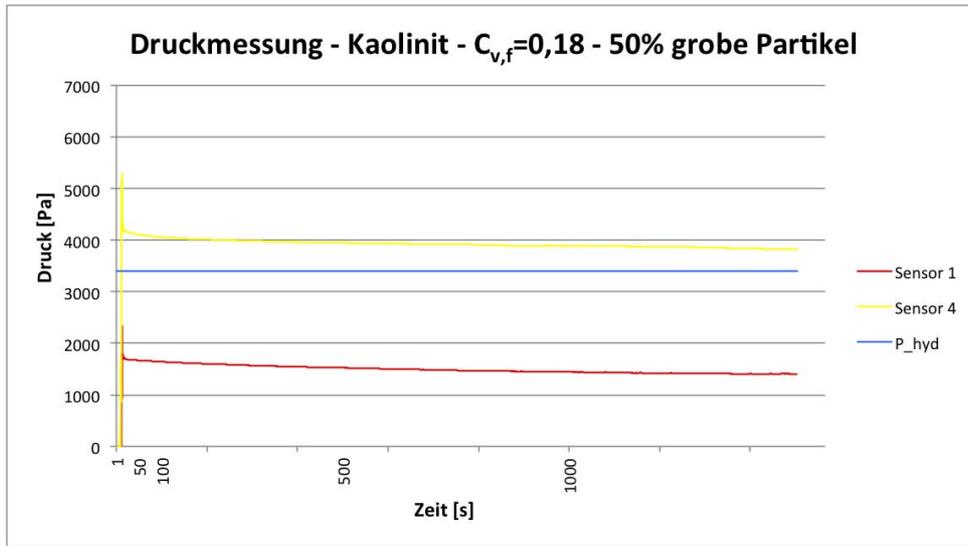


Abbildung 67: Absoluter Druck für Kaolinit  $C_{v,f} = 0,18$  mit 50% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 139 %

abgebauter Druck: 39 %

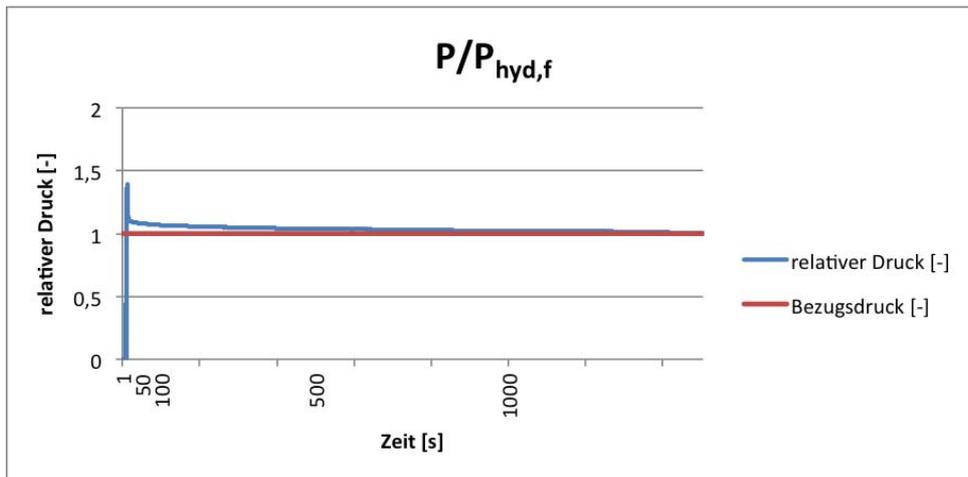


Abbildung 68: Relativer Druck für kaolinit  $C_{v,f} = 0,18$  und 50% Anteil grobe Partikel.

## Smectit:

Anfangsdruck: 4750 Pa

abgebauter Druck: 170 Pa

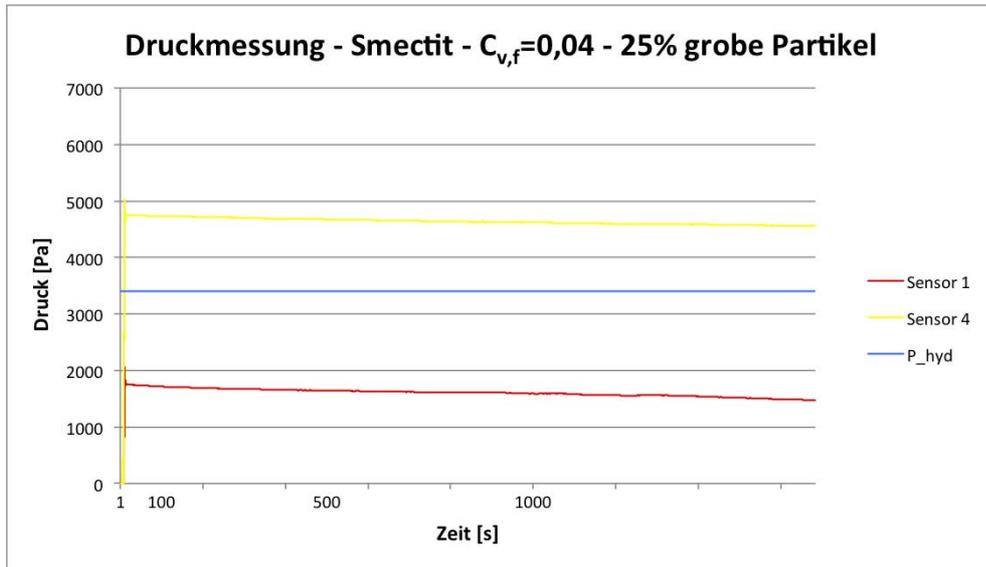


Abbildung 69: Absoluter Druck für Smectit  $C_{v,f}= 0,04$  mit 25% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 137 %

abgebauter Druck: 11 %

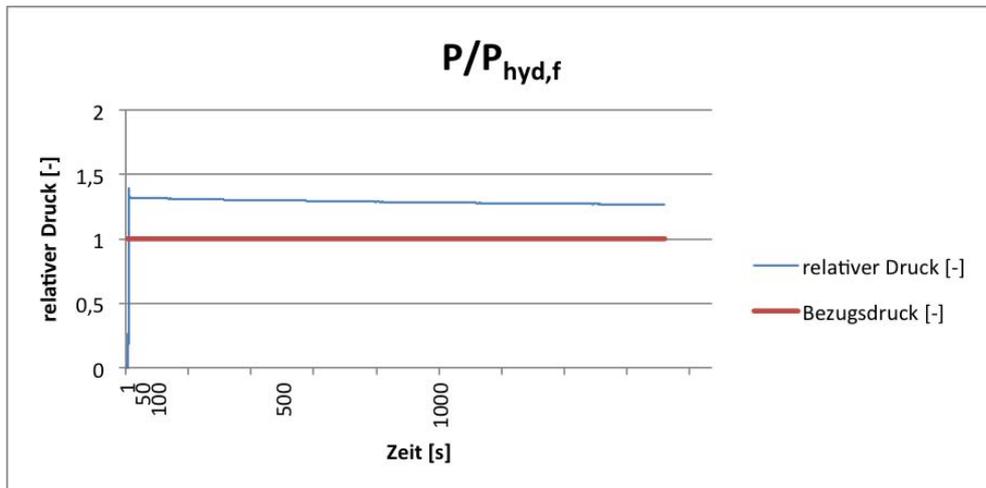


Abbildung 70: Relativer Druck für Smectit  $C_{v,f}= 0,04$  und 25% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 5920 Pa

abgebauter Druck: 50 Pa

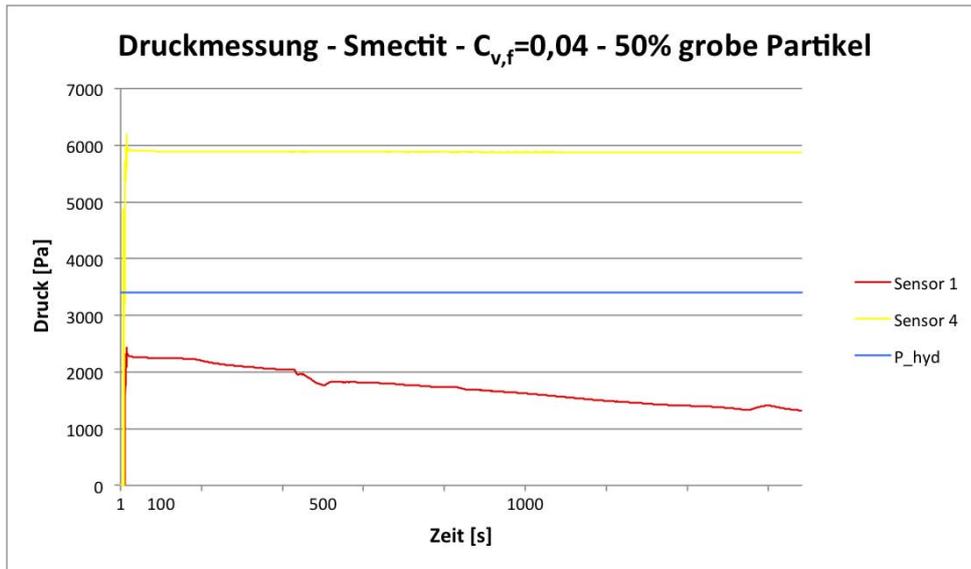


Abbildung 71: Absoluter Druck für Smectit  $C_{v,f}= 0,04$  mit 50% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 165 %

abgebauter Druck: 3 %

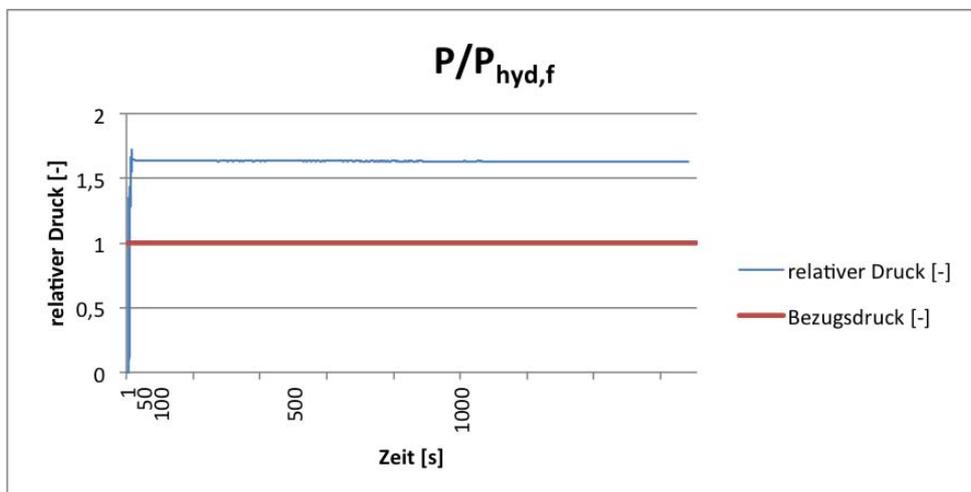


Abbildung 72: Relativer Druck für Smectit  $C_{v,f}= 0,04$  und 50% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 3930 Pa  
 abgebauter Druck: 300 Pa

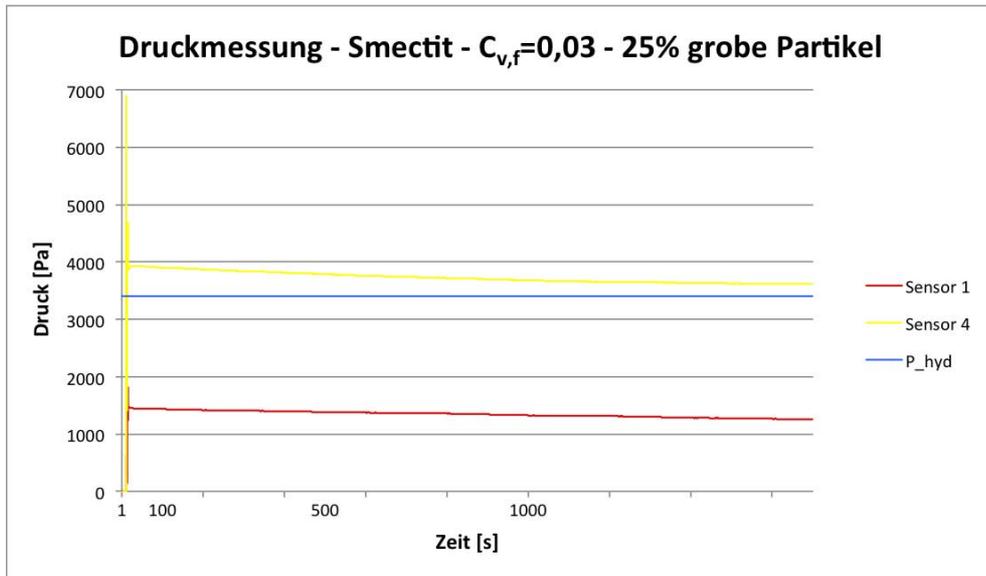


Abbildung 73: Absoluter Druck für Smectit  $C_{v,f}= 0,03$  mit 25% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 135 %  
 abgebauter Druck: 31 %

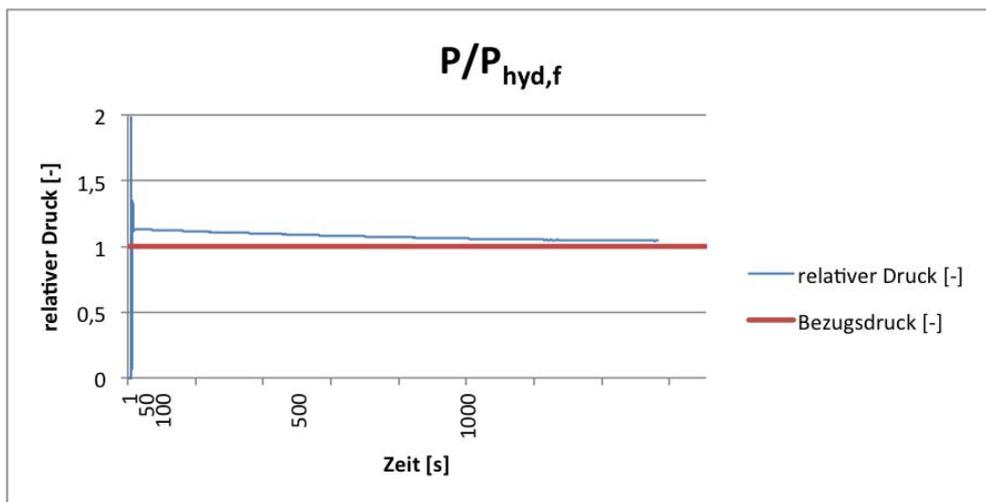


Abbildung 74: Relativer Druck für Smectit  $C_{v,f}= 0,03$  und 25% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 5500 Pa  
 abgebauter Druck: 750 Pa

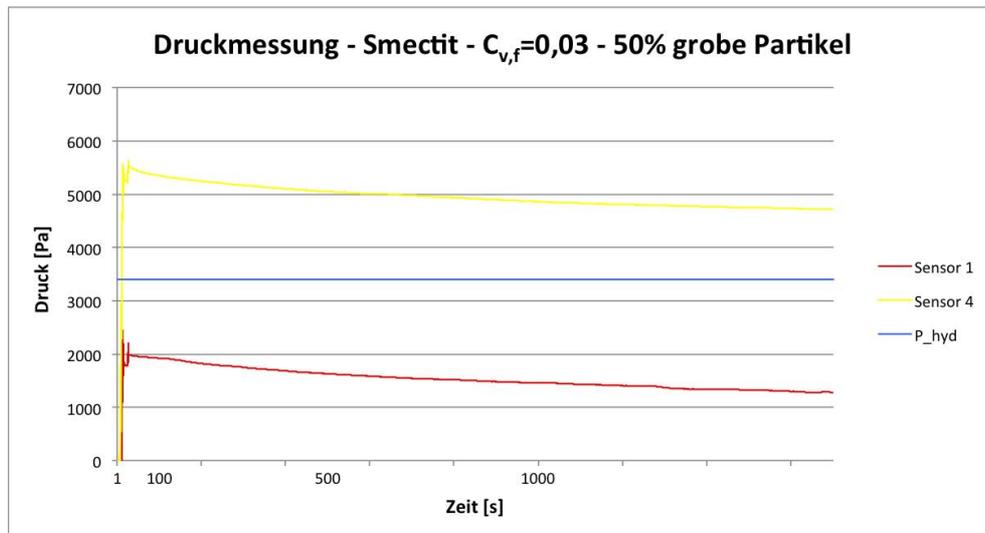


Abbildung 75: Absoluter Druck für Smectit  $C_{v,f}= 0,03$  mit 50% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 157 %  
 abgebauter Druck: 22 %

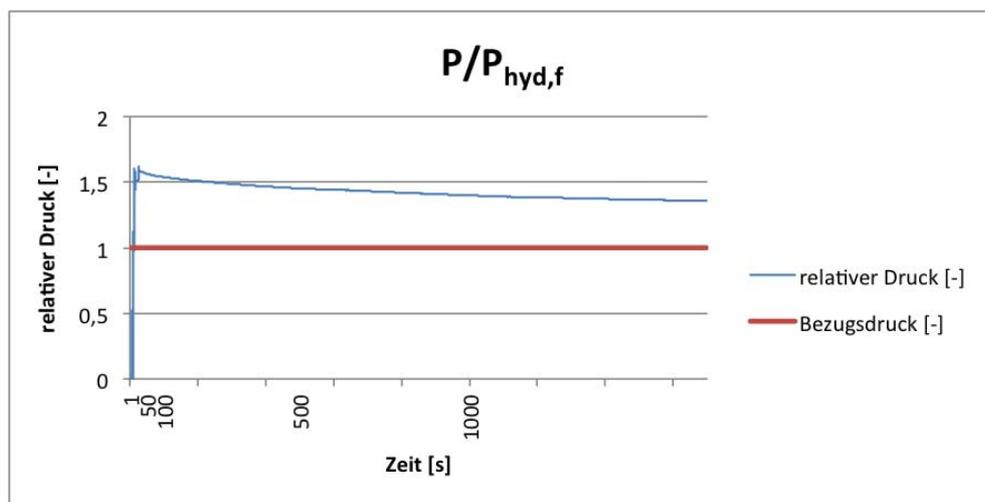


Abbildung 76: Relativer Druck für Smectit  $C_{v,f}= 0,03$  und 50% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 3750 Pa

abgebauter Druck: 170 Pa

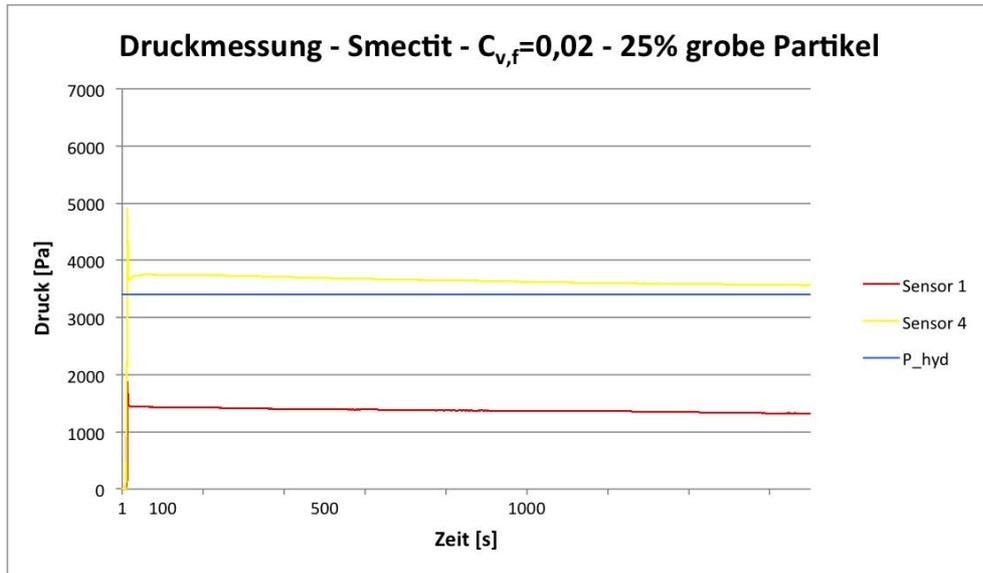


Abbildung 77: Absoluter Druck für Smectit  $C_{v,f}= 0,02$  mit 25% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 146 %

abgebauter Druck: 40 %

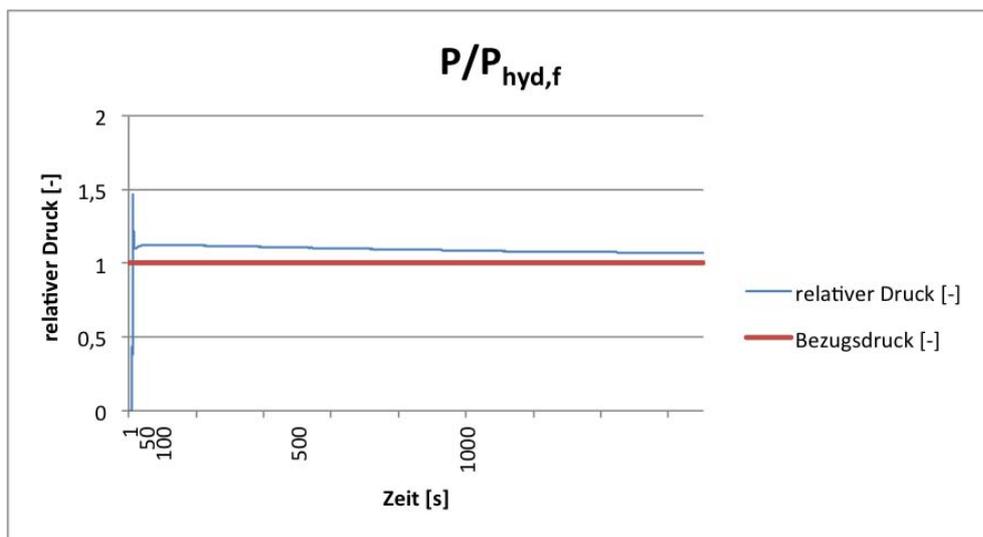


Abbildung 78: Relativer Druck für Smectit  $C_{v,f}= 0,02$  und 25% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 4730 Pa  
abgebauter Druck: 240 Pa

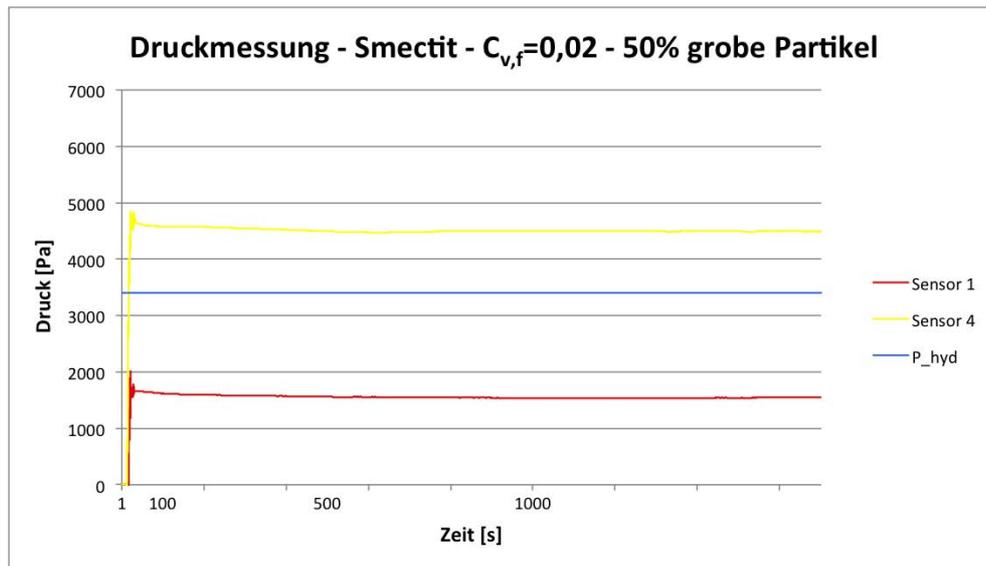


Abbildung 79: Absoluter Druck für Smectit  $C_{v,f}= 0,02$  mit 50% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 145 %  
abgebauter Druck: 10 %

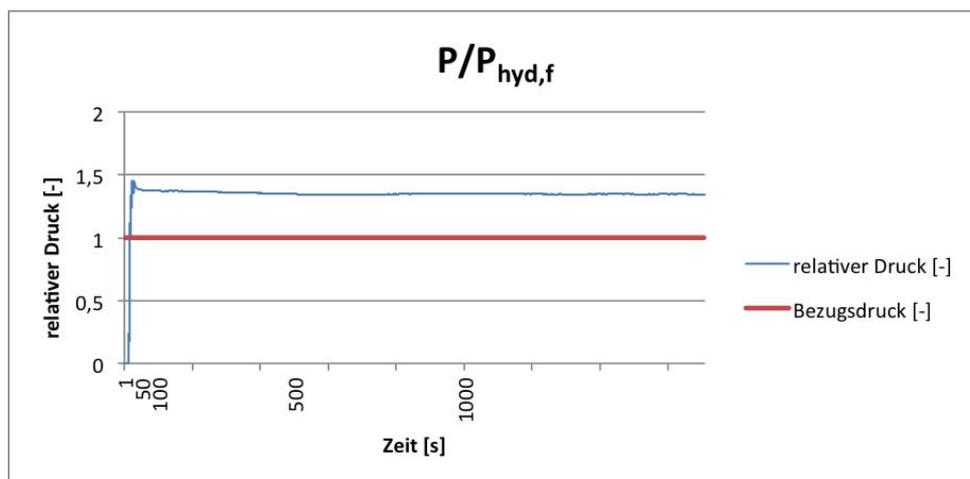


Abbildung 80: Relativer Druck für Smectit  $C_{v,f}= 0,02$  und 50% Anteil grobe Partikel.

## Druckverläufe und Druckverhältnisse – Messdauer ca. 10.700 sek (=3 h)

### **Kaolinit:**

Anfangsdruck: 5560 Pa

abgebauter Druck: 200 Pa

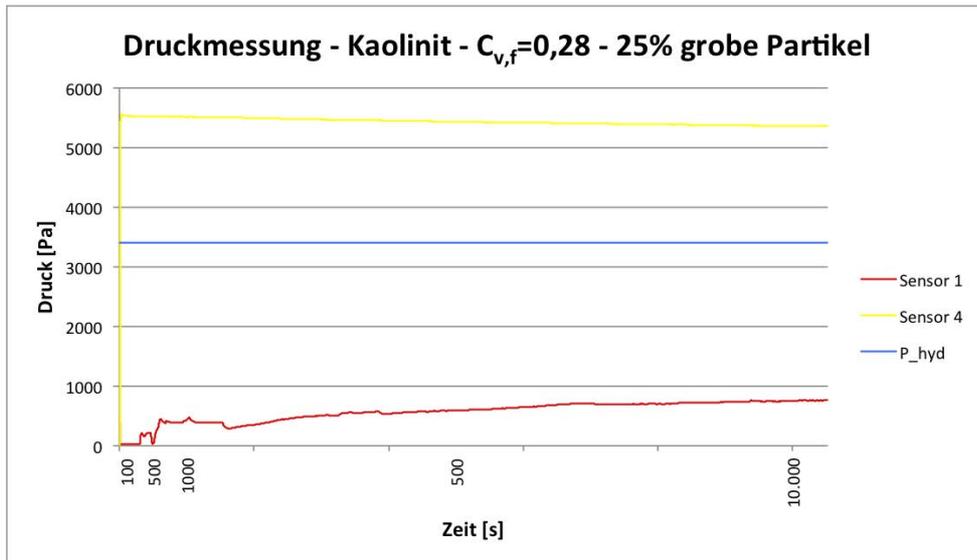


Abbildung 81: Absoluter Druck für Kaolinit  $C_{v,f}=0,28$  mit 25% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 115 %

abgebauter Druck: 4 %

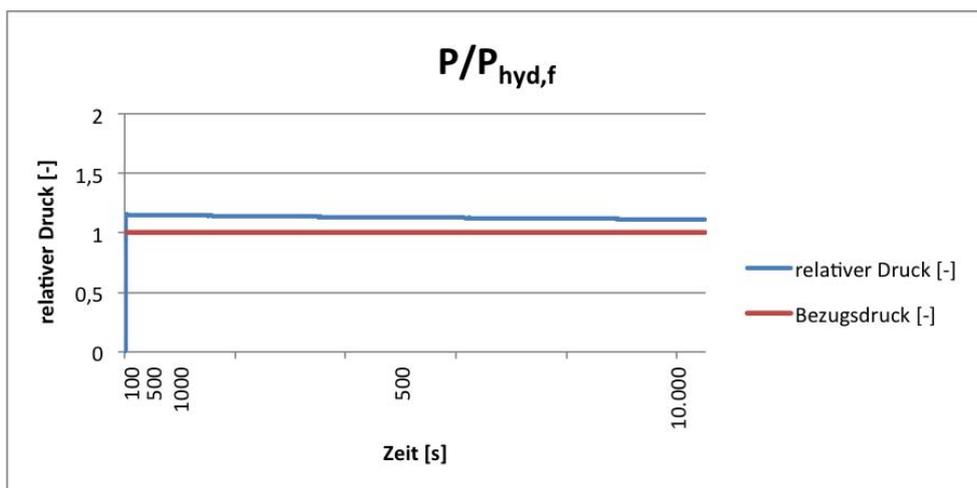


Abbildung 82: Relativer Druck für Kaolinit  $C_{v,f}=0,28$  und 25% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 6320 Pa  
 abgebauter Druck: 490 Pa

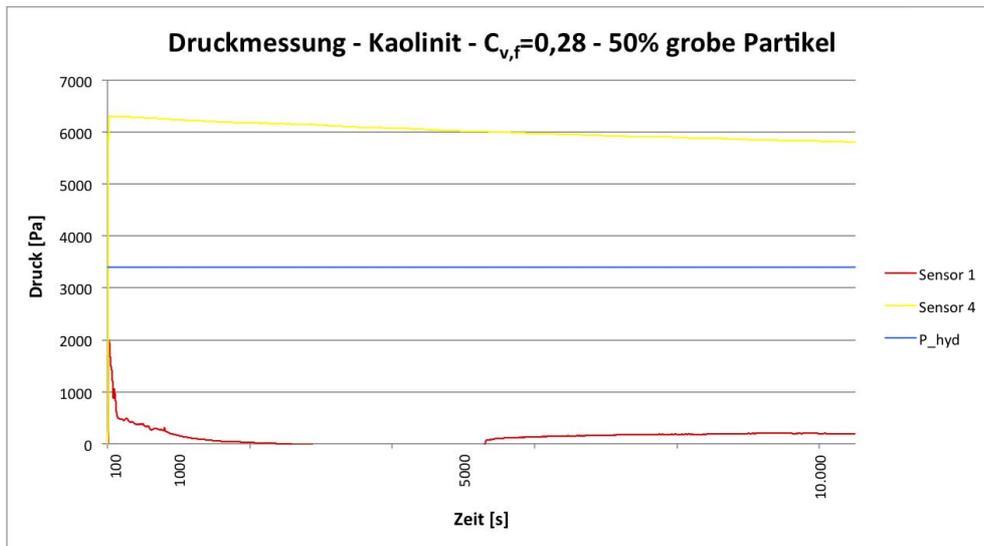


Abbildung 83: Absoluter Druck für Kaolinit  $C_{v,f}= 0,28$  mit 50% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 131 %  
 abgebauter Druck: 11 %

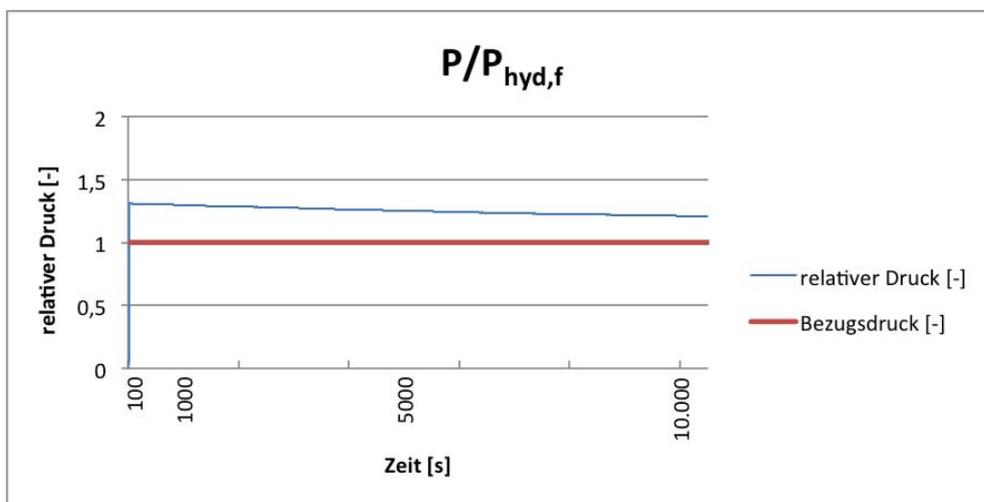


Abbildung 84: Relativer Druck für Kaolinit  $C_{v,f}= 0,28$  und 50% Anteil grobe Partikel.

## Smectit:

Anfangsdruck: 4870 Pa

abgebauter Druck: 200 Pa

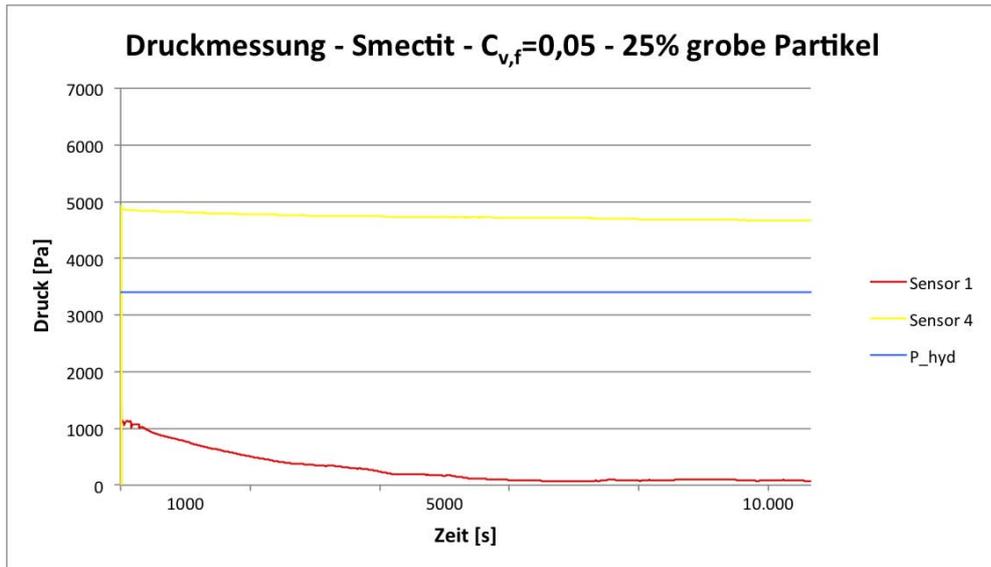


Abbildung 85: Absoluter Druck für Smectit  $C_{v,f}= 0,05$  mit 25% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 130 %

abgebauter Druck: 5 %

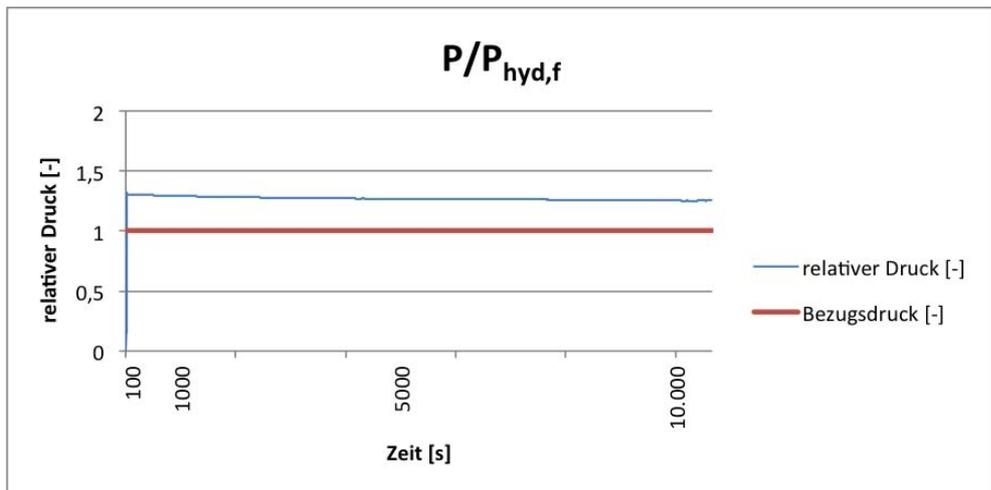


Abbildung 86: Relativer Druck für Smectit  $C_{v,f}= 0,05$  und 25% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 5700 Pa  
abgebauter Druck: 600 Pa

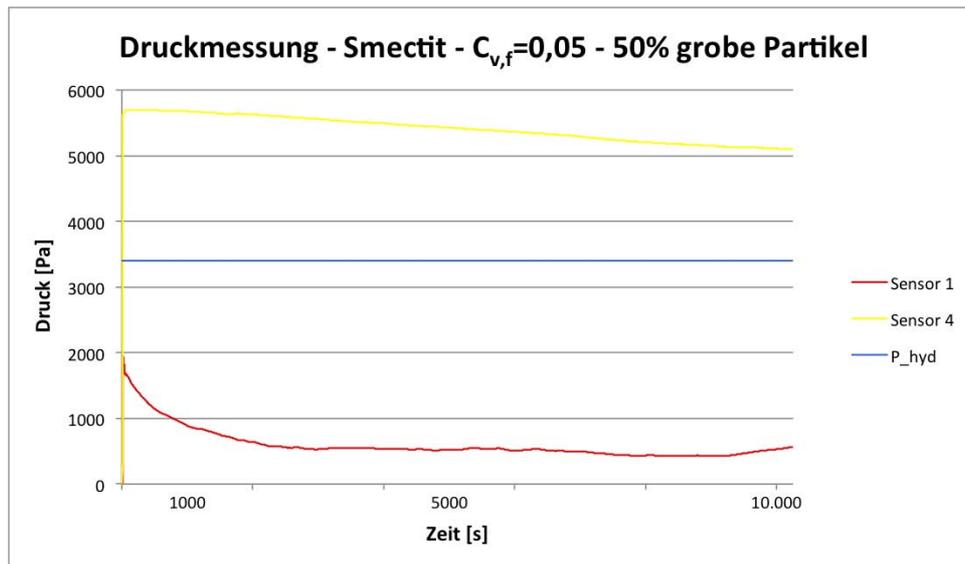


Abbildung 87: Absoluter Druck für Smectit  $C_{v,f}= 0,05$  mit 50% Anteil grobe Partikel.

Anfangsdruck: 152 %  
abgebauter Druck: 16 %

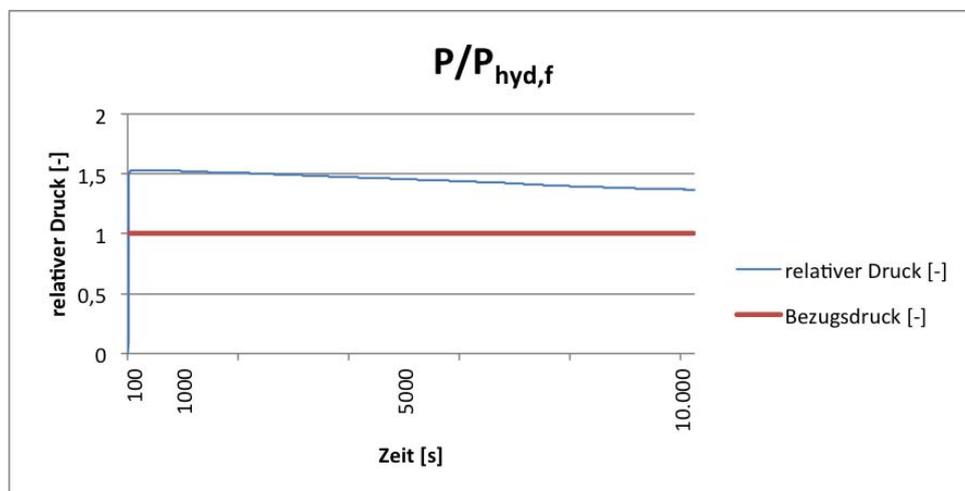


Abbildung 88: Relativer Druck für Smectit  $C_{v,f}= 0,05$  und 50% Anteil grobe Partikel.

**Druckverläufe im Vergleich: gemessen/berechnet mit Diffusions-Koeffizient (Grundlage: hydrostatischer Druck von reinem Wasser)**

**Kaolinit – 25%:**

$$D = 5,5 * 10^{-6}$$

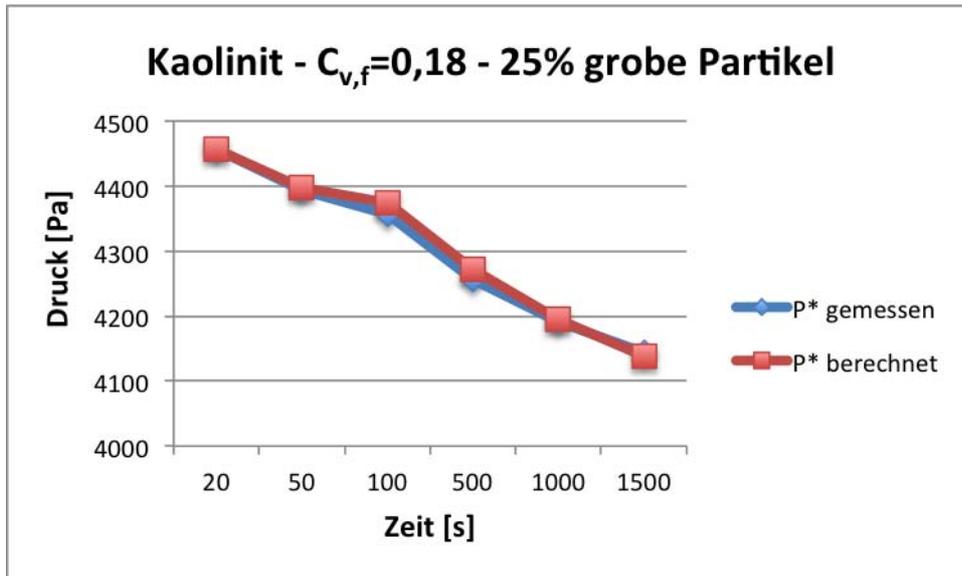


Abbildung 89: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells.

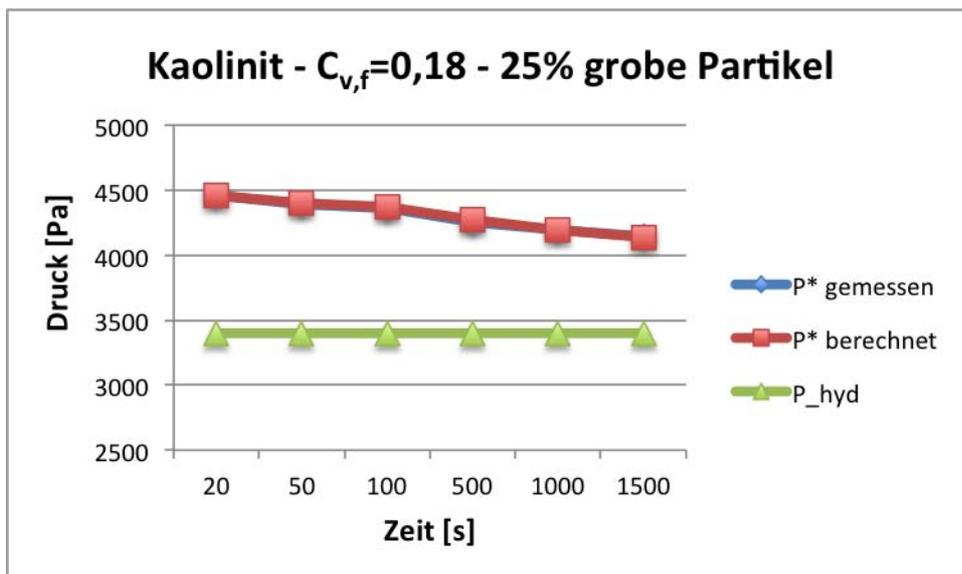


Abbildung 90: Überblick mit hydrostatischem Druck.

$$D = 2,7 * 10^{-6}$$

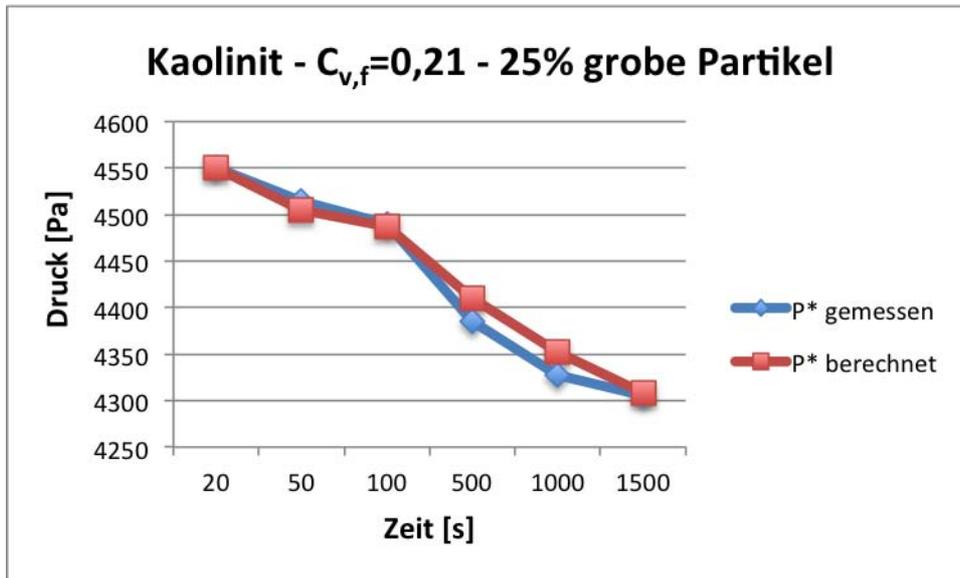


Abbildung 91: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells.

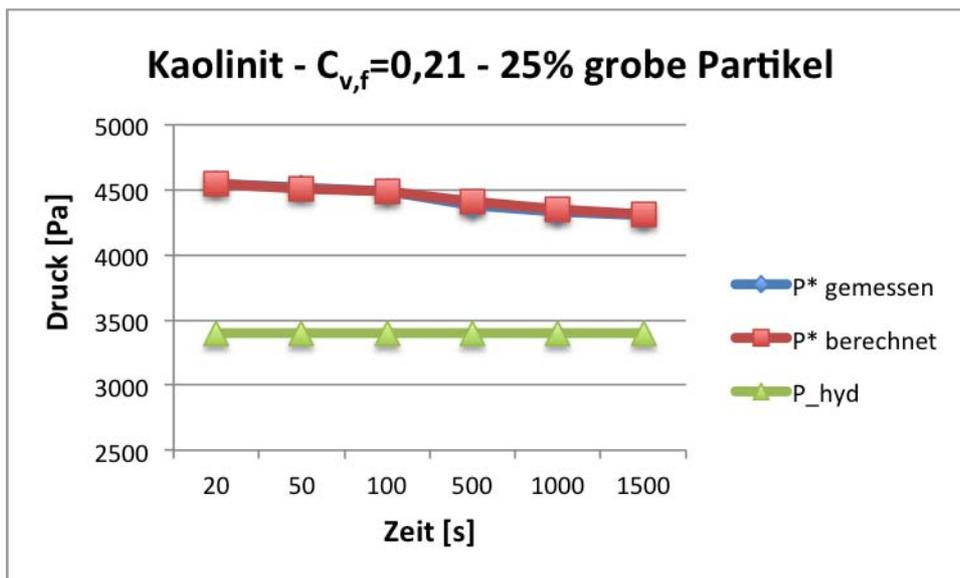


Abbildung 92: Überblick mit hydrostatischem Druck.

$$D = 9 \cdot 10^{-7}$$

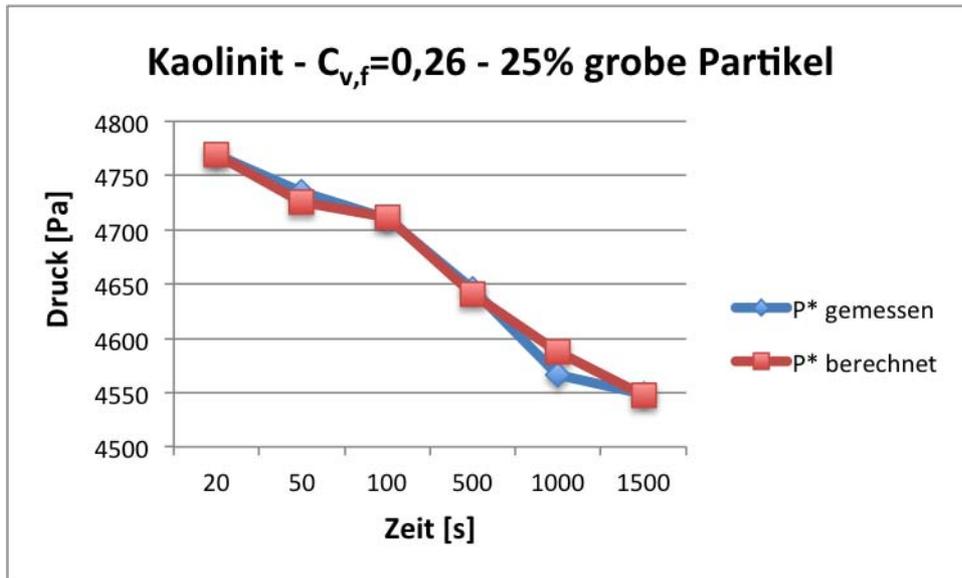


Abbildung 93: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells.

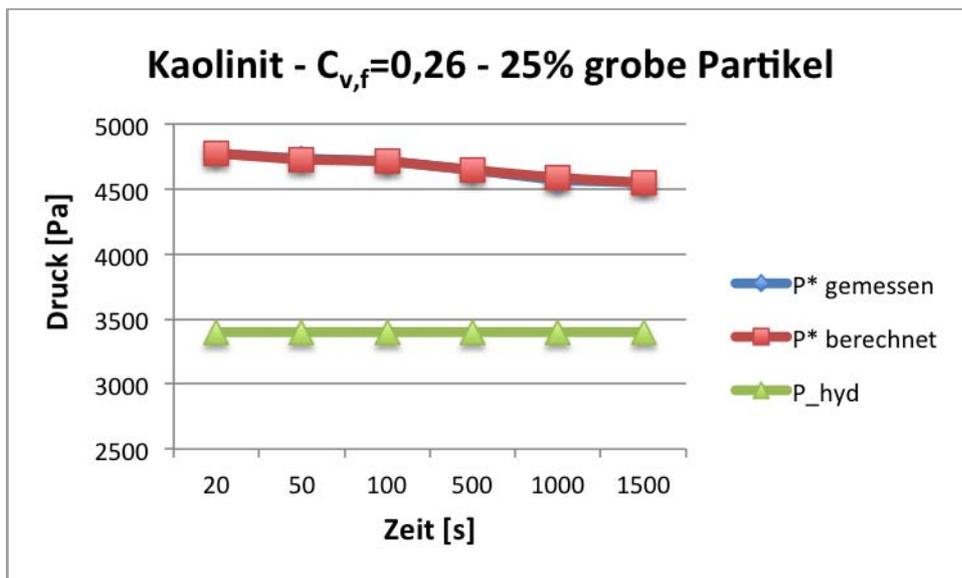


Abbildung 94: Überblick mit hydrostatischem Druck.

$$D = 7,5 * 10^{-8}$$

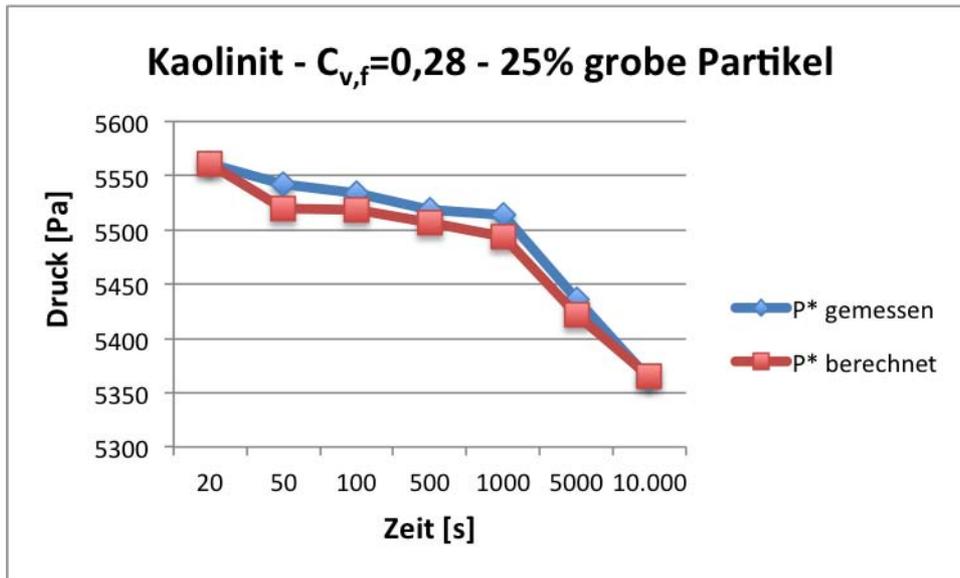


Abbildung 95: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells.

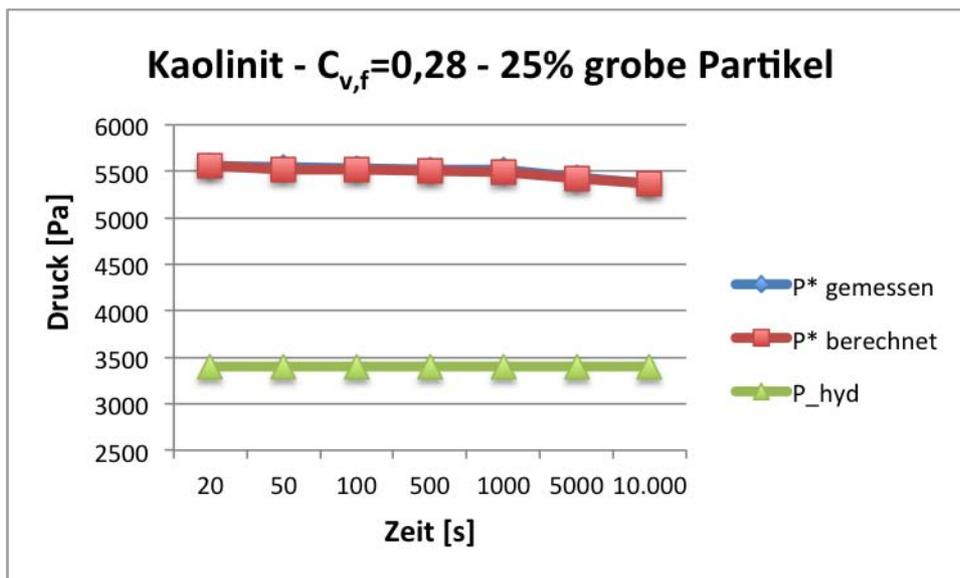


Abbildung 96: Überblick mit hydrostatischem Druck.

## Kaolinit – 50%:

$$D = 1,2 * 10^{-5}$$

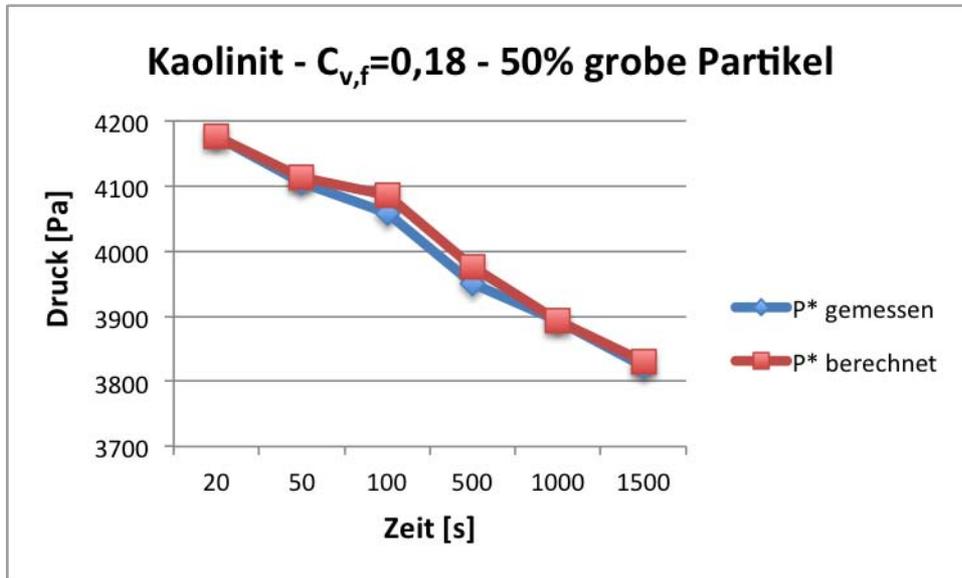


Abbildung 97: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells.

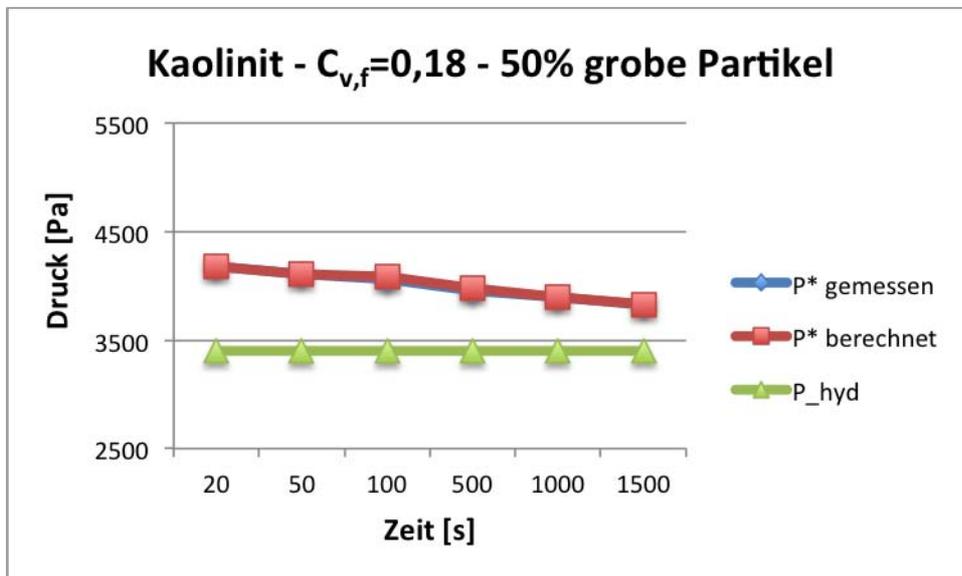


Abbildung 98: Überblick mit hydrostatischem Druck.

$$D = 6 * 10^{-6}$$

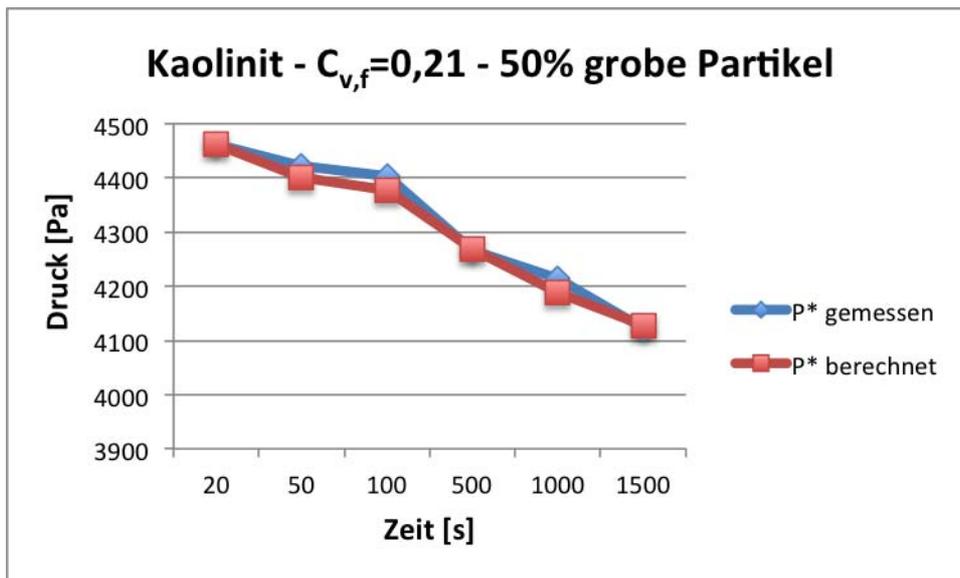


Abbildung 99: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells.

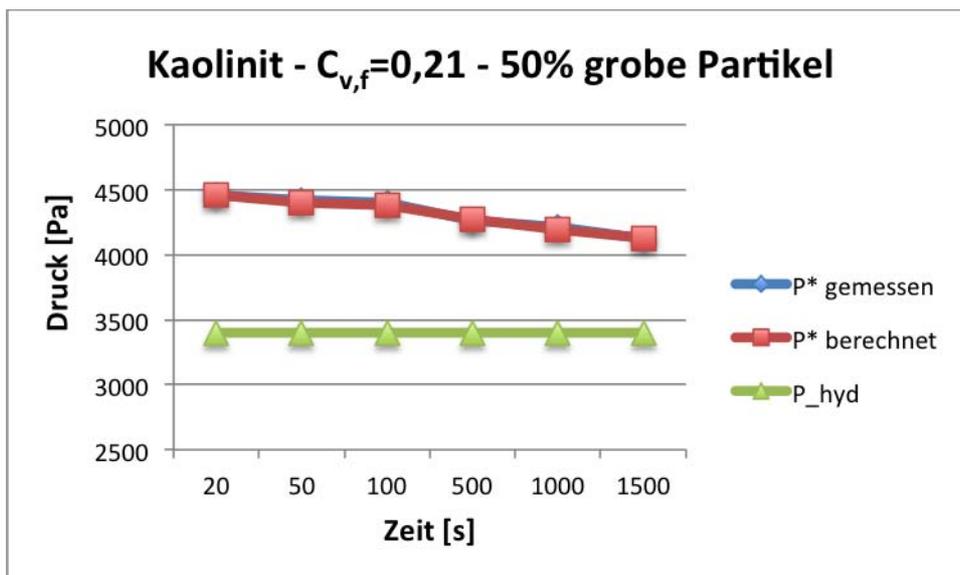


Abbildung 100: Überblick mit hydrostatischem Druck.

$$D = 7 * 10^{-8}$$

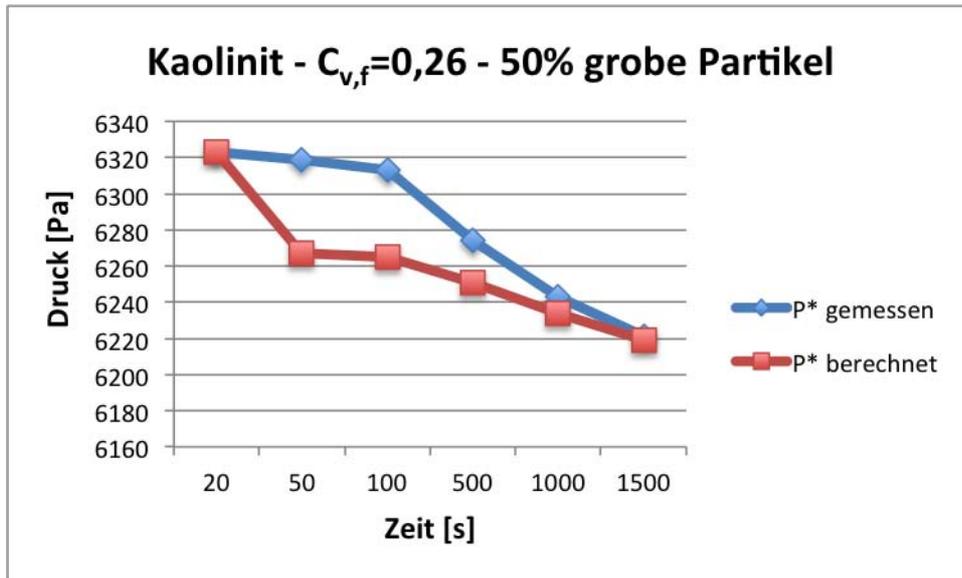


Abbildung 101: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells.

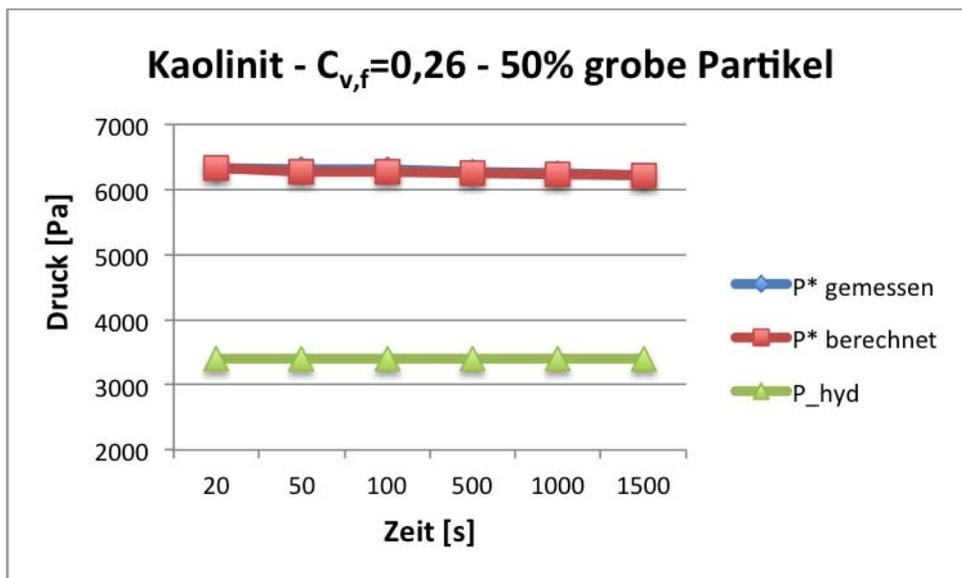


Abbildung 102: Überblick mit hydrostatischem Druck.

$$D = 2,5 * 10^{-7}$$

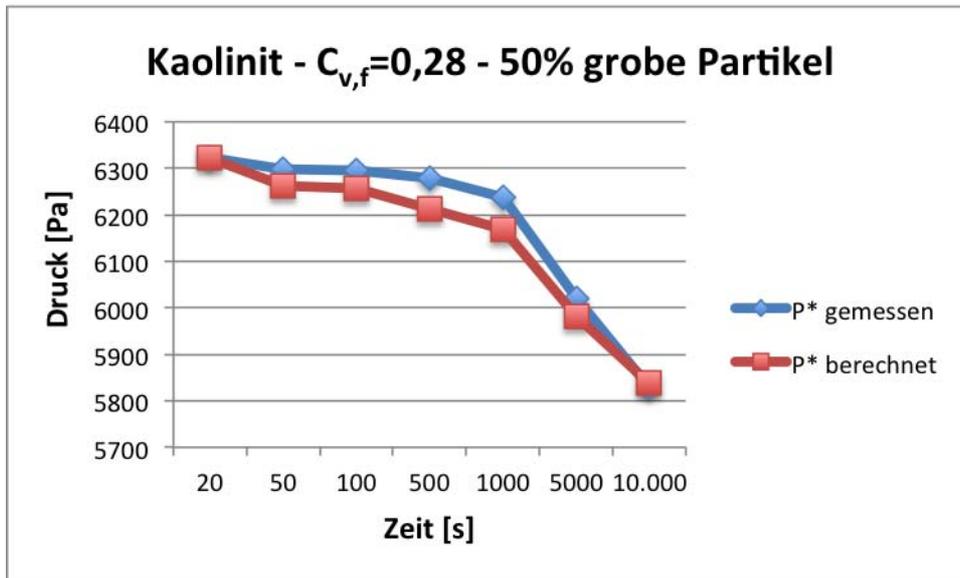


Abbildung 103: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells.

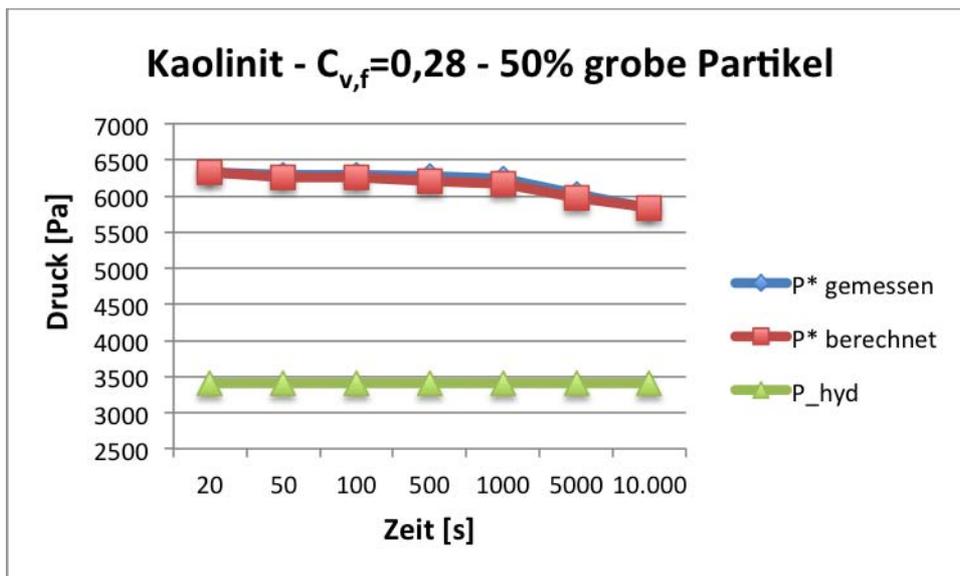


Abbildung 104: Überblick mit hydrostatischem Druck.

## Smectit – 25%:

$$D = 1,5 * 10^{-5}$$

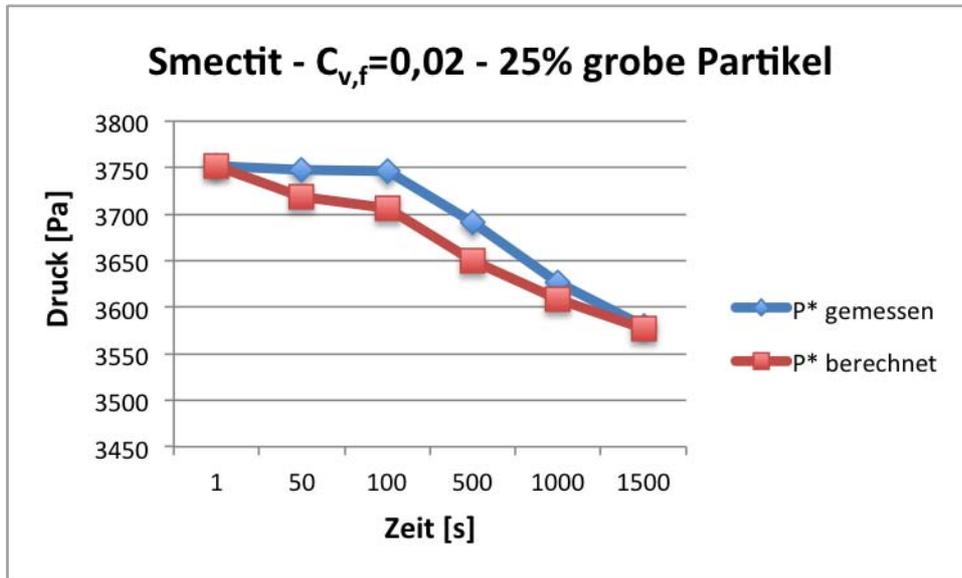


Abbildung 105: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells.

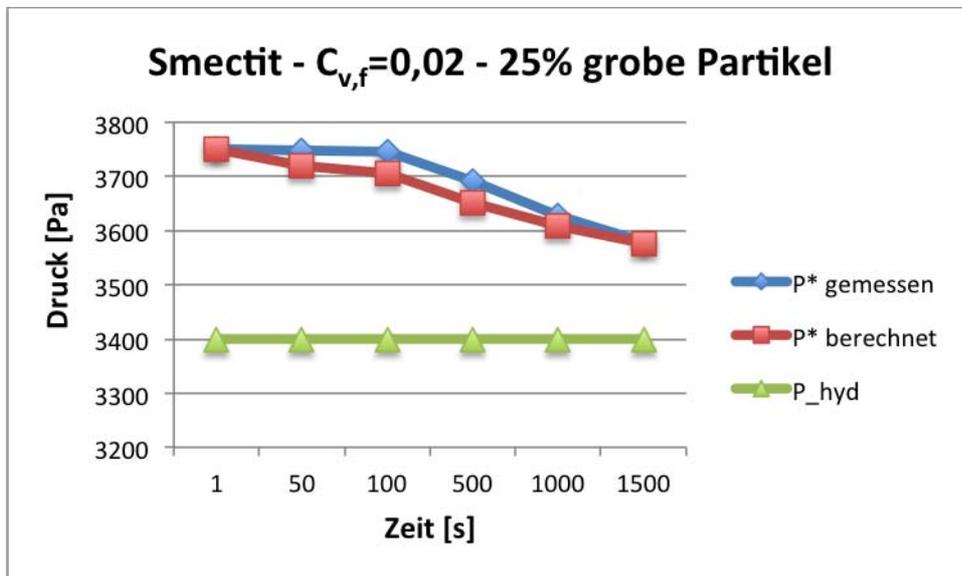


Abbildung 106: Überblick mit hydrostatischem Druck.

$$D = 2 * 10^{-5}$$

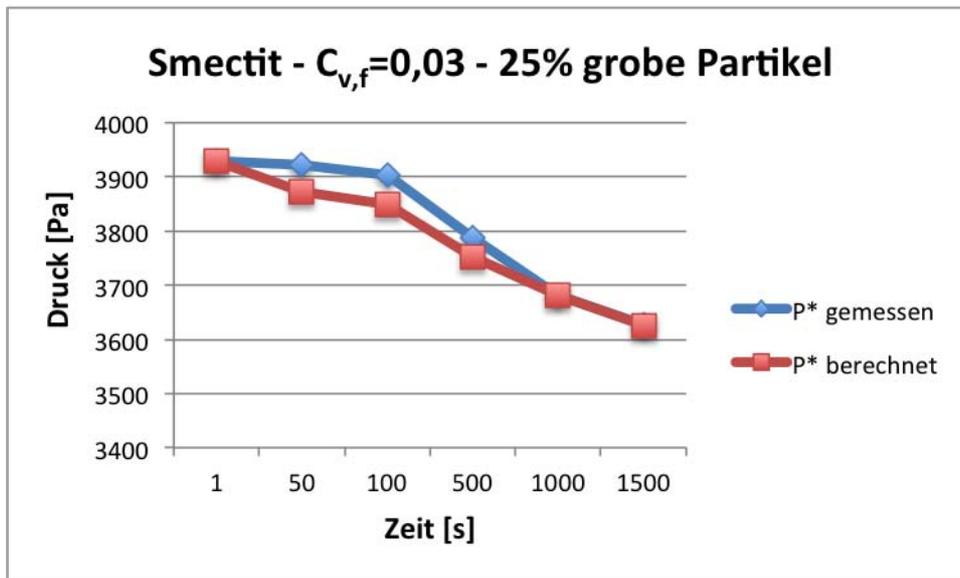


Abbildung 107: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells.

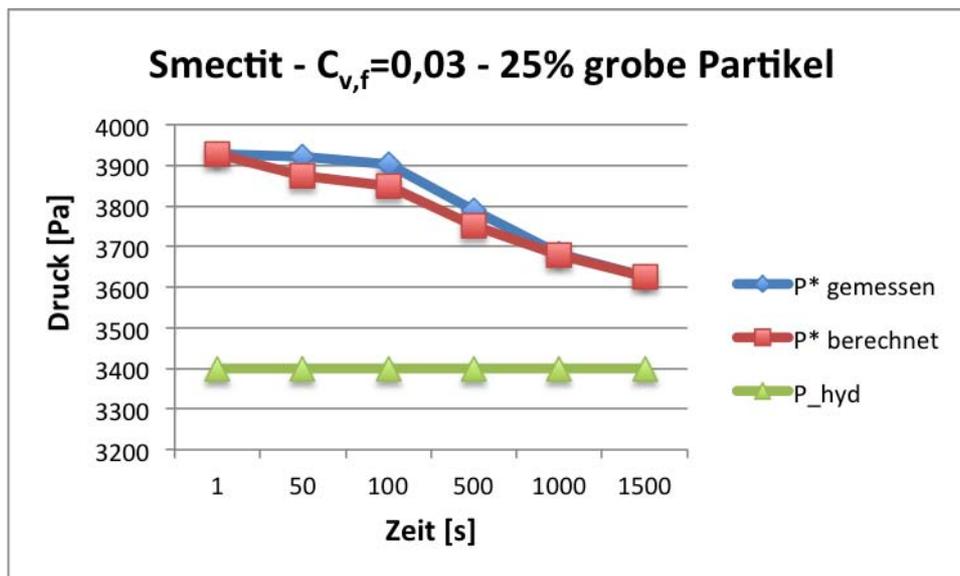


Abbildung 108: Überblick mit hydrostatischem Druck.

$$D = 9,9 * 10^{-7}$$

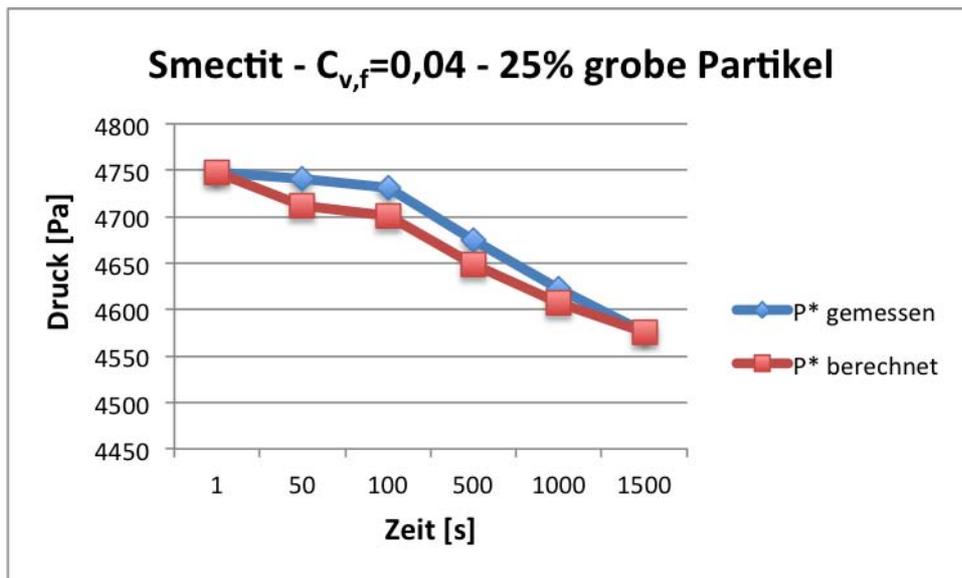


Abbildung 109: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells.

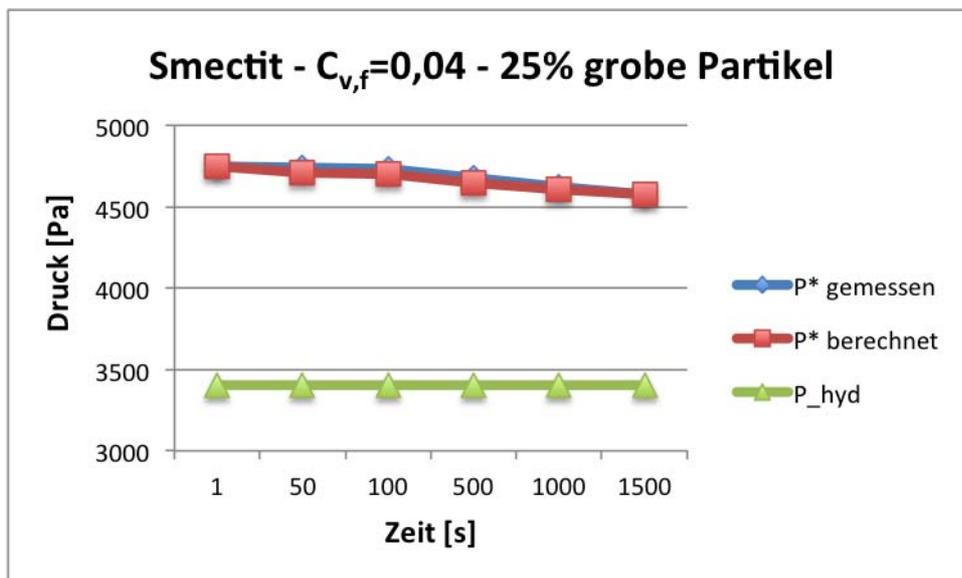


Abbildung 110: Überblick mit hydrostatischem Druck.

$$D = 1,8 * 10^{-7}$$

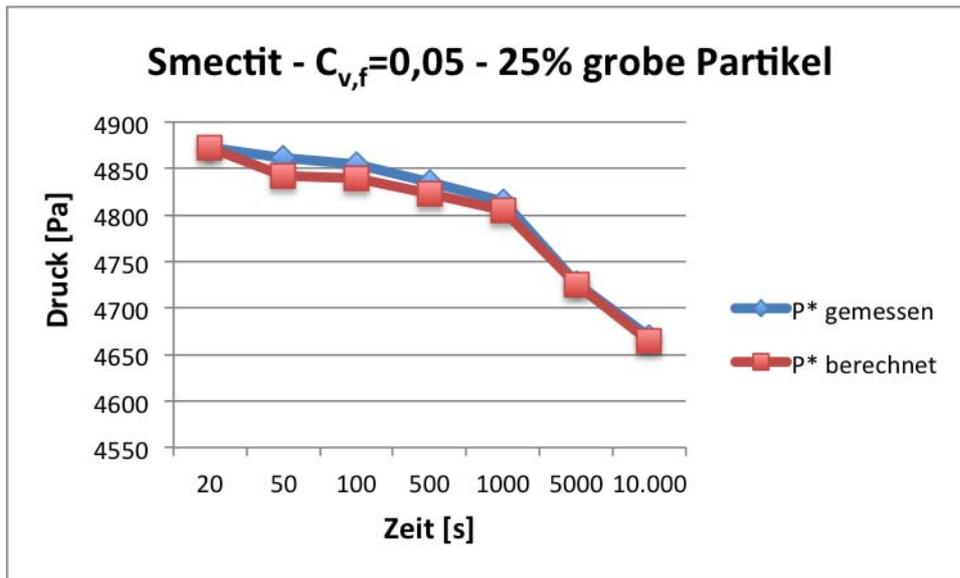


Abbildung 111: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells.

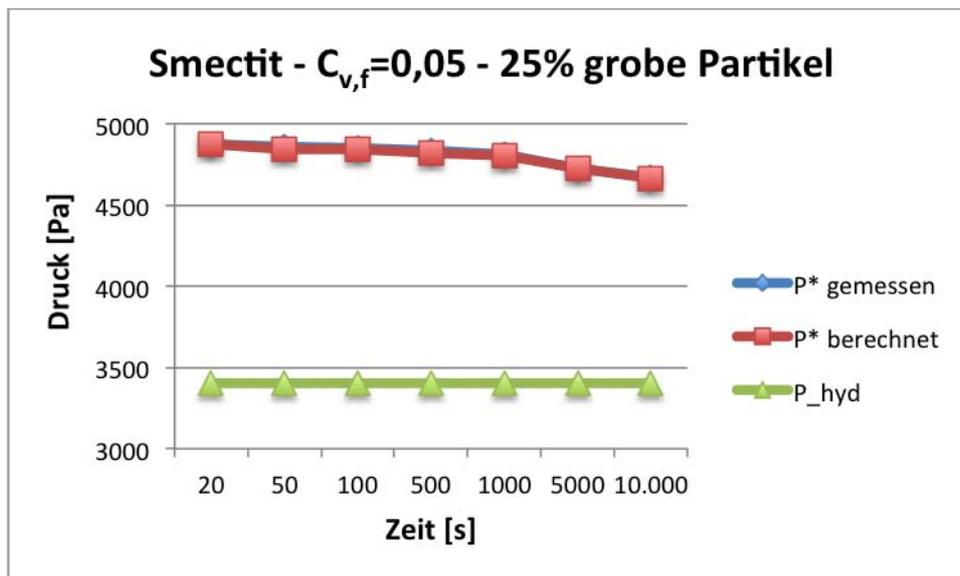


Abbildung 112: Überblick mit hydrostatischem Druck.

## Smectit – 50%:

$$D = 2 * 10^{-6}$$

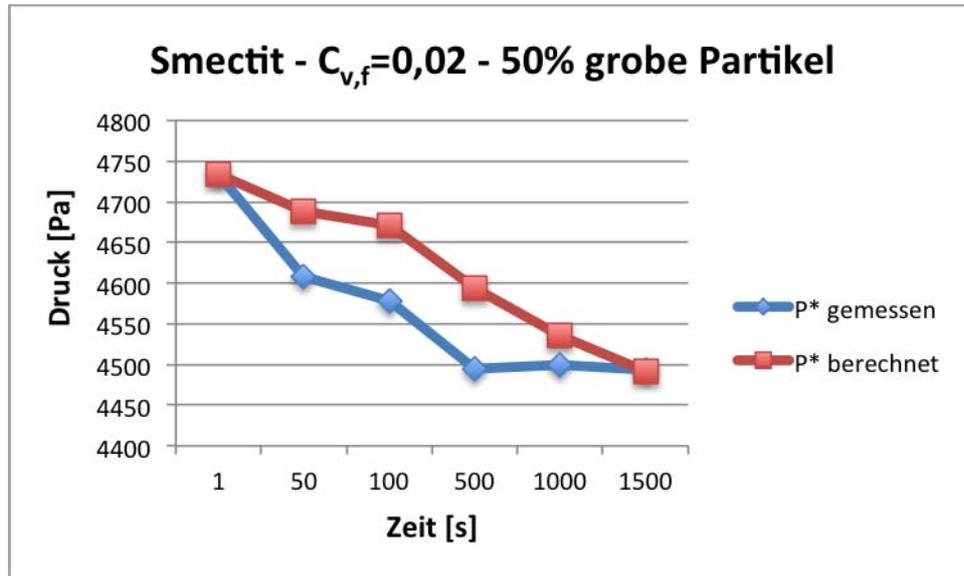


Abbildung 113: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells.

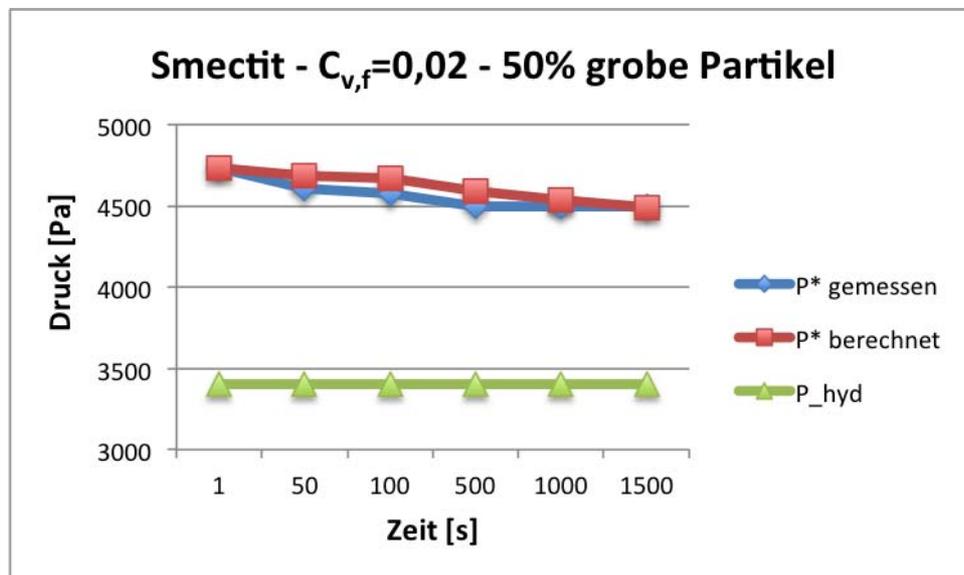


Abbildung 114: Überblick mit hydrostatischem Druck.

$$D = 8 * 10^{-6}$$

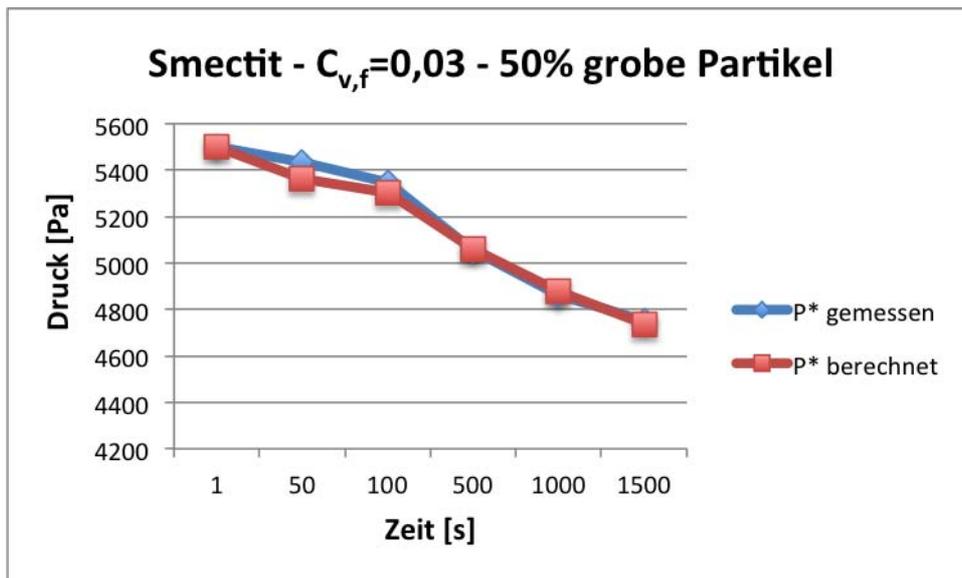


Abbildung 115: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells.

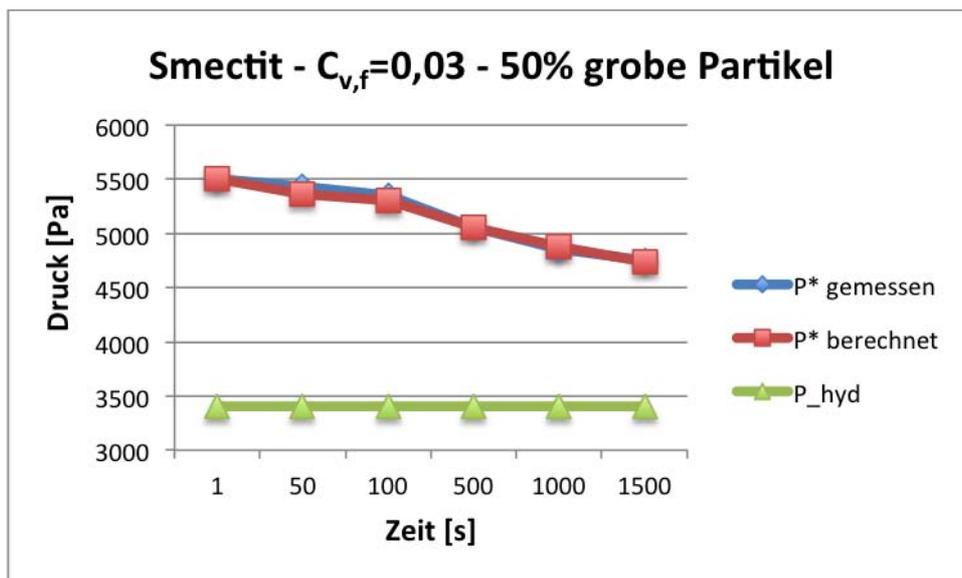


Abbildung 116: Überblick mit hydrostatischem Druck.

$$D = 2 * 10^{-8}$$

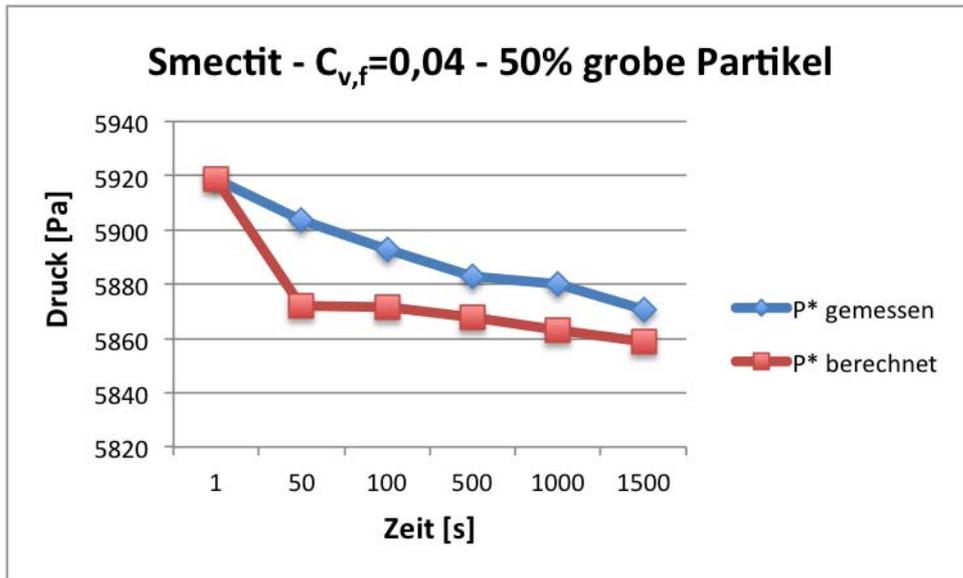


Abbildung 117: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells.

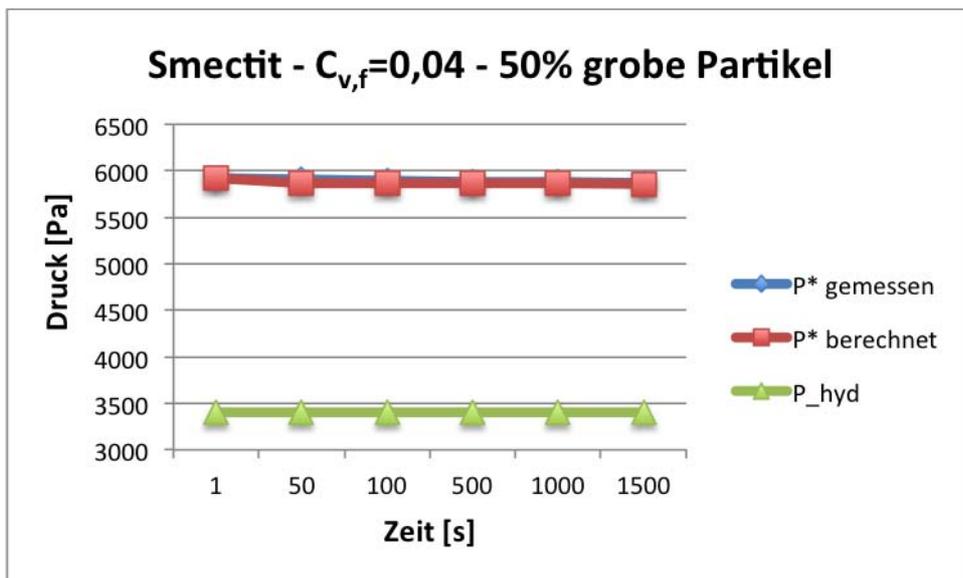


Abbildung 118: Überblick mit hydrostatischem Druck.

$$D = 6 \cdot 10^{-7}$$

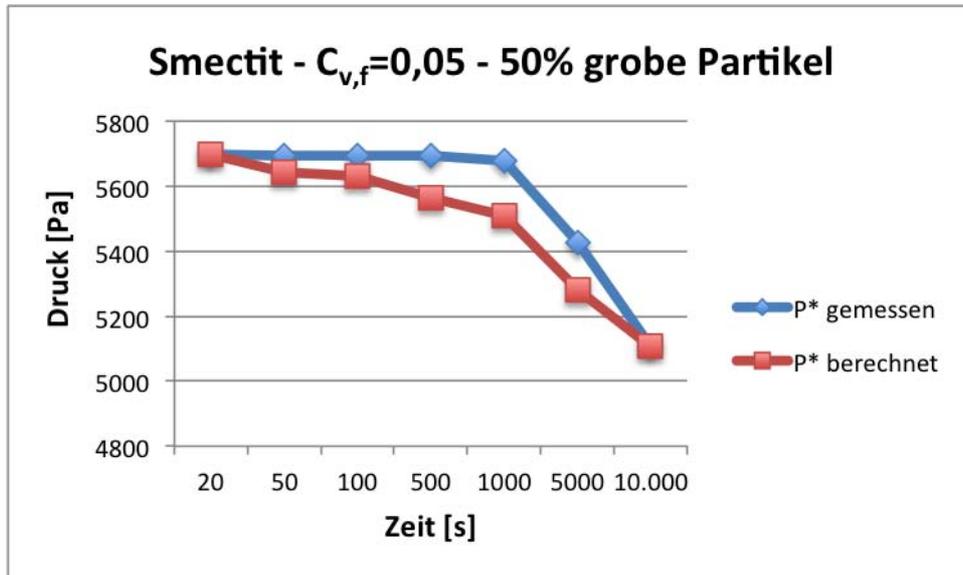


Abbildung 119: Druckverlauf des gemessenen Drucks und der Darstellung des mathematischen Modells.

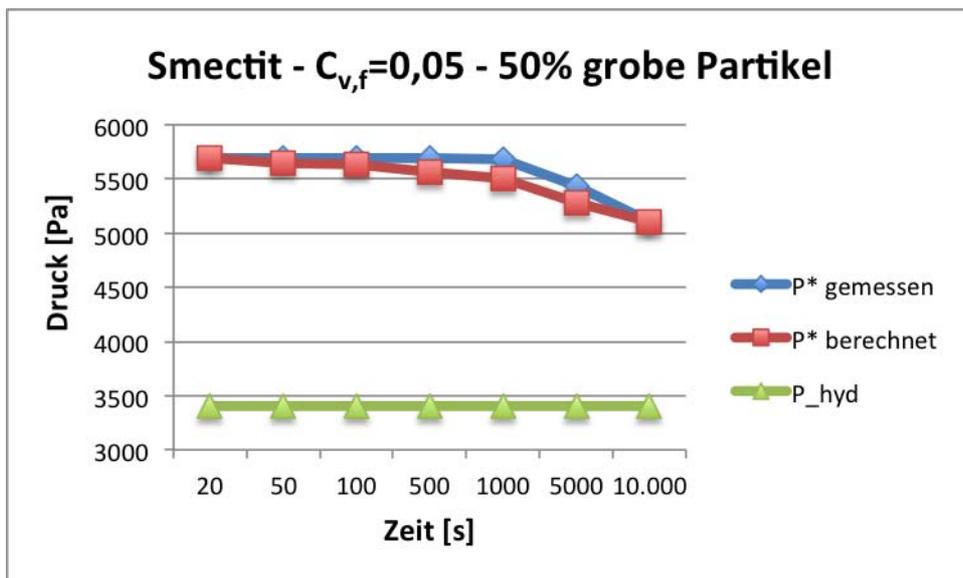


Abbildung 120: Überblick mit hydrostatischem Druck.

Weitere Diagramme, mit den Druckverläufen der gemessenen bzw. mit Diffusions-Koeffizient berechneten Werte auf Grundlage des hydrostatischen Drucks des Fluids, sind auf der beigelegten Daten-CD zu finden.