

# **Auswirkungen der Saugspannung auf physikalische und mechanische Eigenschaften von überkonsolidierten Tonen und Tonsteinen im Verwitterungsprozess**

**Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor rerum naturalium (Dr.rer.nat.)**

**Vorgelegt der**

**Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät  
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg**

**von Frau Dipl.-Geol. Carola Bönsch  
geboren am 26.10.1976 in Halle / Saale**

**Gutachterin / Gutachter:**

1. Prof. Dr. Christof Lempp
2. Prof. Dr. Volker Feeser

Halle / Saale, 22.05.2006

**urn:nbn:de:gbv:3-000010266**

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=nbn%3Ade%3Agbv%3A3-000010266>]

Herbert Pöllmann und Christof Lempp standen Pate für die ursprüngliche Idee der Untersuchung von Interaktionen zwischen Wasser und wässrigen Lösungen und Tonen. Das Land Sachsen-Anhalt ermöglichte mir durch die Vergabe des Graduiertenstipendiums überhaupt erst mit meinen Untersuchungen zu beginnen, wobei sich das Thema der wechselfesten Gesteine zunehmend als der interessanteste und bisher am wenigsten verstandene Teilaspekt der übergeordneten Problematik herauskristallisierte. Für die fachliche Betreuung des Themas möchte ich Christof Lempp besonders danken.

Die quantitative tonmineralogische Analyse erfolgte in der Abteilung Geochemie am Institut für Umweltgeologie der Technischen Universität Braunschweig. Besonderer Dank gebührt in diesem Zusammenhang René von der Heyde, der zudem zusätzlich teilweise noch bei der Probennahme im Gelände behilflich war. Für die REM-Aufnahmen danke ich Jürgen Göske und ganz besonders Marc Fylak vom Zentrum für Werkstoffanalytik Lauf.

Die Unterstützung in der Arbeitsgruppe Ingenieurgeologie an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg – insbesondere die helfenden Hände von Elisabeth Schnerch und Juri Buchantschenko bei den Laborversuchen sowie die fruchtbaren fachlichen Diskussionen mit Enrico Bauch – waren oftmals Rückhalt und Motivation, vor allem als in der Umzugsphase des Instituts die Zeit im Chaos davon zu rennen schien...

Zahlreiche hilfreiche Anregungen wurden mir in fachlichen Diskussionen gegeben, es würde den Rahmen sprengen, hier jeden namentlich aufzuführen, der durch seine Fragen oder kritischen Anmerkungen einen Beitrag dazu geleistet hat. Besonders erwähnen möchte ich jedoch Peter Schick an der Technischen Universität Berlin und Gerd Gudehus am Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Hochschule Karlsruhe wegen des angeregten Schriftverkehrs über Saugspannungen und Überkonsolidation. Ganz besonders dankbar bin ich Asuri Sridharan vom Indian Institute of Science, der mir mehrere seiner in Deutschland schwer zu beschaffenden Publikationen einfach per Post übersandte. Wichtige Hinweise zu Detailfragen einzelner Untersuchungen kamen z.B. von Ulrich Mann am Forschungszentrum Jülich zur Verwendung eines Kryotransfersystems für die Rasterelektronenmikroskopie, von Stefan Krumm an der Universität Erlangen zu Fragen der Tonmineralogie und von Günter Kahr an der ETH Zürich zum Quellverhalten von Tonen.

Der Leipziger Firma ehemals Jessberger & Partner (jetzt CDM Jessberger) – hier insbesondere Frau Renker – möchte ich für die komplikationslose zur Verfügungstellung von Daten und Probenmaterial, welches letztlich leider nur randlich für die Erprobung diverser Versuche in Einsatz kam, herzlich danken. Die Firmen Zementwerk Deuna, Frank Zeller (Steinbruch Diethenhan), Hoffmann (Steinbruch Wüstenzell), Bayrische Ziegelunion (Steinbruch Wiesenfeld) und Trost-Ziegelwerke Essingen erlaubten freundlicherweise die Beprobung der Tonsteinverwitterungsprofile auf ihren Firmengeländen.

Mehr als ein Problem mit dem PC hätte mich wesentlich mehr Nerven und Zeit gekostet, wenn mir nicht Uwe Schurig zu fast jeder Tages- und Nachtzeit mit seinem Wissen bereitwillig weitergeholfen hätte. Dafür und für inzwischen viele Tassen Tee, offene Ohren und Frühstücksbrötchen auf diesem Wege ein Dankeschön. Meine Familie und meine Freunde haben auf unterschiedlichste Weise ihren Anteil daran, dass ich diese Dissertation fertig stellen konnte. Würde ich versuchen, sie hier alle namentlich aufzuführen, würde ich ganz sicher jemanden zu Unrecht vergessen. Deshalb möchte ich an dieser Stelle ihnen allen gemeinsam noch einmal einfach nur Danke sagen...

Halle / Saale, 13. Dezember 2005

## 1 Zusammenfassung

**Zusammenfassung:** Der Versuch die wechselnden mechanischen Eigenschaften der überkonsolidierten halbfesten Tonsteine zu erklären, war Ziel dieser Arbeit. Hierfür wurde mit Hilfe verschiedener experimenteller Untersuchungen zunächst versucht, die augenscheinlichen Zerfallsprozesse zu verstehen und zu quantifizieren.

Es konnten eine Modellvorstellung für unterschiedliche Zerfallsmechanismen von Tonsteinen und eine Möglichkeit zur Quantifizierung der Zerfallsneigung gefunden werden. Dabei wurde deutlich, dass die tonmineralogische Zusammensetzung den Zerfallsmechanismus bestimmt, auf die Zerfallsintensität aber keinen Einfluss hat. Innerhalb der betrachteten Verwitterungsprofile konnte im Rahmen der technischen Möglichkeiten keine signifikante Änderung der tonmineralogischen Zusammensetzung durch Verwitterung festgestellt werden. Folglich kann man die Tonminerale nicht für das unterschiedliche mechanische Verhalten verschieden stark verwitterter Tonsteine verantwortlich machen. Trotz unterschiedlicher Zerfallsmechanismen und unterschiedlicher tonmineralogischer Zusammensetzung erreichen Röt-Tonsteine und Opalinuston bei vergleichbaren Randbedingungen und gleichem Verwitterungsgrad ähnliche Festigkeiten im direkten Scherversuch. Saugspannungen im ungesättigten Porenraum erhöhen die Festigkeit, jedoch sind die Modellansätze zur Quantifizierung aus der ungesättigten Bodenmechanik für die überkonsolidierten Tone nicht ohne weiteres anwendbar.

Für ein besseres Verständnis der Zusammenhänge zwischen Saugspannung und Festigkeit wurden Untersuchungen an einem wenig überkonsolidierten homogenen Tonboden durchgeführt. Dabei wurde sich im Wesentlichen auf die Bestimmung der charakteristischen Saugspannungskurve und die wassergehaltsabhängige Scherfestigkeit konzentriert. Dabei ergaben sich interessante Erkenntnisse zum Einfluss der Schergeschwindigkeit im direkten Scherversuch auf die ermittelte Scherfestigkeit.

**Abstract:** It was the intention to explain the fast changing mechanical behaviour of overconsolidated soft rock claystone. At first it was tried to understand the decay processes by the use of different experimental investigations.

It was possible to find a model for different decay mechanisms and a possibility for quantification of disintegration. The clay mineralogical composition influences the decay mechanism but does not influence the intensity of disintegration. There are no significant changes in clay mineralogy in the investigated weathering profiles. Clay minerals are not the reasons for different strength of differently weathered claystones. In spite of different decay mechanisms and different mineralogical composition Röt claystones and Opalinuston with similar weathering degree under same conditions behave very similar. Suction tensions in pore space increase strength. The mathematical models for quantification from unsaturated soil mechanics can not be used.

For better understanding of the relationship between suction tension and shear strength low overconsolidated homogenous tertiary clay was investigated. The characteristic water curve and the shear strength depending on water content were determined. There are also interesting influences of the shear velocity on shear strength.

## 2 Inhaltsverzeichnis

	Danksagung	2
<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Einführung</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Sedimentation, Diagenese und Verwitterung von Tonen bzw. Tonsteinen</b>	<b>8</b>
4.1	Sedimentationsmechanismen	8
4.1.1	<i>Freie granulare Sedimentation</i>	8
4.1.2	<i>Gehinderte Sedimentation</i>	9
4.1.3	<i>Strukturierte Sedimentation</i>	9
4.2	Sedimenttypen und -strukturen	10
4.3	Konsolidierung und Diagenese von tonigen Sedimenten	11
4.3.1	<i>Gravitative Kompaktion</i>	13
4.3.2	<i>Nicht-sedimentäre Gefügeveränderungen</i>	14
4.4	Überkonsolidation	15
4.5	Verwitterung	17
4.6	Effekte an Grenzflächen	19
4.6.1	<i>Zusammenwirken der physiko-chemischen Eigenschaften des Wassers und der Gasphase</i>	20
4.6.2	Das Potentialkonzept der Saugspannung	21
<b>5</b>	<b>Geologische Beschreibung des verwendeten Probenmaterials</b>	<b>24</b>
5.1	Geologie und Petrographie der Röt-Tonsteine	25
5.2	Geologie und Petrographie des Opalinustons	26
5.3	Geologie und Petrographie des tertiären Tons	27
<b>6</b>	<b>Versuchsbeschreibungen</b>	<b>29</b>
6.1	Wasseraufnahmevermögen	29
6.1.1	<i>Wasseraufnahmevermögen nach Enslin / Neff</i>	29
6.1.1	<i>Aufnahme von Wasser aus der Dampfphase</i>	31
6.2	Spezifische Oberfläche	33
6.3	Trocken- und Korndichte	35
6.3.1	<i>Trockendichte</i>	35
6.3.2	<i>Korndichte</i>	35
6.4	Korn- und Aggregatgrößenbestimmung	37
6.4.1	<i>Aggregatgrößenverteilung mittels Siebanalyse</i>	37
6.4.2	<i>Lasergranulometrie</i>	37
6.4.3	<i>Sedimentationsanalyse mit Röntgendetektion</i>	38
6.5	Direkter Scherversuch im Rahmenschergerät	39
6.5.1	<i>Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Scherfestigkeit bindiger Böden</i>	40
6.5.2	<i>Einfluss der Wasserverhältnisse auf die Scherfestigkeit halbfester Tonsteine</i>	42
6.6	Kriechversuche	42
6.7	Quell- und Schrumpfverhalten	44
6.8	Wasserrückhaltevermögen	46
6.9	Konsistenzgrenzen	48
6.10	Mineralcharakterisierung	48
6.11	REM	49
<b>7</b>	<b>Versuchsergebnisse</b>	<b>50</b>
7.1	Wasseraufnahme	50
7.1.1	<i>Wasseraufnahmevermögen nach Enslin / Neff</i>	50
7.1.1.1	<i>Wasseraufnahmevermögen der Tonsteinaggregate</i>	50
7.1.1.2	<i>Wasseraufnahme des Anteils &lt; 2 µm</i>	53
7.1.1.3	<i>Mögliche systematische Versuchsfehler bei der Wasseraufnahme nach Enslin-Neff</i>	54
7.1.2	<i>Aufnahme von Wasser aus der Dampfphase</i>	56
7.2	Spezifische Oberfläche (BET-Methode)	58
7.2.1	Spezifische Oberfläche der Tonsteinaggregate	58
7.2.2	Spezifische Oberfläche der separierten Anteile < 2µm	61

7.3	Vergleich von spezifischer Oberfläche (BET-Methode), Wasseraufnahmevermögen und Wasseraufnahme aus der Dampfphase	62
7.3.1	<i>Tonsteinaggregate</i>	62
7.3.2	<i>Kornfraktion &lt; 2 µm</i>	65
7.4	Trocken- und Korndichte	66
7.4.1	<i>Trockendichte</i>	66
7.4.2	<i>Korndichte</i>	66
7.5	Korngrößenbestimmung	66
7.5.1	<i>Zerfall durch wiederholte Befeuchtung und Trocknung</i>	66
7.5.2	<i>Vergleich der unterschiedlichen Messmethoden für Feinanteil</i>	69
7.5.3	<i>Korngrößenverteilung des Feinanteils</i>	69
7.6	Modellvorstellung des veränderlichen Tonsteingefüges	71
7.7	Direkter Scherversuch im Rahmenschergerät	72
7.7.1	Experimente zum Einfluss von Vorschubgeschwindigkeit, Wassergehalt und Dichte auf die Scherfestigkeit eines schwach überkonsolidierten Tons	72
7.7.2	<i>Entwicklung der Saugspannung während des Scherversuchs</i>	79
7.7.3	<i>Einfluss der Wasserverhältnisse auf die Scherfestigkeit halbfester Tonsteine</i>	80
7.8	Kriechversuch	84
7.9	Quell- und Schrumpfverhalten	85
7.10	Wasserrückhaltevermögen	89
7.10.1	<i>Messergebnisse</i>	89
7.10.1.1	<i>Röt-Tonsteine</i>	89
7.10.1.2	<i>Opalinuston</i>	92
7.10.1.3	<i>Tertiärton</i>	93
7.10.1.4	<i>Abgeleitete Größen: Nutzbare Feldkapazität und mittlerer Sättigungsgrad</i>	95
7.10.2	<i>Regression der Saugspannungskurven</i>	97
7.11	Konsistenzgrenzen	97
7.12	Mineralcharakterisierung	99
7.13	REM	100
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse</b>	<b>104</b>
8.1	Verwitterungsabhängiges Verhalten der überkonsolidierten Tonsteine	104
8.2	Wirkung der Saugspannung auf die Scherfestigkeit im überkonsolidierten Tertiärton	108
<b>9</b>	<b>Verwendete Literatur</b>	<b>110</b>
	<b>Anhang</b>	<b>116</b>
<b>A</b>	<b>Versuchsergebnisse – Diagramme und Tabellen</b>	
A.1	Korrigierte Wasseraufnahmekurven	I
A.2	Wasseraufnahmevermögen, Wasserdampfadsorption, Spezifische Oberfläche und natürlicher Wassergehalt im Vergleich	I
A.3	Korngrößenverteilungen der disintegrierten Tonsteine	VII
A.4	Aggregatgrößenverteilungen	VII
A.5	Scherversuche Tertiärton	VIII
A.6	Scherversuche Tonsteine	IX
A.7	Kriechpresse	X
A.8	Saugspannung	X
A.9	Röntgendiffraktometrie	XI
<b>B</b>	<b>Bilder</b>	<b>XII</b>
B.1	Aufschlussbilder	<b>XII</b>
B.2	REM-Aufnahmen	<b>XIV</b>

### 3 Einführung

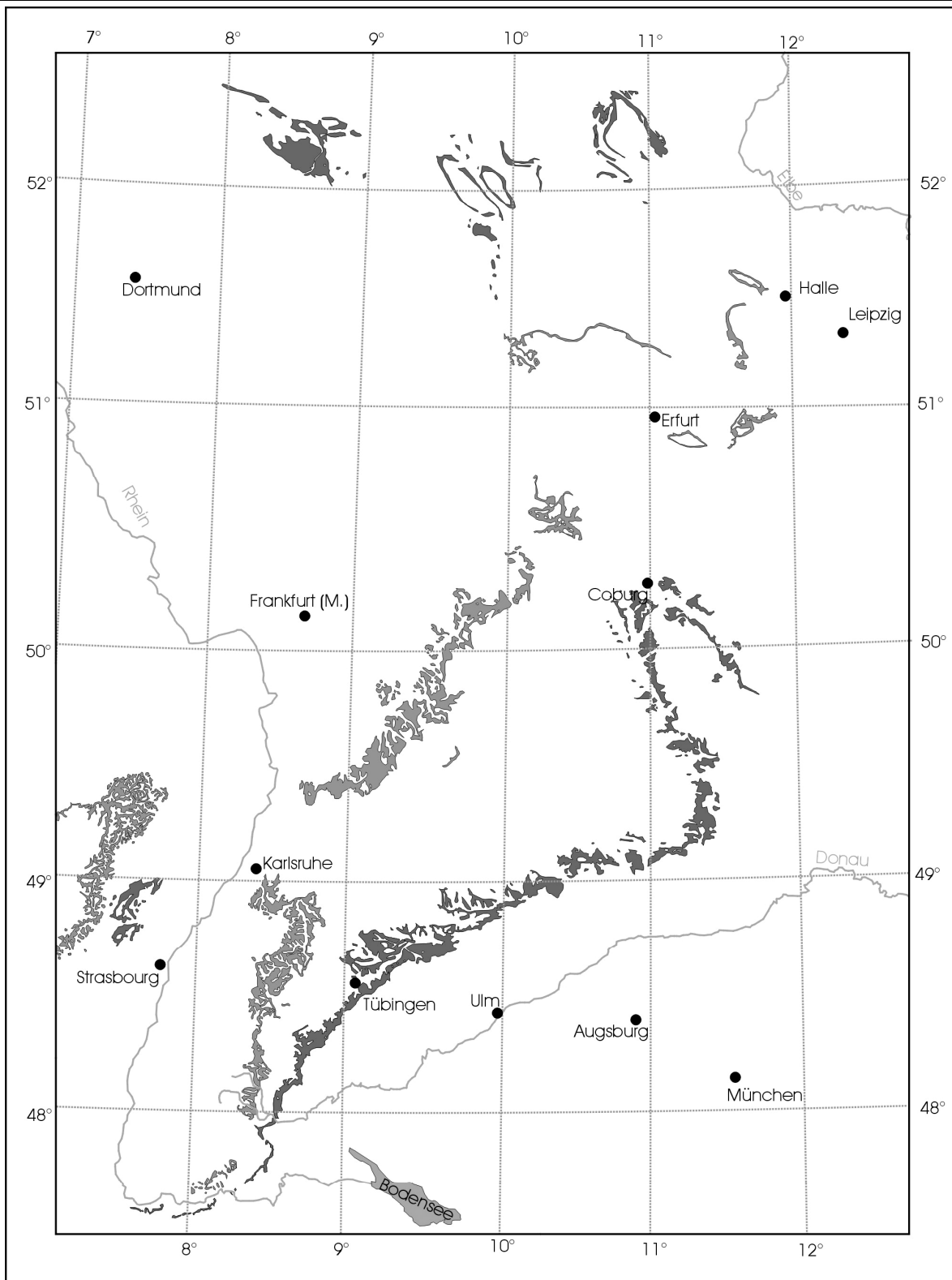
Veränderlich feste Gesteine nehmen vor allem in Süd- und Mitteldeutschland und den angrenzenden Regionen große Teile der oberflächennah anstehenden Gesteine ein. Die flächenhafte Verbreitung von Röt und Opalinuston, welche in dieser Arbeit für die Untersuchungen herangezogen wurden, zeigt die Karte in Abbildung 1. Dies sind jedoch nur zwei beispielhafte stratigraphische Einheiten – ähnliche wechselfeste Tonsteine sind z.B. auch im Paläozän, im Keuper und in der Kreide zu finden (siehe Anhang B).

Im Erd-, Straßen- und Tunnelbau führt das Auftreten von veränderlich festen Tonsteinen immer wieder zu Problemen, da sich der Entfestigungs- bzw. Verwitterungszustand eines überkonsolidierten Tonsteins während der Baumaßnahme so stark verändern kann, dass die Tragfähigkeit des Planums oder die Stabilität von Dämmen und Einschnittsböschungen oder Tunnelquerschnitten nicht mehr gegeben sind. In Gesteinen wie den Röt-Tonsteinen und dem Opalinuston muss mit oberflächennahen Rutschungen in natürlichen und künstlichen Böschungen immer gerechnet werden (WICHTER, HECHT & HOLLINGER 2004). Des Weiteren treten wegen der Veränderlichkeit Unsicherheiten hinsichtlich der Klassifizierung von Bearbeitbarkeit des Materials und Einordnung in geltende Normen auf. Deshalb schlugen NICKMANN et al. (2005) vor, eine Klassifizierung nach der Zerfallsneigung und einem Sammelparameter der Gefügefestigkeit, der sich aus einaxialer Druckfestigkeit, dem Porenvolumen und der Quellfähigkeit zusammensetzt, vorzunehmen. Diese Idee ist ein Schritt in die richtige Richtung, berücksichtigt jedoch noch nicht die mitunter gravierende Veränderlichkeit der Gefügefestigkeit in kürzester Zeit.

Alles an Tonminerale gebundene und in Tonsedimenten enthaltene Wasser unterliegt Wechselwirkungen mit dem Feststoff und hat damit unterschiedlichen Einfluss auf die physiko-mechanischen Eigenschaften. Jede Änderung des Wassergehalts bewirkt demnach Änderungen der Eigenschaften des Gesteins, die nur teilweise reversibel sind. Im teilgesättigten Bereich unterliegen sowohl das Porenwasser als auch das Feststoffgerüst zusätzlichen Wechselwirkungen mit der Porenluft. Erschwerend für die Klassifikation und Bewertung der veränderlich festen Gesteine kommt hinzu, dass die Ergebnisse bodenmechanischer und felsmechanischer Laboruntersuchungen zu einem wesentlichen Anteil von der Art der Behandlung der Proben abhängig sind, da die Tone entsprechend ihres Verwitterungsgrades bzw. Gefügestandes unterschiedlich empfindlich mit spezifischen Gefügeänderungen auf Wassergehaltsänderungen und mechanische Beanspruchung reagieren. Die mit dem Tonsteinaggregatzerfall verbundene Inhomogenität des Gebirges ist schwer einzuschätzen.

Die Bedeutung der Problematik führte in den Jahren 1978 bis 1983 zur Einrichtung eines interdisziplinären Schwerpunktprogramms der DFG. Was die Gründe für die wechselnden mechanischen Eigenschaften von überkonsolidierten Tonsedimenten und das gleichzeitige und benachbarte Auftreten unterschiedlich fester Varietäten desselben Tonsedimentes sind, ist trotz intensiver Forschung in den letzten Jahrzehnten noch immer unklar (SCHETELIG & BECKER 2001). Die Vorstellung der Saugspannung im ungesättigten Boden existiert in der Bodenkunde seit mehreren Jahrzehnten, eine Verknüpfung mit ingenieurgeologischen und bodenmechanischen Problemstellungen wurde nach eigener Literaturrecherche bislang nicht versucht.

Aufbauend auf den Erkenntnissen diverser Autoren über den Einfluss von sedimentärem Environment, der Überlagerungsgeschichte und dem Anteil organischen Kohlenstoffs etc. war das Ziel der hier vorgelegten Arbeit zu versuchen, einen möglichen Erklärungsansatz für die Ursachen dieser veränderlichen Festigkeiten aus Sicht der Wechselwirkung zwischen Porenfluid und Feststoffgerüst im teilgesättigten Porenraum zu finden.



- Verbreitung des Unteren Buntsandsteins (Röt)
- Verbreitung des Lias



**Abbildung 1** Karte der Verbreitung des Oberen Buntsandsteins (enthält Röt-Tonsteine) und des Lias (beinhaltet Opalinuston) in Deutschland (Zusammenstellung aus Geologischer Karte Deutschland, Geologische Karte Baden-Württemberg, Geologische Karte Sachsen-Anhalt und Geologische Karte Thüringen).

## 4 Sedimentation, Diagenese und Verwitterung von Tonen bzw. Tonsteinen

Die heterogenen Eigenschaften der Tone bzw. Tonsteine im in-situ Zustand beruhen auf dem komplexen Zusammenspiel verschiedener Faktoren. Die Sedimentation führt zur Ausbildung des Primärgefüges. Konsolidierung und Diagenese bestimmen gemeinsam die Ausprägung des Sekundärgefüges. Außerdem spielen Überkonsolidierung, langsame Entspannung und Verwitterung, Bodenbildung, sowie jeweils die Wechselwirkungen der einzelnen Prozesse mit den Tonpartikeln eine Rolle. Dabei sind die mineralogische Zusammensetzung, Korngrößen der Sedimentationsfracht etc. von großer Bedeutung. Diese können jedoch nur untersucht werden, wenn die diagenetischen Bindungen wieder weitestgehend zerstört sind und damit laborative Untersuchungen überhaupt erst durchführbar sind.

Natürliche Sedimentation erfolgt in der Regel so langsam, dass sich keine Porenwasserdrücke aufbauen können. Zeitabhängige Faktoren sowohl bei Sedimentation und Diagenese als auch bei Erosion, Entspannung und Verwitterung können im Labor nicht simuliert werden. Des Weiteren können im Laborversuch Änderungen des Spannungszustandes im Lauf der Erosion, tief reichende Frost-Tau-Wechsel wie in geologischen Eiszeiten und wechselnde Grundwasserverhältnisse nicht berücksichtigt werden, da ihr Einfluss wegen regional und lokal unterschiedlicher Dauer und Intensität im Probenmaßstab nicht realistisch simuliert werden kann. Deshalb sollen diese Aspekte im Vorfeld theoretisch erörtert werden, um bei der späteren Auswertung und Interpretation der Versuchsergebnisse Berücksichtigung zu finden.

### 4.1 Sedimentationsmechanismen

Bei der Sedimentation von dispers in einer Suspension verteilten Feststoffpartikeln können drei Sedimentationsmechanismen (LAGALY et al. 1997) unterschieden werden, die aufgrund der Komplexität der sie beeinflussenden Parameter fließend ineinander übergehen:

- A: Freie granulare Sedimentation,
- B: Gehinderte Sedimentation,
- C: Strukturierte Sedimentation.

Die Sedimentationsmechanismen werden von sedimentärer Fazies und Environment beeinflusst. Hierbei spielen die Mineralogie des Ausgangsmaterials, der Chemismus und die Temperatur des Transportmediums, die Partikelgröße und -form, die Suspensionskonzentration, die Schüttungsrate, die Akkumulationsgeschwindigkeit und auftretende Turbulenzen eine Rolle. Im Folgenden sollen die wesentlichen Merkmale dieser Mechanismen beschrieben und mit physiko-chemischen Prozessen erläutert werden. In Abbildung 2 sind die drei Sedimentationstypen schematisch dargestellt.

#### 4.1.1 FREIE GRANULARE SEDIMENTATION

Durch Aggregation der einzelnen Partikel entstehen zunächst Dupletts, Tripletts etc. bis das Aggregat eine Größe erreicht hat, bei der es auf Grund der Schwerkraft zu Boden sinkt. Idealerweise sinken kugelförmige Teilchen mit einer ihrer Partikelgröße entsprechenden Geschwindigkeit ab, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen, so dass vom Boden her ein Sedimentkörper wächst, während in der darüber liegenden Dispersion die Teilchenkonzentration stetig abnimmt. Es gilt das Stokes'sche Gesetz, wonach die Teilchen in einer Dispersion mit einer konstanten Geschwindigkeit absinken, die sich aus der Gravitationskraft, vermindert um den Auftrieb, und der Stokes'schen Reibungskraft ergibt:

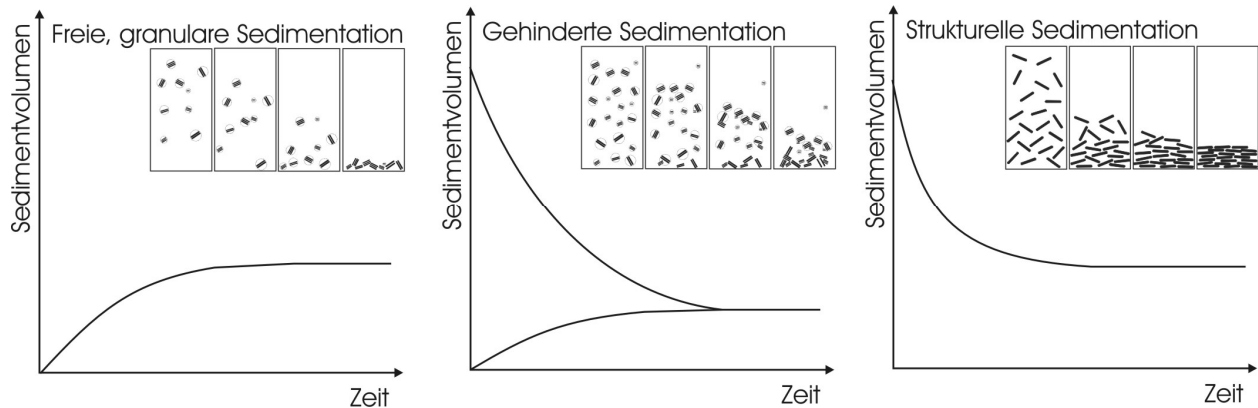
$$(1) \quad V \cdot (\rho - \rho_0) \cdot g = 3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot v \cdot d$$

Daraus folgt:



$$(2) \quad v = h / t = d^2 \cdot (\rho - \rho_0) \cdot g / 18 \cdot \eta \quad (\text{Stokes'ches Gesetz})$$

Dabei sind  $V$  das Volumen eines Teilchens,  $d$  der Äquivalentdurchmesser des Teilchens,  $\rho$  die Dichte des Teilchens,  $\rho_0$  die Dichte des Lösungsmittels,  $g$  die Erdfallbeschleunigung,  $\eta$  die Viskosität des Dispersionsmittels,  $v$  die Geschwindigkeit des absinkenden Teilchens, das in der Zeit  $t$  die Strecke  $h$  durchfällt.



**Abbildung 2** Schematische Darstellung von granularer, strukturierter und gehinderter Sedimentation (modifiziert nach WOLFF 1957 und LAGALY et al. 1997).

#### 4.1.2 GEHINDERTE SEDIMENTATION

In der Regel ist schon bei einem Feststoffanteil von 1 % die Teilchenkonzentration in der Dispersion zu hoch, um eine freie Sedimentation zu ermöglichen. Aufgrund des von den absinkenden Teilchen verdrängten Flüssigkeitsvolumens kommt es zu einer Aufwärtsströmung im Dispersionsmittel, was die Sedimentationsgeschwindigkeit verringert. Zusätzlich reißen gröbere Partikel feinere mit abwärts, so dass letztlich Partikel unabhängig von ihrer Größe mit annähernd ähnlichen Geschwindigkeiten sedimentiert werden. Man spricht dann von gehinderter Sedimentation. Es entsteht ein kompakter Sedimentkörper über dem eine trübe Schicht steht, in der die Teilchen gehindert sedimentieren, darüber befindet sich eine weitere weniger trübe Schicht, in der die feinsten Partikel quasi frei sedimentieren. Die Grenzflächen verlagern sich langsam nach unten, wobei die trübe Schicht über dem Sediment bei gleich bleibender Teilchenkonzentration an Mächtigkeit verliert während die oberste Schicht langsam an Teilchen verarmt (WOLFF 1957).

#### 4.1.3 STRUKTURIERTE SEDIMENTATION

SZÁNTÓ et al. (1972) beschrieben die strukturierte Sedimentation von organophilen Bentoniten. Die Teilchen sind unabhängig von ihrer Größe in Form eines zusammenhängenden Netzwerkes miteinander verbunden und sinken sehr langsam ab. Über der trüben Suspension steht die klare teilchenfreie Dispersionsflüssigkeit. Die extrem langsame Sedimentationsgeschwindigkeit wird durch ein Aufwärtsströmen der verdrängten Flüssigkeit innerhalb des Netzwerkes verursacht (LAGALY et al. 1997).

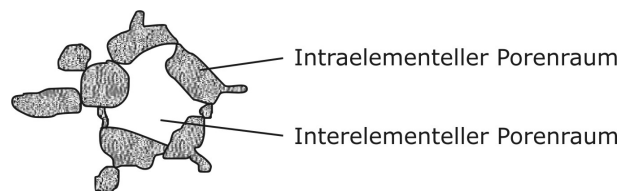
Um die Entstehung dieser unterschiedlichen Sedimentationstypen zu erklären, gibt es verschiedene mikrorheologische Theorien: Die Rate Process Theory (RPT) besagt z.B., dass die Kontaktstellen aus Molekülen bzw. Molekülgruppen in lokalen Potentialfeldern bestehen. Die Oberflächenstruktur der Kontakte wird durch die Aktivierungsenergie  $\Delta F$  und die Weglänge  $\lambda_v$  definiert (Höhe und Breite des Potentialfeldes). Es entsteht ein so genannter Voigt-Kelvin-Körper - eine Kartenhausstruktur mit elastischen und plastischen Eigenschaften (MURAYAMA & SHIBATA 1964; MURAYAMA 1969). Auf die physikalischen Details kann mit Hinweis auf die angegebenen Zitate an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Ohne Berücksichtigung der Partikelorientierung versuchte MITCHELL (1964) mit dem klassischen Ansatz der Scherfestigkeit mit Reibungswinkel und Kohäsion eine Verbindung zu Bodenkennwerten herzustellen. Die mikroskopisch physikalischen Parameter können in Gleichungen definiert werden, die eindeutige Zuordnung eines makroskopischen

Bodenkennwertes gestaltet sich jedoch problematisch, weshalb die RPT in der Praxis keine Anwendung findet. Als makroskopisch rheologische Ansätze gibt es diverse mathematische Approximationen aus Versuchsdaten und rheologische Modelle, die jeweils nur bei vergleichbaren Randbedingungen gelten, auf die hier jedoch auch nicht näher eingegangen werden kann.

Aufgrund der hohen spezifischen Oberfläche von Tonen zwischen 15 und 800 m<sup>2</sup>/g ist der Übergangsbereich zwischen Feststoff und Porenfluid für die mechanischen Eigenschaften von Bedeutung. Die Wechselwirkung wird von Seiten des Feststoffes durch Größe und Verteilung der Oberflächenladung und von Seiten des Fluids im Wesentlichen durch polare Eigenschaften, den pH-Wert und gelöste Ionen beeinflusst. Im Allgemeinen ist die Oberfläche von Tonen negativ geladen. Die typische Oberflächenwirkung von Tonen hat Einfluss auf die Strukturbildung eines Bodens. Durch Verzerrung des Kristallgitters kommt es zu einer Verschiebung des Ladungsschwerpunktes, so dass auf der Oberfläche negative, im Inneren des Tonpartikels und an den Ecken, positive Ladungsüberschüsse entstehen. Das hat zur Folge, dass sich Elektrolyte in der Nähe der Oberfläche und Ecken konzentrieren, ohne jedoch fest an den Partikel gebunden zu werden. Dadurch entsteht die diffuse elektrische Ionenschicht mit spezifischem Potentialgefälle, welches die Größe, Verteilung und Richtung der zwischen zwei Partikeln wirkenden Kräfte beeinflusst (DLVO-Theorie). Nicht dissoziierte Wassermoleküle orientieren sich mit dem positiven Ladungsschwerpunkt ihres Dipols zur Tonoberfläche. Es entsteht eine quasi-monomolekulare Wasserschicht mit höherer Viskosität als bei freiem Wasser (MARTIN 1962).

## 4.2 Sedimenttypen und -strukturen

Aus den verschiedenen Sedimentationsmechanismen resultieren unterschiedliche Typen von Tonsedimenten mit einem spezifischen Primärgefüge, das durch die Orientierung der Tonpartikel und den intra- bzw. interelementellen Porenraum (FEESER 1986, siehe Abbildung 3) charakterisiert wird. Es können mehr oder weniger voluminöse Bodensätze oder auch Gele entstehen. Bereits der Zustand in der Dispersion bildet die Voraussetzung für dichte oder lockere Sedimente. Wenn die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen der Suspension leicht attraktiv sind und die Dispersion schon zu einer gewissen Aggregation neigt, entstehen voluminöse Sedimente. Zwischen den Sedimentflocken befindliche Hohlräume sind noch mit der Dispersionsflüssigkeit gefüllt. Nach LAGALY et al. (1997) begünstigen mehrwertige Gegenionen in der Lösung und eine erhöhte Salzkonzentration ein höheres Sedimentvolumen. Bei zu hohen Salzkonzentrationen bricht die voluminöse Struktur jedoch zusammen, da die Teilchen die starken Anziehungskräfte der dissoziierten Salzionen nicht mehr kompensieren können und dichter gepackt werden. Die Porositätsabnahme smectitischer Tone bei zunehmendem Elektrolytgehalt beobachtete auch PUSCH (1973).



**Abbildung 3** Definition von intraelementellen und interelementellen Porenraum (verändert nach PUSCH 1973)

Sind die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen abstoßend, entstehen dichtere Sedimente, da die Partikel leicht gegeneinander verschiebbar sind. Sie ordnen sich zu dichteren Strukturen, ohne sich zu berühren, da sie durch die diffuse Ionenschicht getrennt bleiben.

Ordnen sich die Tonmineralplättchen parallel an, entstehen dichte Strukturen. Waren die Partikel bereits in der Dispersion zu parallelen Aggregaten angeordnet, entsteht eine mitteldichte Packung. Durch Bänder- oder Kartenhausstrukturen (Fläche-Kante-Kontakte)

bilden sich lockere Sedimente. Das Maß der Parallelorientierung hängt vom Länge-Dicke-Verhältnis der Tonplättchen ab. Kleinere dünne Plättchen neigen eher zu einer parallelen Struktur, als größere oder dicke. Bei einer breiten Kornverteilung werden kleinere Teilchen durch große Partikel an ihrer Einregelung gehindert. Die Ausbildung der Strukturen ist stark pH-abhängig (BRANDENBURG & LAGALY 1988), wird aber auch durch andere Faktoren wie beispielsweise die bereits erwähnte Salinität und den Huminstoffgehalt (bzw. Gehalt anderer organischer Komplexe) des Dispersionsmittels beeinflusst (FUKUSHIMA 1984; MOURCHID et al. 1995; FREY & BASAN 1978).

Das Ablagerungsmilieu beeinflusst in hohem Maße den Sedimenttypen bzw. den „Porositätstypen“. Im marinen Environment entstehen meist voluminöse Illit-Kaolinit-Chlorit-Vergesellschaftungen, die durch einen geringen intra- aber hohen interelementellen Porenraum gekennzeichnet sind (PUSCH 1973, siehe Abbildung 3). Süßwassertone hingegen sind häufig durch kleinere Aggregate mit hohem intra- aber geringem interelementellen Porenraum gekennzeichnet. Der dedritische Sedimentanteil bewirkt zusätzlich eine Verringerung des Porenanteils. Eng mit dem Aufbau der oben genannten Strukturen ist auch thixotropes Verhalten von Tondispersionen verbunden.

Es ergibt sich, dass die zwischen zwei Partikeln auftretenden Kräfte auch maßgeblich von ihrer Orientierung zueinander abhängen. Man kann Nah- und Fernwirkungskräfte unterscheiden (MESRI 1978). Fernwirkungskräfte bestimmen die Orientierung der Partikel zueinander. Nahwirkungskräfte treten in einem Abstand von 10 bis 20 Å auf. Die Kontaktfestigkeit ist der Widerstand mit dem sich zwei Partikel ihrer gegenseitigen Verschiebung widersetzen.

Die plättchenförmigen Tonmineralpartikel können aufgrund verschiedener Ladungen auf Flächen und Kanten und voneinander abweichenden Randbedingungen in unterschiedlichsten Strukturen und Texturen sedimentieren, die durch elektronenmikroskopische Untersuchungen sichtbar gemacht werden können (siehe Kap. 7.12). Zum einen sind Fläche-Kante-Kontakte möglich, die zu einer Kartenhausstruktur (WEISS & FRANK 1961c) führen, zum anderen können auch bänderförmige Fläche-Fläche-Kontakte auftreten (QUIRK 1986). Die Bindungskontakte sind in der Regel mineralartspezifisch (PUSCH 1973). So ist in illitischen Tonen meist eine unregelmäßige willkürliche Partikelanordnung, in kaolinitischen Tonen überwiegend Fläche-Fläche-Stapel zu finden. Bei smectitischen Tonen hingegen wird die Kontaktart durch die adsorbierten Kationen gesteuert. Bei geringem pH-Wert ordnen sich die positiv geladenen Kanten auf den negativ geladenen Oberflächen an. Dadurch wird die Entstehung der Kartenhausstruktur von Kaolinen möglich. Bei Montmorilloniten bzw. bei höherem pH-Wert oder nach längerer Scherbeanspruchung der Dispersion auch bei Kaolin erfolgt eine parallele Anordnung der Tonplättchen. Der dominierende Koagulationstyp ist durch unterschiedliche Anziehung bzw. Abstoßung der Tonpartikel je nach Salzgehalt und Tonkonzentration in der Suspension verschieden. Im marin-brackischen Milieu kommt es schneller zur Koagulation, im elektrolytarmen Wasser eher zu einem Sol-Zustand. Die Koagulationskontakte der Hydrathüllen sind der schwächste Bindungstyp (REHBINDER & MICHAJLOW 1961).

### **4.3 Konsolidierung und Diagenese von tonigen Sedimenten**

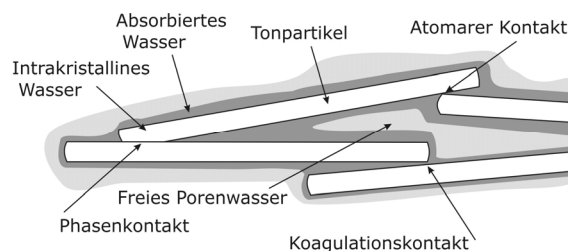
Durch physikalische und chemische Prozesse erfährt das Tonsediment nach seiner Ablagerung in unterschiedlicher Stärke Veränderungen seines Gefüges. Gravitative Kompaktion, Entlastung durch Erosion, Schrumpfen und Schwellen sowie Frostwirkung als physikalische Faktoren, Auslaugung, Zementation, Verwitterung von Mineralen, Mineralneu- und -umbildungen als chemische Faktoren der Diagenese sowie der Einfluss einer tektonischen Fazies (z.B. physikalische Beanspruchung durch glazigene oder orogene Belastung) bewirken die Ausbildung des Sekundärgefüges.

Bei stärkerer Auflast über lange Zeiträume erfolgt eine Kaltverschweißung der Mineralkörner, deren Auflösung setzt ebenfalls längere Zeiträume voraus. Die Stabilisierung

geschieht durch verkittende Substanzen. Übersteigt die Auflast die Gefügesteifigkeit kommt es zu einer Erhöhung des Einregelungsgrades durch Aufbrechen der lockeren Bindungen und Rotation der Domains.

Die quantitative Erfassung diagenetischer Bindungskräfte bedeutet die Erfassung von Zuständen gleicher Entfestigung und Korrelation mit den entfestigend wirkenden Kräften. Durch die kontinuierliche Temperaturerhöhung mit der Tiefe und die langsame Partikelorientierung mit zunehmender Überlagerung kommt es allmählich zur Ausbildung unterschiedlicher Arten von Partikelbindungen (OSIPOV 1975). Ein Teil der so gebildeten diagenetischen Bindungskräfte wird aufgeweicht oder zerstört, der Rest davon im Gestein als so genanntes *stress memory* gespeichert. Dieses Spannungsgedächtnis (JACKSON & FOOKES 1974) kann bei Entlastung und Verwitterung als reaktivierbare Verformungsenergie (*recoverable strain energy*) freigesetzt werden (BJERRUM 1967).

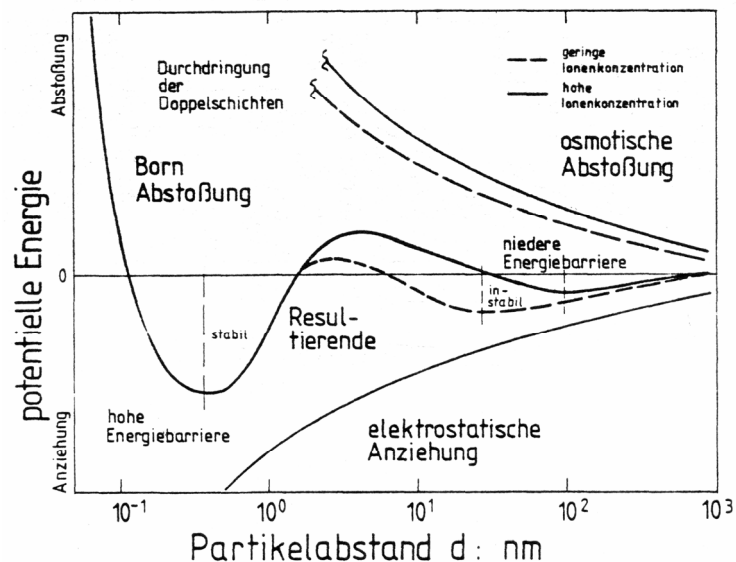
REHBINDER (1965) unterscheidet drei Kontaktarten: den Koagulationskontakt, den atomaren Kontakt und den Phasenkontakt (Abbildung 4). Bei Wasser und Ton (hydrophil) treten nur die ersten beiden auf, da immer eine thermodynamisch stabile Zwischenschicht des flüssigen Mediums vorhanden ist, die eine Annäherung der Primärteilchen verhindert und somit die Kontaktfestigkeit verringert. Daraus resultieren eine geringere Festigkeit, verzögerte Elastizität, Thixotropie, Strukturviskosität und Plastizität konzentrierter Ton-Wasser-Dispersionen. Mit zunehmender Verfestigung erfolgen ein Übergang vom Koagulations- zum atomaren Kontakt und damit der Verlust von Thixotropie und verzögerter Elastizität.



**Abbildung 4** Kontaktarten der Tonpartikel und Bindungsarten des Wassers nach PIMENTEL (2003).

Koagulationskontakte sind Tonpartikelverbindungen, bei denen die Partikel von durchgehenden Hydrathüllen umgeben sind und die sich nach ihrem Aufbrechen infolge von Thixotropie wieder aufbauen können. Bei Atom- oder Punktkontakten sind durch Konsolidationsdrucke oder Austrocknung die Hydrathüllen im Kontaktbereich unterbrochen. Phasen- oder Kristallisationskontakte, die durch die Einwirkung hoher Drücke und Temperaturen entstehen, beruhen auf starken chemischen Bindungskräften und brechen bei Belastung irreversibel (BRUNHOFF 1983). Durch Auflast oder Trocknung kann die Hydrathülle durchbrochen werden. Elektrostatische Bindungen zwischen Atomen können zur Verbindung von Partikeln und der Ausbildung einer gemeinsamen Hydrathülle führen, innerhalb derer ein Mikroporenraum besteht, der bei Entspannung durch die in ihm herrschende hohe Saugspannung Wasser aufnehmen kann und so Kontakte wieder zerstören kann und das Material in eine Koagulationsstruktur zurück überführt. Man könnte in dem Fall von einer reversiblen Konsolidierung sprechen.

Je nach Kontaktart und Partikelabstand wirken die physiko-chemischen Kräfte (Tabelle 1) zwischen zwei Tonpartikeln in Abhängigkeit ihrer Orientierung zueinander und der Ionenkonzentration des Hydrat- bzw. Porenwassers (Abbildung 5). Durchdringen sich die Doppelschichten, so übersteigen die elektrostatischen Anziehungskräfte die Bornsche Abstoßung, die im Falle vom direkten Phasenkontakt dominiert. Die elektrostatische Anziehung nimmt mit größerem Partikelabstand zu, während die osmotische Abstoßung geringer wird. Etwa ab einem Partikelabstand von 1  $\mu\text{m}$  heben sich abstoßende und anziehende Kräfte auf, so dass es keine physiko-chemische Wechselwirkung der Feststoffpartikel mehr gibt.



**Abbildung 5** Physiko-chemische Interaktion zweier parallel orientierter hydratisierter Tonminerale (nach VAN OLPHEN 1963 und INGLES 1968 aus FEESER 1986)

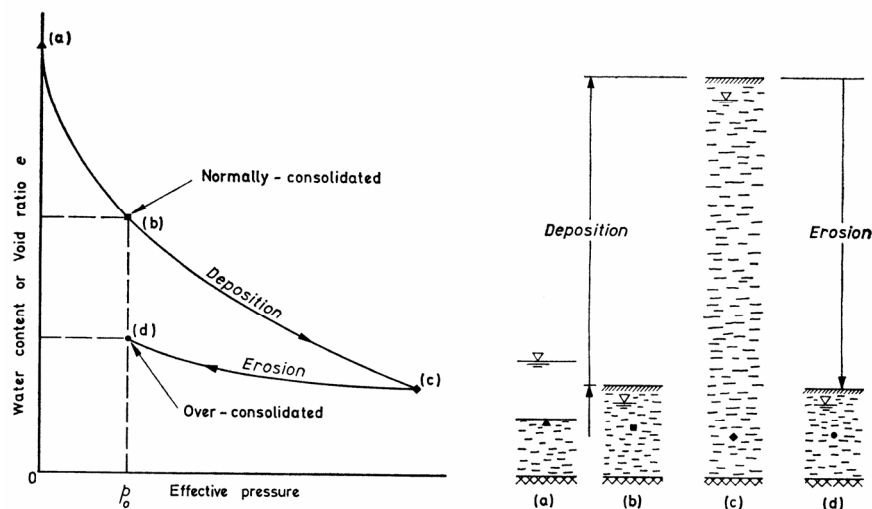
#### 4.3.1 GRAVITATIVE KOMPAKTION

Die gravitative Kompaktion, die den Hauptanteil an der Gefügeveränderung von tonigen Sedimenten ausmacht, beginnt durch die Auflast jüngerer Sedimente, bzw. im Bereich glazialer Ablagerungen durch die Auflast des Eises. Der Porenraum eines Sedimentes nimmt bis zu einer Überlagerungsmächtigkeit von 1000 m logarithmisch ab (SKEMPTON 1970). In Abbildung 6 ist der Zusammenhang des gravitativen Kompaktionsverhaltens normal konsolidierter Tone mit der effektiven geostatischen Spannung dargestellt. Durch die Kompaktion wird der Porenraum des Sedimentes verringert und das Wasser ausgepresst und somit kann sich die Mächtigkeit auf ein Zehntel reduzieren (TUCKER 1985).

**Tabelle 1** Physiko-chemische Wechselwirkungen zwischen hydratisierten Tonpartikeln in paralleler Anordnung (nach INGLES 1968).

Bindung	Ursprung	Wirkungsweise	Kraftwirkung	
Coulomb	Ion - Ion	elektrostatisch	$1/r^2$	Anziehungskräfte
	Ion - Dipol		$1/r^3$	
	Dipol - Dipol		$1/r^7$	
London-van-der-Waals	unregelmäßige Ladungsverteilung		$1/r^7$	
Born	Elektronenwolke	elektrostatisch	$1/r^{13}$	Abstoßungskräfte
Osiose	Doppelschicht	elektroosmotisch	$1/r^2$	
Hydratation		sterisch	$< 1/r^{12}$	

Im Bereich geringer Überlagerungsspannungen hat die Art und Intensität der Kationenbelegung noch Einfluss auf die Verringerung des Porenraumes. Die die Tonminerale umgebenden diffusen Doppelschichten werden zunehmend ausgedünnt (MEADE 1966), bis sich die Tonpartikel einander so weit angenähert haben, dass nur noch milieu-unabhängige elektrostatische Kraftwirkungen zwischen den Partikeln auf das Kompaktionsverhalten Einfluss haben. Nach RIEKE & CHILINGARIN (1974) ist dieser Zustand bei einer Überlagerungsspannung von etwa 5 MPa erreicht, was einer ungefähren Versenkungstiefe von 250 m entspricht. Die Korngröße der Tonpartikel, die Tonmineralart und der Chemismus des Porenwassers beeinflussen das Kompaktionsverhalten ebenso wie die Kationenbelegung (MEADE 1968).



**Abbildung 6** Normal und überkonsolidierter Ton (aus SKEMPTON 1970).

Kontrovers wird diskutiert, inwiefern sich die Orientierung im Gefüge der Tonpartikel bei der Kompaktion ändert (FEESER 1986). Das Problem des Verständnisses der Partikelorientierung löst sich allein durch Änderung des Betrachtungsmaßstabes. Wird ein Sediment durch interelementellen Porenraum dominiert (siehe Kapitel 4.2), so erfolgt die Kompaktion durch Aggregatverschiebungen, so dass sich mit wachsender Auflast das Orientierungsgefüge ändert und sich die Orientierung der Basisflächen senkrecht zur vertikalen Hauptspannung einstellt, wie es der ältesten und weitest verbreiteten Auffassung vom Kompaktionsverhalten der Tone entspricht (SCHILLER 1980). Der intraelementelle Porenraum wird durch die wachsende Überlagerungsspannung jedoch kaum oder gar nicht verändert. Ist also der Kraftschluss, d.h. die Annäherung der Aggregate erfolgt, stellt sich die von Mc CONNACHIE (1974) beobachtete Konstanz im Orientierungsgefüge ein. Die faziellen Verhältnisse während der Sedimentation bleiben also als „reliktisches Primärgefüge“ im tonigen Sediment um so deutlicher erhalten, je geringer der interelementelle Porenanteil des Sediments ursprünglich gewesen ist. Nicht zuletzt wegen der von FEESER (1986) beschriebene Ausdünnung der diffusen Doppelschicht, geben die reliktischen milieu-abhängigen elektrostatischen Kraftwirkungen rezent und in-situ nicht mehr eindeutig das Environment bei der Sedimentation wieder.

Bei der Kompaktion erfolgt die Reduzierung des Porenraumes nicht sofort sondern zeitlich verzögert. Man kann dabei Sofortsetzung, Primärsetzung (= Konsolidationssetzung) und Sekundärsetzung (= Zusammendrückungskriechen) als drei Phasen mit unterschiedlichen Antriebsmechanismen der Porenraumreduzierung unterscheiden. Die Sofortsetzung erfolgt auf Grund einer Kompression der Luft-Wasser-Phase, die Primärsetzung durch den Abbau des Hauptteils des Porenwasserüberdruckes. Auf Grund der Zähigkeit des adsorbierten Wassers bzw. der Zähigkeit des Korngerüsts setzt sich dieser Vorgang als Sekundärsetzung bzw. Kriechen mit verringerten Beträgen weiter fort.

Verschiedene Autoren (z.B. POWERS 1967, MITCHEL 1978 oder TAYLOR & SPEARS 1981) vergleichen die unterschiedlichen Theorien über Prozesse zur Verringerung des Porenraums bei der Diagenese. In dieser Arbeit soll jedoch nicht näher darauf eingegangen werden.

#### 4.3.2 NICHT-SEDIMENTÄRE GEFÜGEVERÄNDERUNGEN

Durch verschiedene physikalische Prozesse, wie die Austrocknung und Alterung sowie die Anlage von Trennflächen, und chemische Prozesse wie Synärese, Verwitterung, Auslaugung und Zementation, können Veränderungen des Gefüges bewirkt werden. In der Regel verursachen diese Prozesse eine Kompaktion des Materials und Bildung von Trennflächen (siehe Abbildung 7).

Durch Kationenaustauschvorgänge und Alterung, bzw. Verwitterung der Tonminerale werden die elektrostatischen Verhältnisse im Ton-Wasser-System verändert, so dass sich die die Tone umgebenden Wasserschichten in ihrer gegenseitigen Durchdringung und räumlichen Ausdehnung verändern.

Die Entstehung von Trennflächen hat diverse Ursachen. FÜCHTBAUER & MÜLLER (1970) begründeten das Kluffinventar sehr junger Tone mit Austrocknungs- oder Synäreseprozessen bzw. dem Aufdringen von Kompaktionswasser. Diese synsedimentären Klüfte sind meist verfüllt. Oftmals sind in steifen Tonen postsedimentäre Trennflächen angelegt, deren Entstehung zunächst auch auf Schrumpfungsprozesse zurückgeführt wurde. FOOKES & PARISH (1969) und SKEMPTON et al. (1969) wiesen jedoch auf den systematischen Zusammenhang dieser Trennflächensysteme mit dem tektonischen Bau der Umgebung sowie endo- und ektodynamischen Prozessen hin.

Die Ausbildung von primären Zementen setzt nach ALTEMÜLLER (1972) eine „Veranlagung“ des Tones voraus, d.h. primäre Minerale müssen bereits bei der Sedimentation ummantelt gewesen sein. Die von Mc KYES et al. (1974) geäußerte Vermutung, durch Lösung und anschließende Rekristallisation könne sich während der Kompaktion junger Sedimente ein Zement ausgebildet haben, konnte in den experimentellen Untersuchungen von ALTEMÜLLER (1972) nicht bestätigt werden.



**Abbildung 7** *Aggregat- bzw. Trennflächenbildung in weichem tertiärem Ton durch wiederholte Austrocknung und Wiederbefeuchtung.*

#### 4.4 Überkonsolidation

Da in dieser Arbeit das Hauptaugenmerk auf überkonsolidierten Tonen liegen soll, ergibt sich die Notwendigkeit der Definition, wann ein Ton normal konsolidiert und wann er überkonsolidiert ist. Bei Entspannung bleiben bereits verfestigte Peds und Cluster erhalten, die Matrix bildet durch Wasseraufnahme wieder die Koagulationsstruktur aus. Bei Lösung des Zements werden aus welliger Struktur wieder offene Gerüste, bei erneuter Ausfällung kann die gelöste Kittsubstanz als Substanz für Mineralneubildungen im Mikroporenraum dienen.

Die klassische Beschreibung der Überkonsolidation ist die Definition über die Spannungs-Porenzahl-Beziehungen. Bis zu einer Porenzahl  $e \approx 0,4$  besteht im Falle von Normalkonsolidation ein linearer Zusammenhang zwischen dem Logarithmus der Überlagerungsspannung  $\sigma_v$  und der Porenzahl  $e$ . Anstatt der Überlagerungsspannung  $\sigma_v$

könnte man auch einen Effektivdruck annehmen, der neben der Überlagerungsspannung und horizontalen Spannungen durch Liegezeit oder Schrumpfvorgänge etc. mit zustande gekommen sein kann.

$$(3) \quad e = e_0 + de / \{d [\ln (\sigma_v / \sigma_{v0})]\} \cdot \ln (\sigma_v / \sigma_{v0})$$

Der Kompressionsbeiwert  $C_C$  ergibt sich aus der Tangentensteigung des Erstbelastungspfades im Spannungs-Porenzahl-Diagramm des Drucksetzungsversuchs (GUDEHUS 1981).

$$(4) \quad C_C = - de / d [\ln (\sigma_v / \sigma_{v0})]$$

Ein normal konsolidierter Ton ist durch einen Spannungs-Porenzahl-Zustand gekennzeichnet, der sich auf dem Erstbelastungspfad befindet. Seine als Äquivalentsspannung  $\sigma_e$  bezeichnete Spannungskomponente lässt sich wie folgt aus der Porenzahl bei der Sedimentation  $e_0$  und dem Kompressionsbeiwert  $C_C$  ableiten (GUDEHUS 1981):

$$(5) \quad \sigma_e = \sigma_0 \exp [(e_0 - e) / C_C]$$

Als Schwellung bezeichnet man die Volumenzunahme bei Entlastung. Der mittlere Schwellbeiwert  $C_S$  ergibt sich analog zum Kompressionsbeiwert aus der Tangentensteigung des Entlastungspfades im Spannungs-Porenzahl-Diagramm (siehe Abbildung 8). Die Porenzahl bei Schwellung lässt sich durch

$$(6) \quad e = e_{VC} - C_S \ln (\sigma_v / \sigma_{vC})$$

darstellen, mit Schwellbeiwert  $C_S$  als:

$$(7) \quad C_S = - de / [d \cdot \ln (\sigma_v / \sigma_{vC})].$$

Im Gegensatz zum normal konsolidierten Ton spricht man von einem überkonsolidierten Ton, wenn er belastet und teilweise wieder entlastet wurde. Die vertikale Spannung, die vorab maximal erreicht wurde, wird als Vorspannung oder kritische Spannung  $\sigma_{vC}$  bezeichnet. Die Äquivalentsspannung eines überkonsolidierten Tones ergibt sich aus (3), (5) und (6) zu:

$$(8) \quad \sigma_e = \sigma_0 \exp \{ [C_C \cdot \ln (\sigma_{vC} / \sigma_{v0}) + C_S \cdot \ln (\sigma_v / \sigma_{vC})] / C_C \}$$

Der Grad der Überkonsolidierung kann dann als overconsolidation ratio (OCR)

$$(9) \quad OCR = \sigma_{vC} / \sigma_v$$

oder als Konsolidierungsverhältnis KV

$$(10) \quad KV = \sigma_e / \sigma_v$$

ausgedrückt werden. (8) kann auch als

$$(11) \quad \sigma_e = \sigma_{vC} \cdot (\sigma_v / \sigma_{vC})^{C_S / C_C}$$

geschrieben werden. Aus (9) folgt dann:

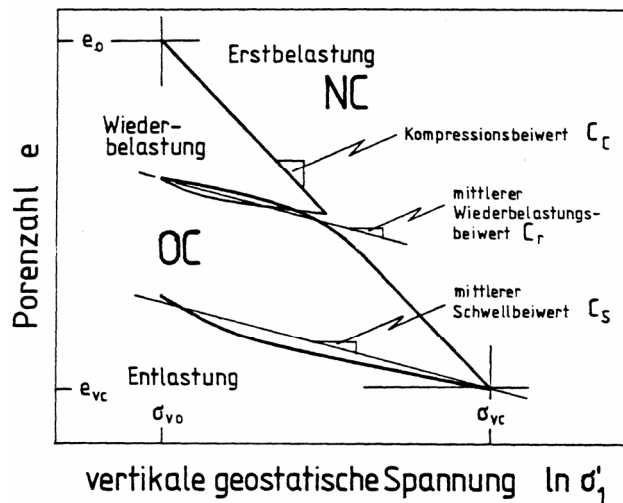
$$(12) \quad \sigma_e = \sigma_{vC} \cdot (1 / OCR)^{C_S / C_C}$$

Von Wiederbelastung spricht man bei erneuter Belastung im überkonsolidierten Bereich. Wenn der mittlere Wiederbelastungsbeiwert  $C_R$ , der sich aus der Tangentensteigung des Wiederbelastungspfades im Spannungs-Porenzahldiagramm ergibt, mit dem mittleren Schwellbeiwert gleichgesetzt werden kann, so spricht man von nicht linearem elastischen Verhalten.

Die Vorbelastung einer Tonprobe ist aber nicht nur durch die vertikale Überlagerungsspannung, sondern auch durch horizontale Spannungen geprägt. Das



Verhältnis von horizontaler Spannung  $\sigma_h$  zu vertikaler Spannung  $\sigma_v$  wird als Ruhedruckbeiwert  $K_0$  bezeichnet (GUDEHUS 1981):



**Abbildung 8** Spannungs-Porenzahl-Diagramm unter  $K_0$ -Bedingungen für einen normal konsolidierten Ton (aus FEESER 1986).

$$(13) \quad K_0 = \sigma_h / \sigma_v$$

Im Erstbelastungsbereich besteht ein linearer Zusammenhang zwischen horizontalen und vertikalen Spannungen. FEESER (1986) gibt den Ruhedruckbeiwert für normal konsolidierte Tone mit  $K_0 = 0,45 - 0,75$  an. Der Ruhedruckbeiwert kann im Labor oder in-situ direkt durch Messung der beiden Spannungskomponenten bestimmt oder mit Hilfe halbempirischer Gleichungen hergeleitet werden. FEESER (1986) stellte verschiedene halbempirische Ansätze und ihre Unterschiede tabellarisch gegenüber.

Bei Entlastung erfolgt der Rückgang der horizontalen Spannungen nicht proportional zu dem der Vertikalspannung, so dass der Ruhedruckbeiwert Werte  $K_0 > 1$  annehmen kann. Mit Hilfe der OCR lässt sich dieser nicht lineare Zusammenhang zwischen horizontalen und vertikalen Spannungen halbempirisch nachweisen. Für den Wiederbelastungspfad liegen keine funktionalen Beschreibungen der Zusammenhänge zwischen OCR und auftretenden Spannungsverhältnissen vor (FEESER 1986). Auch in dieser Arbeit ist von besonderem Interesse, inwieweit das Verhalten der überkonsolidierten Tone von ihrer früheren Belastung mitgeprägt wurde.

Gesteine in Oberflächennähe sind in-situ mitunter niedrigeren Temperaturen als Raumtemperatur im Versuch ausgesetzt. Zudem kommt es zu jahreszeitlichen und witterungsbedingten Schwankungen der Gesteinstemperatur. Bekannt ist, dass die Zunahme der Temperatur zu einer Verringerung der Porenzahl bei gleichen geostatischen Spannungsverhältnissen führt. Unbeeinflusst von der Temperatur sind jedoch Kompressionsbeiwert  $C_c$  und das Sekundärsetzungsverhalten (FEESER 1986). Die Kompressionsgeschwindigkeit bei höheren Temperaturen nimmt infolge der niedrigeren Viskosität des Wassers zu. Die Temperatur beeinflusst vor allem die „instant compression“.

#### 4.5 Verwitterung

Wenn das Sediment oder Gestein wieder in Oberflächennähe gerät, setzen durch Wirkung verschiedener exogener Prozesse Verwitterungsvorgänge ein. Der Grad der natürlichen Aufarbeitung (EINSELE & WALLRAUCH 1964) wird durch die Bröckchenverteilung, d.h. die Kornverteilung, in die der Pelit bei schonender Siebung zerfällt, charakterisiert. Die Aggregatgrößenverteilung ist ein relatives Maß für die Wirksamkeit noch vorhandener diagenetischer Bindungen, aber stark von der Art der Aufbereitung abhängig. Die Änderung

der Bröckchenverteilung (WALLRAUCH 1969) erfolgt in diskontinuierlichen Sprüngen. Daher kommt es zu ungleichmäßiger Änderung der diagenetischen Bindungen über den Verwitterungsprozess. Deshalb ist die Angabe von Grenzen für unterschiedliche Verwitterungszustände möglich, sofern man Tonsteine mit vergleichbaren Randbedingungen des Verwitterungsprozesses betrachtet. Es erfolgt nicht nur ein Zerfall der Bröckchen sondern auch deren zunehmende Plastifizierung der entstehenden feinkörnigen Matrix mit fortschreitender Verwitterung.

Wenn die Verkittung von Aggregaten stark genug war, reichte die Auflast des überlagernden Sedimentes zum Aufbrechen der Bindungen nicht aus. So entsteht eine wellige Struktur durch zwangsweise Einregelung (Verbiegung) unter Beibehaltung der Fläche-Kante Kontakte – dadurch erfolgt eine „Speicherung“ der Spannung im Gefüge, die bei Verwitterung beschleunigend wirkt. Bereits vorhandene Peds, Sand- und Schluffpartikel werden in die Matrix eingepresst, rotiert und somit scheinbar von Tonpartikeln umflossen.

Die veränderlichen Festigkeitseigenschaften überkonsolidierter Pelite basieren auf Stärke und Resistenz der Kornbindungen. Durch das kurzfristige Eintreten von Verwitterungszuständen in frischen Straßenanschnitten oder Baugruben, entsprechen diese jedoch nur bedingt den entsprechenden im Verwitterungsprofil, wo Entspannung und Verwitterung über geologische Zeiträume gewirkt haben. Die Ursachen, die zur Ausbildung des gliederbaren Verwitterungsprofils (Abbildung 9) geführt haben, sind komplex und aus dem Gestein allein nicht rekonstruierbar, aktuelle Wirkungen der Verwitterung erscheinen jedoch mit dem Bild des fossilen Verwitterungsprofils vereinbar (WALLRAUCH 1969).

Die für die Schrumpfung durch Trocknung verantwortliche Saugspannung bzw. der damit verbundene Kapillardruck steigt mit abnehmender relativer Luftfeuchte auf so hohe Werte, dass die durch geologische Auflast bedingte frühere maximale Vertikalspannung überschritten und diagenetische Partikelkontakte zerstört werden können (EINSELE 1983). Da die oberste getrocknete Schicht im Verwitterungsprofil mit ca. 15 cm sehr dünn ist, herrscht beim Austrocknen ein sehr hoher hydraulischer Gradient. Unter geschlossener Verwitterungsdecke findet wegen der geringen sommerlichen Eindringtiefe der Austrocknung im mitteleuropäischen Klima keine nennenswerte physikalische Verwitterung durch Trocknungsbeefeuchtungswechsel statt. Die physikalische Auflockerung erfolgt bis ca. 10 m unter GOK durch Entspannung, Temperaturwechsel und Frost neu gebildete Trennflächen.

In frei liegenden Anschnitten ohne geschlossene Verwitterungsdecke spielt der Trocknungsbeefeuchtungszerfall eine wesentliche Rolle. Die Zerfallsintensität bei Trocknungs-Beefeuchtungs-Wechsel hängt von verschiedenen Faktoren ab. So spielt der frühere Überlagerungsdruck eine nicht zu vernachlässigende Rolle (MERKLEIN-LEMP 1985). Je idealer die ursprüngliche Parallellagerung der Tonminerale, umso resistenter ist das Material gegen Verwitterung (HENKE & HILLER 1985). Eine wesentliche Rolle kommt dabei auch dem Gehalt an organischer Substanz zu (IROUSCHEK 1985). Mit steigendem organischem Kohlenstoffgehalt verbessert sich die Einregelung der Tonmineralplättchen. Ohne Frage sind jedoch auch die Unterschiede im Bindemittel von Bedeutung. Die „primäre“ Korngrößenverteilung, das heißt die Korngrößenverteilung des ursprünglich abgelagerten, tonigen Sedimentes, hat ebenfalls einen Einfluss auf die Ausbildung des Trennflächengefüges (BÖNSCH & LEMPP 2004).

Für die in dieser Arbeit verwendeten Tonsteine bot sich eine Unterscheidung in vier Verwitterungstypen an (Abbildung 9), die die Verwitterungsklassen nach EINSELE & WALLRAUCH (1964) teilweise zusammenfassen. Unter dem Begriff „Typ 1“ werden Tonsteine verstanden, die im Sinne der Verwitterungsklassifizierung nach EINSELE & WALLRAUCH (1964) als bergfrischer geklüfteter Fels (W0) zu bezeichnen sind. Sie sind hart oder haben eine feste Konsistenz und sind stark überkonsolidiert; halbfeste bis weiche Matrixanteile sind noch nicht vorhanden. Unter „Typ 2“ ist ein festes bis halbfestes Gestein in den Verwitterungsklassen W1 bis W2 zusammengefasst. Dieses Material ist überwiegend noch deutlich überkonsolidiert, enthält aber wenig weiche, scheinbar normal



#### 4.6.1 ZUSAMMENWIRKEN DER PHYSIKO-CHEMISCHEN EIGENSCHAFTEN DES WASSERS UND DER GASPHERE

Die große Differenz der Elektronegativitätswerte von Wasserstoff- und Sauerstoffatomen (1,4) bewirkt eine starke Polarität des Wassermoleküls. Das Dipolmoment ist definiert als das Produkt von Ladung ( $q$ ) und der zugehörigen Entfernungen ( $l$ ) der Ladungen voneinander. Der Bindungswinkel des Wassermoleküls beträgt ca.  $105^\circ$ . Relativ starke zwischenmolekulare Kräfte kommen durch die Überbrückung zweier Sauerstoffatome durch ein Wasserstoffatom (Wasserstoffbrückenbindung) zustande. Die einzelnen Moleküle werden in Schwärmen und Ringen locker gebunden. Ein solches Cluster besteht in der Regel aus 50 bis 100 Molekülen. Wasser hat als polare Flüssigkeit mit intensiver intermolekularer Wechselwirkung eine hohe Oberflächenspannung, die mit steigender Temperatur abnimmt. Bei einer Temperatur von  $25^\circ\text{C}$  beträgt die Oberflächenspannung von Wasser  $0,0728\text{ N/m}^2$ , bzw.  $0,0741\text{ N/m}^2$  bei  $20^\circ\text{C}$ . Ursache hierfür sind die Kohäsionskräfte zwischen Wassermolekülen. An einem im Inneren der Flüssigkeit liegendem Molekül ist die Summe aller Anziehungskräfte gleich null. Befindet sich das Molekül an der Oberfläche, so treten nur nach innen gerichtete Kohäsionskräfte auf, so dass eine resultierende Kraft entsteht. Die Moleküle der Grenzschicht üben deshalb den so genannten Kohäsionsdruck auf die darunter liegende Flüssigkeit aus, welche dem Widerstand entspricht, der dem Eindringen eines Festkörpers entgegengebracht wird. Oberflächenaktive Substanzen verringern die Oberflächenspannung von Wasser. Die Messung der Oberflächenspannung kann zum einen durch Austropfen eines definierten Volumens mit einem Stalagmeter oder mit Hilfe der Bügelmethode erfolgen.

Im Wasser gelöste Ionen werden von einer Hydrathülle umgeben. Mit zunehmender Ionengröße nimmt die Dicke der Hydrathülle ab. Ursache hierfür ist die Ladungsdichte. Bei gleicher elektrischer Ladung haben Ionen mit großen Ionenradien kleine Ladungsdichten. Der Hydratationsradius wird auch Stokes'scher Radius genannt. Der Hydratationsradius lässt sich daraus ableiten, dass sich ein hydratisiertes Ion oder Molekül bei der Bewegung durch Wasser wie eine benetzte Kugel verhält, so dass das Stokes'sche Gesetz gilt (siehe auch (2)).

$$(14) \quad r = F / (6 \cdot \eta \cdot \pi \cdot v)$$

wobei  $r$  der Hydratationsradius des gelösten Moleküls [m],  $F$  der Strömungswiderstand [N],  $\eta$  die Viskosität des Wassers [ $\text{kg/m}^2\text{s}$ ] und  $v$  die Geschwindigkeit des gelösten Moleküls [m/s] ist.

In der Grenzfläche zum Feststoff wird die Spannung als Kapillarität  $\sigma$  bezeichnet. Die Höhe des maximalen kapillaren Aufstiegs ergibt sich bei vollständiger Benetzung ( $\cos \theta_c = 1$ ) aus:

$$(15) \quad h = 2 \cdot \sigma / (\rho \cdot R \cdot g)$$

und bei unvollständiger Benetzung aus:

$$(16) \quad h = 2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta_c / (\rho \cdot R \cdot g)$$

wobei  $\rho$  die Dichte,  $R$  der Kapillarradius und  $g$  die Erdbeschleunigung sind (LINDNER, 1999). Man spricht von einer Kapillaraszension, wenn benetzende Flüssigkeiten in engen Röhren aufsteigen. Eine Kapillardepension tritt auf, wenn nicht benetzende Flüssigkeiten wie zum Beispiel Quecksilber in den Kapillaren absinken.

Die relative Volumenänderung des Wassers bei Druckänderung, die Kompressibilität, ist außerordentlich klein ( $4,58 \cdot 10^{-7} \text{ 1/kPa}$ , FREDLUND & RAHARDJO 1993). Die Kompressibilität von Luft ist deutlich höher ( $4,94 \cdot 10^{-3} \text{ 1/kPa}$ ). Luft-Wassergemische unterscheiden sich in ihrem Kompressibilitätsverhalten wegen deren gegenüber Wasser 10000-fach größerer Kompressibilität kaum von reiner Luft. Die Kompressibilität des Luft-Wassergemisches setzt sich proportional aus Ihren Anteilen zusammen. Die im Wasser gelöste Luft beeinflusst die Kompressibilität des Porenwassers erst dann merklich, wenn weniger als 20 % freie Luft im Porenraum enthalten sind. Die Differenz zwischen Porenwasserdruck und Porenluftdruck

wird auch als Matrix-Sog bezeichnet. Bei undrainierten Verhältnissen steigt dieser mit zunehmender Totalspannung, weil bei Kompression der Porenluftdruck stärker zu nimmt als der Porenwasserdruck (FREDLUND & RAHARDJO 1993). Die herrschenden Porendrücke und Totalspannungen sind von der initialen Dichte des Bodens abhängig. Je höher der Sättigungsgrad, umso höher der einer bestimmten Auflast entsprechende Porenwasserdruck.

Die zwischenmolekularen Bindungskräfte verleihen dem Wasser eine Zähigkeit, die bei dessen Strömung zu innerer Reibung oder Viskosität und zu Schubspannungen führt. Die aus der inneren Reibung resultierenden Schubkräfte  $\tau$  quer zur Strömung sind dem Geschwindigkeitsgefälle  $dv/dy$  proportional, so dass

$$(17) \quad \tau_{x,y} = \eta (dv/dy) \quad \text{ist.}$$

Die Oberflächenspannung der Flüssigkeit bewirkt den Benetzungswinkel, der mit zunehmender Spannung größer wird. Auch die Feststoffoberfläche hat eine Grenzflächenspannung, deren Betrag höher als der der Flüssigkeiten ist (BAUCH 1998). Ein Dreiphasengemisch ist bestrebt, die Fläche mit der größten Oberflächenspannung möglichst zu verringern. Wegen der hohen Oberflächenspannung des Feststoffs wird das Wasser auf der Oberfläche weit auseinander gezogen, da so die Grenzflächenenergie verringert wird.

Veränderungen in der Zusammensetzung der Gasphase, ein analog der Wassergehaltsänderung unterschiedlicher Gasgehalt unterliegen jahreszeitlichen Schwankungen und sind vegetationsabhängig. In Abhängigkeit vom pH-Wert können Gase im Wasser gelöst sein. Vor allem  $\text{CO}_2$  bleibt in saurem Milieu lange in Lösung. Der Wasserdampftransport erfolgt, hervorgerufen durch den thermischen Gradienten und das Bestreben des Konzentrationsausgleiches (Diffusionsvorgänge), von höherer zu niedriger Gaskonzentration. Ab 4 bis 6 % Gasgehalt beginnt die Bildung von Inklusionen in Form von einzelnen Blasen im Porenfluid (HARTGE & HORN 1999). Bei Wassergehaltsänderungen – insbesondere beim Befeuchten – bauen sich, durch die Oberflächenspannung des eindringenden Wassers, in diesen Inklusionen Gasdrücke auf, da das in Blasen eingeschlossene Gas nicht schnell genug entweichen kann. Die Entlastung erfolgt „explosionsartig“ und lässt sich sowohl akustisch durch ein hörbares Knistern, als auch optisch durch das Herausdringen von Bläschen beobachten.

#### 4.6.2 POTENTIALKONZEPT DER SAUGSPANNUNG

Das Potential ("freie Energie") ist definiert als die Arbeit, die notwendig ist, um eine Einheitsmenge Wasser von einem Punkt eines Kraftfeldes zu einem Bezugspunkt zu transportieren. Diese Arbeit entspricht derjenigen, die notwendig ist, um die Mengeneinheit Wasser von einer freien Wasseroberfläche (z.B. Grundwasserspiegel) auf eine bestimmte Höhe in einem Porensystem zu heben bzw. der Bodenmatrix zu entziehen. Wasser bewegt sich im Boden in den Hohlräumen (Porenraum) von Stellen höheren Potentials (= höherer potentieller Energie) zu solchen niedrigeren Potentials, weil es das niedrigstmögliche Energieniveau anstrebt. Das Gesamtpotential des Bodenwassers ergibt sich aus

$$(18) \quad \psi = \psi_z + \psi_m + \psi_g + \psi_o + \dots \quad (\text{evtl. Spezialpotentiale})$$

Das Potential des Bodenwassers kann oft nur näherungsweise gemessen werden. Häufig erfolgt die Messung von Teilpotentialen. Diese Potentiale als Inhalt "freier Energie" addieren sich zum Gesamtpotential. Teilpotentiale sind das Gravitationspotential  $\psi_z$ , das Matrixpotential  $\psi_m$ , das osmotische Potential  $\psi_o$  und das Gaspotential  $\psi_g$ .

Das Gravitationspotential  $\psi_z$  entspricht der zu leistenden Arbeit, um eine bestimmte Menge Wasser von einem Bezugsniveau auf eine bestimmte Höhe anzuheben. Das Bezugsniveau für das Gesamtpotential wird stets so gewählt, dass  $\psi_z$  ein positives Vorzeichen und somit von der freien Wasseroberfläche (Grundwasserspiegel) nach oben gerichtet zunehmende Beträge annimmt. Das Gravitationspotential wird in der Hydrogeologie auch als Lagepotential oder geodätisches Potential bezeichnet (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998).

Das Matrixpotential  $\psi_m$  ist ein Maß für den Einfluss der Bodenmatrix.  $\psi_m$  gibt den energetischen Ausdruck für die Bindungsstärke einer Bezugsmenge Wasser an die Bodenmatrix an. Das Matrixpotential wirkt dem Gravitationspotential entgegen, es bekommt daher ein negatives Vorzeichen (einem negativen hydrostatischen Druck entsprechend). Häufig wird nur der Betrag des Matrixpotentials (ohne negatives Vorzeichen) als Wasserspannung oder auch Saugspannung verwendet. Dies stellt die Abhängigkeit des Matrixpotentials vom Wassergehalt dar.

Das osmotische Potential  $\psi_o$  ist von der Menge der im Bodenwasser gelösten Salze abhängig. Da im Bodenwasser immer Salze gelöst sind, tritt auch immer ein osmotisches Potential auf. Es ist jedoch recht gering und wird meist vernachlässigt. Großen Anteil am Gesamtpotential hat es vor allem in ariden Gebieten, wo sich durch eine gegenüber den Niederschlägen starke Verdunstung die im Wasser gelösten Stoffe in hoher Konzentration einstellen, sowie in Salzmarschen durch den Einfluss salzigen Meerwassers. Anthropogen bedingt kann das osmotische Potential lokal in der Nähe von Straßen eine Rolle spielen (Streusalz). Im Falle der Tonsteine spielt vor allem der in unterschiedlichem Maß gelöste Gips eine Rolle.

Das Gaspotential  $\psi_g$  (oder Luftdruckpotential  $\psi_a$ ) ist Teil des Tensiometerpotentials  $\psi_{tp} = \psi_m + \psi_a$ , welches das Potential angibt, das vom Tensiometer gemessen wird. Wird das freie Wasser, das nicht dem Matrixpotential unterliegt (Grundwasser) in das Potentialkonzept einbezogen, wird ihm ein Druckpotential  $\psi_h$  zugeordnet.

Als Annäherung für das Gesamtpotential wird aus messtechnischen Gründen oft das hydraulische Potential  $\psi_H$  verwendet. Es ist definiert als Summe der am einfachsten bestimmbareren Teilpotentiale:

$$(19) \quad \psi_H = \psi_m \text{ (oder } \psi_h) + \psi_z + \dots + \psi_g.$$

Das Matrixpotential  $\psi_m$  wird in der ungesättigten, das Druckpotential  $\psi_h$  in der gesättigten Bodenzone verwendet. Damit verschiedene Messungen vergleichbar bleiben, müssen Referenzzustände vorausgesetzt werden, wie reines Wasser ohne gelöste Stoffe, freies Wasser, auf das außer der Schwerkraft keine äußeren Kräfte wirken, ein Referenzdruck (Atmosphärendruck), eine Referenztemperatur sowie ein Referenzniveau (gewöhnlich die GW-Oberfläche). Die Interpretation wird oft durch die Verwendung verschiedener Einheiten für die einzelnen Potentiale erschwert: z. B. [J/mol] für chemisches Potential und [J/m<sup>3</sup>] = [N/m<sup>2</sup>] für das hydraulische Potential.

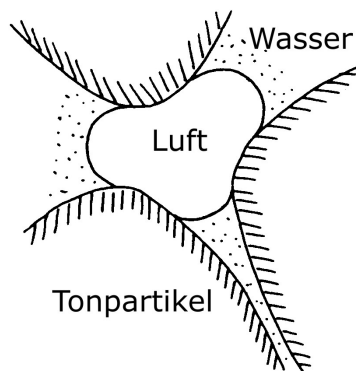
Durch Störungen des Wasserhaushalts verändert sich das Matrixpotential, d.h. es wird z.B. bei Verdunstung geringer bzw. steigt bei Regen an. Das Gravitationspotential hingegen bleibt konstant, so dass das hydraulische Potential als Summe der beiden Potentiale ebenfalls erniedrigt bzw. erhöht wird. Dies hat jeweils eine ausgleichende Wasserbewegung zur Folge. Die Wassermenge, die bei einem bestimmten Matrixpotential an einem Ort in einem Boden vorliegt, ist vom Porenvolumen und von der Porengrößenverteilung abhängig. Die Beziehung zwischen Wassergehalt und Matrixpotential bzw. Wasserspannung ist daher für jeden Horizont und jede Schicht charakteristisch. Sie wird als Wasserspannungskurve bzw. pF-Kurve dargestellt und auch als Bodenwassercharakteristik bezeichnet. Sie ist eine Grundgröße für jegliche Berechnungen von Wasserbewegungen im teilgesättigten Porenraum (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 1998).

Für verschiedene Bodenarten und Gesteine ist ein unterschiedlicher Verlauf der pF-Kurve charakteristisch. Ursache ist die verschiedenartige Porengrößenverteilung. Einfluss haben Körnung, Gefüge und Hysteresis. Das im teilgesättigten Boden bzw. Gestein gebundene Wasser setzt sich aus einem Adsorptionswasseranteil, der im Wesentlichen durch die innere Oberfläche bestimmt wird, und einem Kapillarwasseranteil zusammen, der aus der Porenraumverteilung resultiert (SCHICK 2004). Im adsorptiven Bereich herrschen Spannungen von etwa 50000 kN/m<sup>2</sup> vor. Im Bereich der relativ niedrigen Saugspannungen um den permanenten Welkepunkt sind die Spannungsanteile des Kapillarwassers dominierend. Der permanente Welkepunkt entspricht einem p<sub>F</sub>-Wert von 4,2 (1500 kN/m<sup>2</sup>),

das ist die Spannung, die Pflanzenwurzeln maximal aufbringen können, um ihrem Substrat Wasser zu entziehen. Die Feldkapazität entspricht einem pF-Wert von 1,8 (ca. 6 kN/m<sup>2</sup>). Bei niedrigeren Saugspannungen kann im teilgesättigten Boden Wasser nicht gegen die Schwerkraft im Porenraum zurückgehalten werden. Die Differenz der Wassergehalte von Feldkapazität und permanenten Welkepunkt ist die nutzbare Feldkapazität (NFK), die die Gesamtheit des pflanzenverfügbaren Wassers darstellt. Je steiler die Saugspannungskurve, desto höher ist die NFK. Der Körnung entsprechend haben bei Sandboden Grobporen großen Anteil an der Wasserspeicherung, bei Schluffboden Mittelporen und bei Tonboden Feinporen. Der Einfluss des Gefüges tritt besonders bei quell- oder schrumpffähigen Tonböden zutage. Wenn Be- und Entwässerungsverlauf unterschiedlich sind, beschreibt die Kurve eine Hysterese (Hysteresschleife). Es gibt verschiedene Ursachen für Hysterese, z.B. gegensätzliche Wirkung von Porenengpässen bei Be- und Entwässerung. Wegen der Hemmung an der Feststoffoberfläche dringt das Wasser in die größten Poren als erstes ein. Das Wasser wird genau umgekehrt im Porenraum verteilt, als wenn eine Wasserbewegung durch Veränderung des Matrixpotentials verursacht wird. Die Grenzflächen zwischen Porenwasser und Porenluft sind so stark gekrümmt, wie es durch den Randwinkel bedingt ist. Die Luftdrücke sind im eingeschlossenen Luftkörper höher als im umgebenden Wasser. Der Druckunterschied beträgt

$$(20) \quad \Delta p = 2\tau/r$$

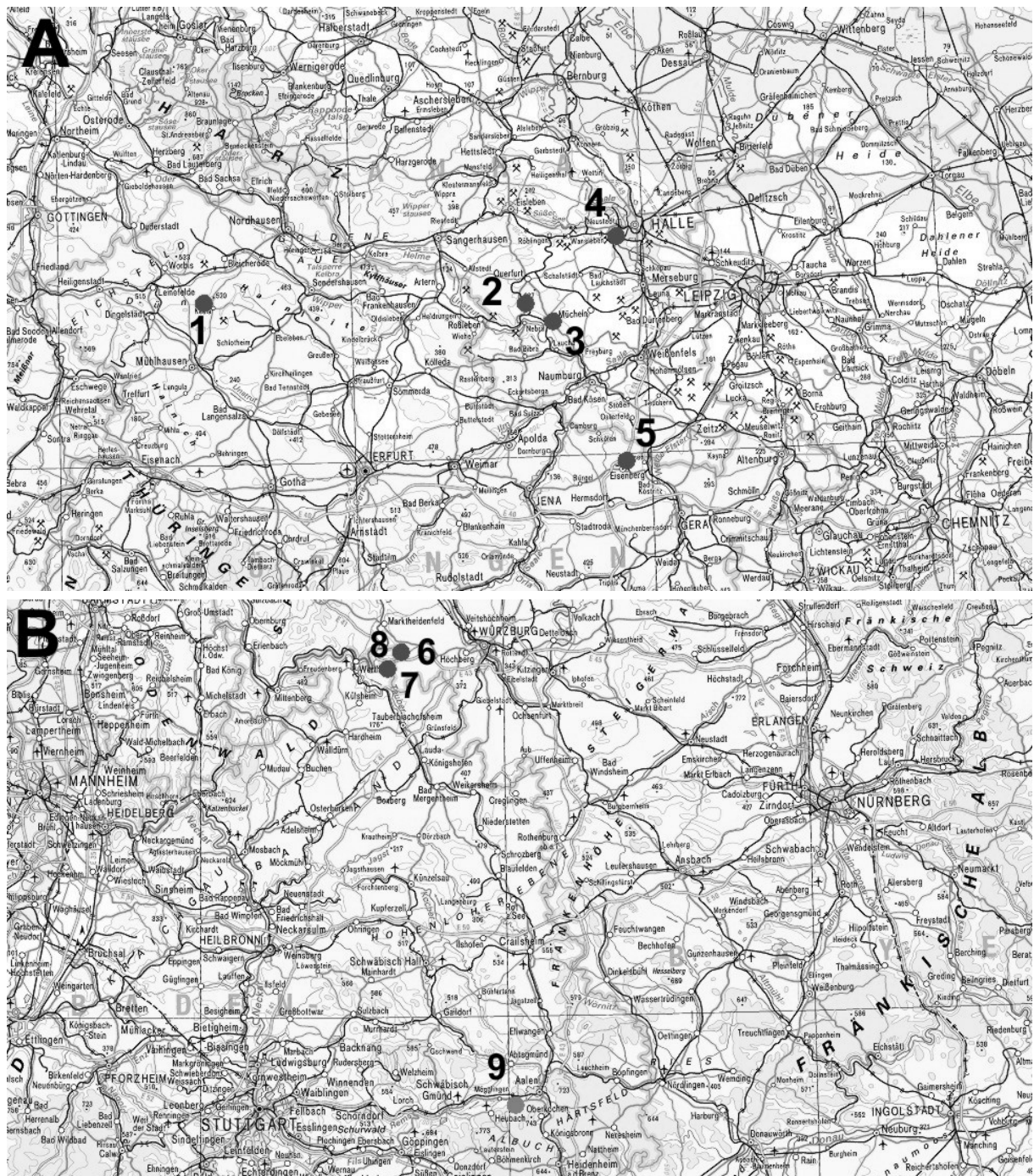
Dabei sind  $r$  der Krümmungsradius des größten an der Begrenzung des Luftkörpers beteiligten Meniskus und  $\tau$  die Oberflächenspannung. In einer engeren Pore hat die Grenzfläche Wasser – Luft die gleiche Krümmung wie in der größten Pore, wenn der Luftdruck im gesamten Luftvolumen gleich groß ist. Diese Menisken haben daher keine halbkugelige Form, sondern sind flacher. Die Luftinklusion ist bestrebt den größtmöglichen Meniskusradius auszubilden (siehe Abbildung 10), weil damit der Druckunterschied zum umgebenden Wasser am geringsten ist, so dass die Luftblase in die größte Pore hineingedrückt wird (HARTGE & HORN 1999).



**Abbildung 10** Form von Luftinklusionen (nach Hartge & Horn 1999). Die Radien der Luftinklusion sind unabhängig vom Durchmesser der Poren gleich groß – entsprechend weit reicht die Luftblase in eine Pore hinein.

## 5 Geologische Beschreibung des verwendeten Probenmaterials

Veränderlich feste Tonsteine kommen in unterschiedlichen stratigraphischen Positionen vor. Wegen ihrer flächenhaften Verbreitung haben für ingenieurgeologische Fragestellungen die Tonsteine des Oberen Buntsandsteins (Röt) und des Lias und Dogger eine besondere Bedeutung (Abbildung 1), weshalb sich diese Arbeit in erster Linie Röt-Tonsteinen sowie dem Opalinuston widmet. Um bestimmte experimentelle Einflüsse, z.B. in direkten Scherversuchen, zu testen, wurde zusätzlich ein im Wesentlichen aus Kaolin bestehender tertiärer Ton verwendet.



**Abbildung 11** Lage der Probenahmepunkte im Röt: A) Thüringer Becken – 1: Deuna, 2: Spielberg, 3: Karsdorf, 4: Angersdorf, 5: Eisenberg, B) Süddeutschland – 6: Dietenhahn, 7: Wüstenzell, 8: Wiesenfeld, und Dogger: 9: Essingen (Opalinuston).



## 5.1 Geologie und Petrographie der Röt-Tonsteine

Es wurden Röt-Tone aus einer vergleichbaren stratigraphischen Position in verschiedenen Verwitterungszuständen von verschiedenen Lokalitäten im Thüringer Becken und dem Raum Würzburg untersucht (siehe Abbildung 11). Die untersuchten Röt-Proben stammen aus Aufschlüssen bei Spielberg in der Querfurter Mulde, aus Eisenberg nahe dem Hermsdorfer Kreuz der Bundesautobahnen A14 und A9, aus Deuna (Tongrube Zementwerk, Abbildung 15) in den Bleicheröder Bergen und aus Angersdorf bei Halle (Baugrube Feuerwehrhaus 2001) sowie aus Steinbrüchen in Diethenhahn (Fa. Frank Zeller), Wüstenzell (Fa. Hoffmann) und Wiesenfeld (Tongrube Bayrische Ziegelunion) westlich von Würzburg.

Das Röt besteht aus einer Wechsellagerung litoraler, fluviatiler und limnischer Sedimente (HOPPE & SEIDEL 1974) und ist im Bereich der Eichsfeld-Schwelle, dem Ostthüringischen Randgebiet und Thüringer Senke zwischen 105 und 185 m mächtig. Die Unterteilung erfolgt nach SEIDEL 1965 in das Salinarröt, das Pelitröt und die Myophorienfolge (Abbildung 12). Im oberen Buntsandstein war die marine Verbindung im NW unterbrochen und es gab erstmals eine Verbindung zur Tethys. Während im Westen die salinaren Folgen dominierten, nahm der marine Einfluss und mit ihm die Ablagerung von Karbonaten nach Osten hin zu (BEUTLER & SZULC 1999). Die Röt-Tone wurden vor etwa 250 bis 240 Ma abgelagert, es folgte im Thüringer Becken eine mehr oder weniger kontinuierliche Sedimentabfolge bis in den Lias, so dass von einer maximalen Überlagerung von ca. 870 m als lithostatischer Druck auszugehen ist (Abbildung 14). Ab dem Dogger setzte im Thüringer Becken eine intensivere Erosion und damit eine allmähliche Entlastung der Röt-Tone ein, welche sich in der Zeit von Kreide und Paläogen vermutlich schon an der Oberfläche, bzw. etwa in ihrer rezenten Tiefenlage befanden. Lokal wurden im Verlauf des Tertiärs geringmächtige Sedimente abgelagert. Von der pleistozänen Eisbedeckung war nur der äußerste NE des betrachteten Ablagerungsgebietes betroffen. Von einem bedeutenden konsolidierenden Einfluss der Eislast ist jedoch angesichts der vormaligen hohen Überlagerungsmächtigkeit der Sedimentfolge nicht auszugehen.

Die Sedimente des Röt bestehen aus grauen, rotbraunen bis violett gefärbten Ton-Mergelsteinen mit Einlagerungen von Sandstein, Dolomit und bis 10 m mächtigen Knollen- und Fasergipsbänken (PUFF 1963). Vor allem im Salinarröt sind mächtige Gipse zu finden (Basisgipse). Auch im Pelitröt sind geringer mächtige Knollen- und Fasergipslagen enthalten (MORGENEYER 1963, SEIDEL 1992).

Die Rötgipse sind wegen der Gipslagen subrosionsanfällig, so dass es durch Auslaugungsprozesse lokal zu Massendefiziten kommen kann. In dessen Folge entstehen zum einen atektonische Schichtdeformationen, die bis in den Wellenkalk reichen können. Zum anderen sind deshalb Erdfälle im Verbreitungsgebiet des Röt häufig zu finden. Die Tonsteine sind meist mit Kluftabständen  $< 0,1$  m engständig geklüftet (WENZEL 1991). Die Klüfte sind oft horizontspezifisch und nur wenige Zentimeter lang ausgebildet.

Die Röt-Tone haben einen Korngrößenanteil  $< 2 \mu\text{m}$  von 15 bis 75 % und einen Anteil  $< 0,7 \mu\text{m}$  von 9 bis 25 %. Die Kornverteilungskurven der unterschiedlich verwitterten Materialien und verschiedener Aufschlüsse verlaufen annähernd parallel. Proben des dekonsolidierten Typs 4 wiesen häufig einen geringfügig höheren Schluffanteil auf.

Als Tonmineralbestandteile sind nach HOPPE & SEIDEL 1974 Illit und Glimmer vorhanden. Nach LIPPMANN 1956 und BRUNHOFF 1983 sowie BACKHAUS 1981 ist Corrensit (Wechsellagerung aus Chlorit und Smektit bzw. Chlorit und Vermiculit) für das Rötmeer charakteristisch. Wie sich in eigenen qualitativen mineralogischen Untersuchungen zeigte, wird der Tonmineralbestand in allen vier Typen deutlich von Illit dominiert, als Nichttonminerale sind Quarz und Feldspat zu finden. Haupttonmineral ist Illit mit Anteilen zwischen 87 und 89 % in der Ton- und 81 bis 83 % in der Schluffkornfraktion, daneben kommen zwischen 9 und 11 % (bzw. 13-17 % in der Schluffkornfraktion) Kaolinit und untergeordnet mit 2 bis 4 % ein nicht quellfähiges mixed-layer-Tonmineral vor, welches ohne weitere mineralogische Untersuchungen nicht näher zu spezifizieren war (siehe Kapitel

7.12). Im Rahmen der Genauigkeit der verwendeten Methode zur quantitativen Bestimmung mittels Peakflächen und Massenschwächungskoeffizienten sind somit keine Unterschiede in der tonmineralogischen Zusammensetzung festzustellen.

Qualitative tonmineralogische Untersuchungen im Pelitröt eines Massenverlagerungsgebietes am Dün (südöstlich der Ortschaft Leinefelde, BEYER 2002) zeigten Quarz, Dolomit, Illit, Montmorillonit, Corrensit und Kaolin als mineralische Bestandteile. Zu ähnlichen Feststellungen kommen BÜHMANN & RAMBOW 1979 sowie WENZEL 1991.



Abbildung 12 Stratigraphisches Profil des Röts nach Seidel (1965).

## 5.2 Geologie und Petrographie des Opalinustons

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Opalinuston-Proben wurden in der Tongrube der Trost-Ziegelwerke Essingen bei Aalen (Abbildung 11 und Abbildung 16) gewonnen.

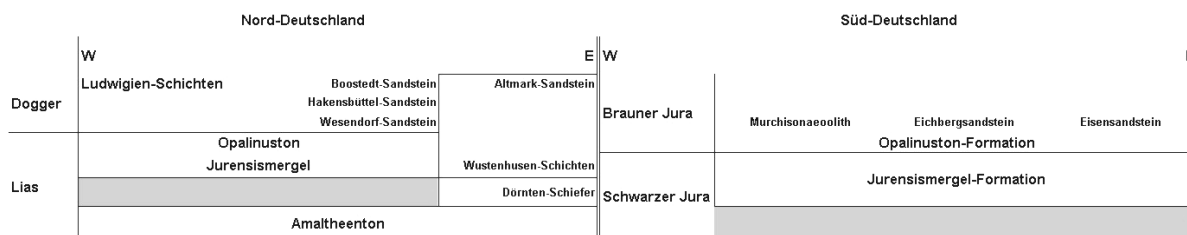
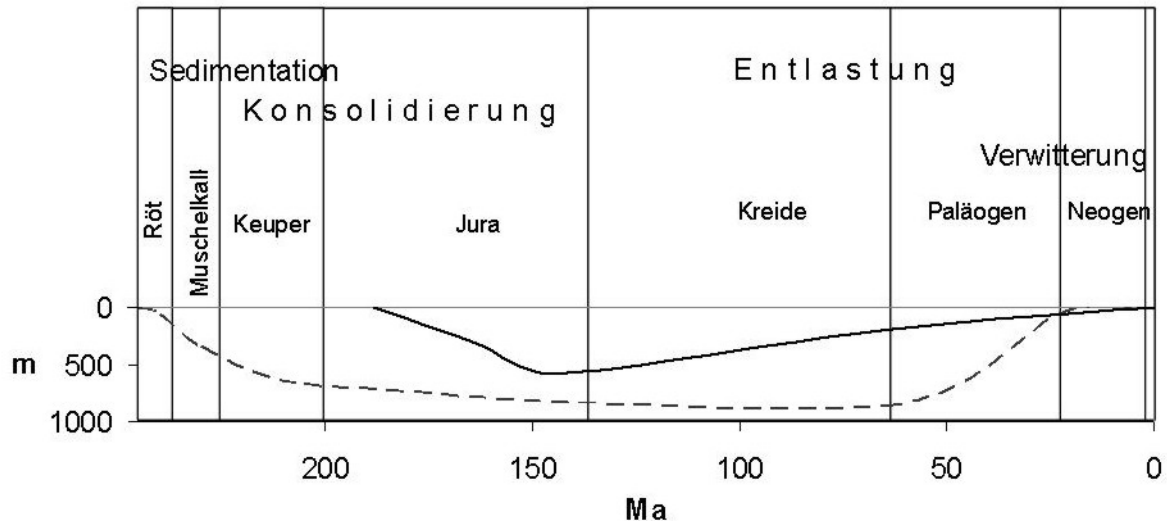


Abbildung 13 Stratigraphisches Profil des Jura an der Grenze zwischen Schwarzem und Braunem Jura nach Dt. Stratigraphische Kommission (2002).

Der Opalinuston besteht aus einer 90 bis 110 m mächtigen monotonen Schichtenfolge aus dunklen, zum Teil schiefrigen Tonen und Tonmergeln. Der Braune Jura ist durch Zunahme des Sand- und Kalkgehalts, von Schwefelkies- und Mergelkalk-Konkretionen nach oben hin gekennzeichnet (Abbildung 13). Der Name Opalinuston beruht auf dem im Liegenden des Dogger leitenden Ammoniten *Leioceras opalinum*. Durch Verwitterung des relativ harten klüftigen feinschichtigen dunkelgrauen Tonsteins erfolgt die Zunahme der Klüftigkeit. In Oberflächennähe ist eine Plastifizierung mit ockerbrauner bindiger Litho-Relikte enthaltender Bodenbildung zu beobachten.

Die Sedimente des Dogger  $\alpha$  erreichten maximal eine Sedimentüberdeckung von etwa 400 m, was einer Überlagerungsspannung von 4-8 MPa entspricht (Abbildung 14). Es erfolgte eine kontinuierliche Sedimentation vom braunen Jura an bis in den Oberjura, dann begann langsam die Verlandung. Das heißt während Kreide und Tertiär setzte eine andauernde durch festländische Verwitterung geprägte Periode ein, die nur auf der Ostalb im Eozän und Pliozän teilweise durch alpine Schüttungen von Sanden unterbrochen wurde.



**Abbildung 14** Versenkungspfade der Röt-Tone im Thüringer Becken und dem Opalinuston der Ostalb (schematisiert).

Die untersuchten Proben hatten einen Anteil von 28 bis 35 %  $< 2 \mu\text{m}$  und enthielten im dispergierten Zustand Partikel  $> 63 \mu\text{m}$  in verschwindend geringen Anteilen. Der Kalkgehalt liegt in der Regel zwischen 2,9 und 9,5 %. Im nahezu unverwitterten bergfrischen Zustand sind natürliche Wassergehalte von 6 bis 8 % üblich. Als Hauptgemengteile beschrieb MERKLEIN-LEMPF (1985) analog zu HENKE & HILLER (1985) Illit, Kaolinit und Chlorit und als Nebengemengteile Quarz sowie eine quellfähige Wechsellagerung aus Illit und Montmorillonit, die letztere nicht nachweisen konnten. Mineralogische Verwitterungserscheinungen sind die Abnahme des Kalkgehaltes mit zunehmender Verwitterung, die Zunahme des Chloritanteils sowie die Oxidation von feinverteiltem Pyrit einhergehend mit der Erhöhung der Kationenaustauschkapazität mit zunehmender Verwitterung (HENKE & HILLER 1985). Nach eigenen Untersuchungen dominiert Illit mit 70 bis 80 % den Tonmineralbestand (siehe Kapitel 7.11), daneben kommt Kaolinit vor. Chlorit konnte nicht nachgewiesen werden. Der Opalinuston enthält fein verteilten Gips.

### 5.3 Geologie und Petrographie des tertiären Tons

Der aufgrund seiner Homogenität mit klassisch bodenmechanischen Methoden untersuchbare mittelplastische Ton stammt aus einer auflässigen Tongrube im eozänen Kapselton am NW-Rand von Halle / Saale. Das Alter des Kaolins beträgt etwa 50 Mio. Jahre (KRIEBEL & MARTIKLOS 1995). Es handelt sich um Verwitterungsmaterial des Halleschen Rhyoliths, der durch das zu Beginn des Tertiärs feuchtwarme Klima tiefgründig kaolinitisiert wurde.

Nördlich von Halle setzen die Sedimente des Tertiärs im höheren Eozän über dem kaolinitischen Kapselton mit klastischer Sedimentation und dem zwischengelagerten Halleschen Unterflöz in schwankender Mächtigkeit von 0 bis 9 m ein. Nach einer Schichtlücke folgen im Oligozän die Stubensande mit dem Halleschen Oberflöz. Im Mitteloligozän erfolgte die Transgression des Rupeltonmeeres mit geringmächtigen Sandschüttungen an der Basis und einer zwischen 0 und 15 m mächtigen Tonfolge (BLUMENSTENGEL & KRIEBEL 1995). Ob das maximal 340 m mächtige Schichtenprofil von

Eozän, Oligozän und Quartär über dem Kapselton an dieser Stelle vollständig ausgebildet war, d.h. die tatsächliche Mächtigkeit der Lockersedimentsüberdeckung, ist nicht bekannt. Durch die Eisbedeckung während der quartären Vereisung unterliegt das Material zusätzlich einer geringen Überkonsolidation.

Der Mineralbestand wird von Kaolinit dominiert. Es handelt sich um einen schluffigen Ton mit hellgrauer bzw. im trockenen Zustand weißer Farbe. Das Material hat bei einer Korngrößenanalyse mit dem Lasergranulometer einen Anteil von 25 % mit einem Durchmesser  $< 2 \mu\text{m}$ . Der Hauptteil der Kornverteilungskurve liegt im Feinschluffbereich. Der mittlere Korndurchmesser ist  $4,4 \mu\text{m}$  und 90 % der Partikel sind  $< 15,2 \mu\text{m}$ . Teilweise sind Quarz und Feldspäte als Sand-Nebengemengteil vorhanden. Bei Austrocknung bildet sich ein unregelmäßiges Trennflächengefüge aus, welches an die Bröckchenbildung der Tonsteine erinnert (Abbildung 7).



**Abbildung 15** *Tongrube des Zementwerkes Deuna.*



**Abbildung 16** *Auflässige Tongrube der Trost-Ziegelwerke in Essingen.*

## 6 Versuchsbeschreibungen

Um die Auswirkung der Saugspannung in teilgesättigten Tonsteinen auf ihre physikalischen Eigenschaften zu charakterisieren, ist eine Vielzahl von verschiedenen Versuchen notwendig, da man die aktuell wirkende Saugspannung nicht direkt messen kann. Das Wasseraufnahmevermögen und die spezifische Oberfläche geben einen Hinweis auf die möglichen Saugspannungen. Zur Charakterisierung der Festigkeitseigenschaften im weitesten Sinne wurden verschiedene Versuche durchgeführt, dazu gehören direkte Scherversuche, die Trocknungs-Befeuchtungswechsel zur Charakterisierung des Zerfallsverhaltens, das Langzeitsetzungsverhalten und das Quell- bzw. Schrumpfverhalten. Zur Charakterisierung des Porenraums bzw. zur Untersuchung der Wasserverteilung im Porenraum wurden rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen mit Kryotransfer herangezogen. Ferner wurden Mineralbestand, Korngrößenverteilung, Korndichte etc. als charakteristische Materialeigenschaften bestimmt.

### 6.1 Wasseraufnahmevermögen

Die Wasseraufnahmefähigkeit der Tonsteine wurde mit dem Versuch nach Enslin / Neff bestimmt. Da durch das Durchströmen der Aggregate mit Wasser strukturelle Veränderungen eintreten, die den Zerfall der Tonsteinaggregate zur Folge haben, wurde vergleichend die Wasserdampfaufnahmefähigkeit in einem Klimaschrank bei einer relativen Luftfeuchte nahe 100 % ermittelt. Die Wasseraufnahmefähigkeit gibt Aufschluss über die Oberflächeneigenschaften, die zum einem von der mineralogischen Zusammensetzung geprägt werden, zum anderen aber auch von der vorhandenen Struktur beeinflusst sind.

#### 6.1.1 WASSERAUFNAHMEVERMÖGEN NACH ENSLIN / NEFF

Als Wasseraufnahmevermögen bezeichnet man die Eigenschaft des getrockneten Bodens Wasser aufzusaugen. Im engeren Sinne wird unter der im Enslin-Versuch ermittelten Wasseraufnahmefähigkeit jedoch speziell die auf das Trockengewicht bezogene Wassermenge verstanden, die die Feinbestandteile  $< 63 \mu\text{m}$  eines Boden aufzusaugen vermögen (DIN 18132). Das Wasseraufnahmevermögen wird vor allem im Rahmen von Eignungsprüfungen als Dichtungsmittel für feinkörnige Böden bestimmt. Die Wasseraufnahme charakterisiert den Tongehalt und in gewisser Weise auch den Chemismus. Durch den Zusammenhang mit der Steifezahl kann auf die Setzungsgefährdung, mit dem Reibungswinkel auf die Rutschungsneigung von Böden geschlossen werden. Im Falle von Böden sind auch Aussagen über die Frostgefährdung möglich, da eine hohe Wasseraufnahme große Frosthebungsbeträge zur Folge haben kann. Durch Quellfähigkeit kann bei großem Wasserbindungsvermögen bei behinderter Ausdehnung eine Selbstverdichtung erfolgen.

Das zunächst von ENSLIN (1933) entwickelte Gerät wurde von NEFF (1959) modifiziert. Das Messgerät nach ENSLIN / NEFF besteht aus einer Filterplatte mit Trichter, die die Bodenprobe trägt, einem U-Rohr und einer Messpipette. Durch den Höhenunterschied der Filterplatte im Probentrichter und der Messpipette von 5 cm soll erreicht werden, dass die Wasseraufnahme infolge des tatsächlichen Wasseranlagerungsvermögens und nicht durch die Kapillarität hervorgerufen wird. Die Kapillarität der Filterplatte muss entsprechend hoch genug sein, um eine Wassersäule von 5 cm oberhalb der Messpipette zu halten. Der Aufbau des Messgerätes nach Enslin / Neff und der Versuchsablauf sind normativ in DIN 18132 geregelt. Demnach wird für den Versuch nur die Korngröße  $< 2 \text{ mm}$  verwendet, die Probenmenge beträgt in der Regel 1 g. Wird die Kapazität der Messpipette überschritten, muss die Probenmenge entsprechend verringert werden. Wichtig ist, dass die schonend getrocknete Probe bis zum Versuchsbeginn im Exsikkator verbleibt, da schon bei kurzen Verweilzeiten an der feuchten Raumluft Wasser an Tonpartikel angelagert werden kann, was eine niedrigere Wasseraufnahmekapazität vortäuscht. Die Wasseraufnahme  $W_{\text{max}}$  ist nach DIN 18132 definiert, wenn zwei aufeinander folgende Ablesungen nicht mehr voneinander

abweichen. Daraus kann das Wasseraufnahmevermögen  $W_B$  nach folgender Formel berechnet werden:

$$(21) \quad W_B = W_{max} [g] \cdot 100 \% / m_d [g]$$

wobei  $m_d$  die Trockenmasse der Probe ist.

In dieser Arbeit wurde zum Teil abweichend von dieser Versuchsvorschrift verfahren. Es wurden Wasseraufnahmeversuche an den Aggregaten aus den Verwitterungsreihen durchgeführt. Dabei wurden jeweils die gesiebten Fraktionen für die weiteren Messungen verwendet. Zum großen Teil ist eine Versuchszeit von 8 min nicht ausreichend gewesen, so dass die Versuche bis zum Einstellen des  $w_{max}$  fortgesetzt wurden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ab einer gewissen Versuchsdauer die Verdunstung von Wasser durch die Filterplatte messbare Größenordnungen erreicht. Die Versuche wurden in einem klimatisierten Raum und Verdunstungsmessungen des Enslin-Gerätes bei geregelter Temperatur jedoch wechselnder relativer Luftfeuchte durchgeführt. Die mittleren Verdunstungsraten schwanken je nach Luftfeuchte zwischen 2 und 23  $\mu\text{l/h}$ , wobei zu Versuchsbeginn die messbare verdunstete Wassermenge zunächst sehr gering ist und sich der lineare Trend erst nach etwa einer Stunde einstellt. Der Mittelwert der ermittelten Verdunstungsraten beträgt 12  $\mu\text{l/h}$ . Die berechnete Verdunstung zu unterschiedlichen Zeitpunkten wurde zur jeweiligen rechnerischen Korrektur der „Langzeit“-Versuche herangezogen.

Je tonhaltiger ein mineralischer Boden ist, umso größer ist sein Wasseraufnahmevermögen. Das Wasseraufnahmevermögen hängt stark von der chemischen Zusammensetzung der Tonminerale ab. Man geht davon aus, dass nur quellfähige Tonböden Werte für  $w_{max}$  größer als 100 % erreichen (SCHULTZE & MUHS 1967). Der Enslin-Wert (= maximale Wasseraufnahmefähigkeit  $w_{max}$ ) und die maximale Wasseraufnahmezeit korrelieren mit Fließgrenze, Proctor-Dichte, Steifezahl, Wasserdurchlässigkeit und Reibungswinkel. Nach ENDELL et al. (1939), NEUMANN (1957) und NEFF (1959) werden mit wachsendem Wasseraufnahmevermögen die Proctor-Dichte, die Steifezahl, die Durchlässigkeit und der Reibungswinkel bei vergleichbarer Korngrößenverteilung geringer, die Fließgrenze hingegen größer.

**Tabelle 2** Durchschnittliches Wasseraufnahmevermögen von Böden und künstlichen Gemischen (nach SCHULTZE & MUHS, 1967)

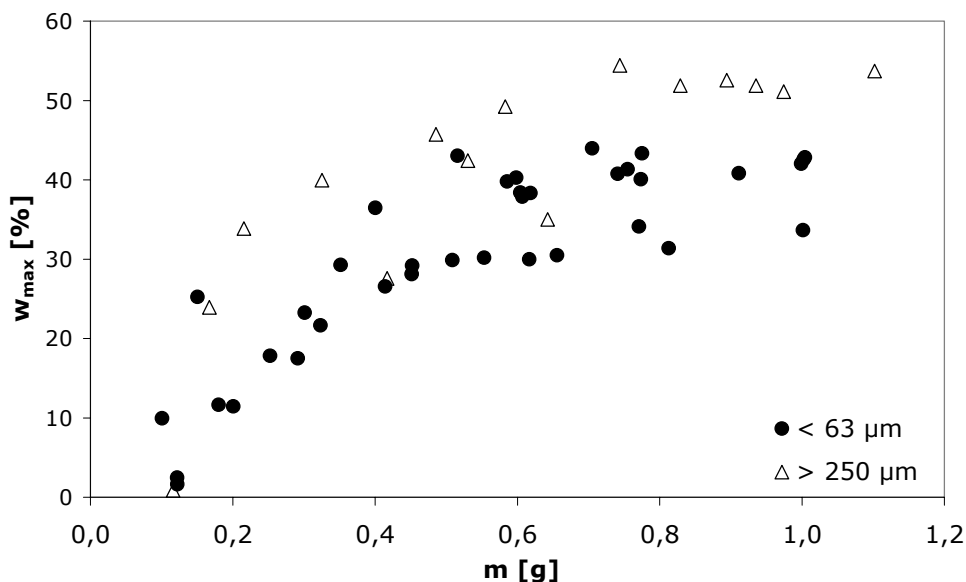
Bodenart	$w_{max}$ [%]
Quarzmehl	30
Tone	60-150
Kaolin	70-100
Ca-belegter Bentonit	300
Na-belegter Bentonit	700
Humus	500

Die Genauigkeit des Versuches hängt stark von der Aufbringung der Probe auf die Filterplatte ab, bei Aufbringung auf die Mitte wurden empirisch Abweichungen von 4 %, bei randlicher 25 % der aufgenommenen Wassermenge bestimmt (SCHULTZE & MUHS 1967).

Bei geringerer Probenmenge wird der ermittelte Wert der maximalen Wasseraufnahme zusätzlich noch von der Probenmenge beeinflusst (Abbildung 17). So ergaben sich bei eigenen Messungen folgende Standardabweichungen (Angabe in Massen-%), wenn man nur Versuche mit einer Probenmenge > 0,7 g berücksichtigt: Bei der Fraktion <63  $\mu\text{m}$  weichen die Werte für  $w_B$  bei zentrierten und nur geringfügig randlichen Schüttkegeln um 4,5 % bei randlichen Kegeln um 6,8 % voneinander ab. Die  $w_B$ -Werte der Fraktion > 250  $\mu\text{m}$  erreichen für zentrierte Schüttungen eine Abweichung von 1,2 % und geringfügig randliche Kegel 3,4 % (siehe Tabelle 3). Aufgrund der relativ geringen Anzahl von Wiederholungsversuchen ( $n=3..7$ ), sind diese Standardabweichungen jedoch statistisch nur wenig aussagekräftig. Bei kleinsten Probenmengen steigt die Wasseraufnahmefähigkeit mit

der Trockenmasse. Erst ab eine Masse von 0,7 g kann davon ausgegangen werden, dass die Werte von der Probenmenge unabhängig sind.

Eine weitere Fehlerquelle sind stark unterschiedliche Probenmengen und die ungenügende Trocknung des Bodens bei 40 °C. Die vollständige Trocknung beeinflusst den Benetzungswiderstand des Feststoffs und damit die Wasseraufnahmefähigkeit im Vergleich zu natürlichen Böden, die immer eine gewisse Restfeuchte enthalten.



**Abbildung 17** Abhängigkeit der Wasseraufnahmefähigkeit von der verwendeten Probenmasse für die Fraktion < 63 µm eines Röt-Tonsteins (n=37) und Aggregate > 250 µm eines Röt-Tonsteins (n=15).

**Tabelle 3** Standardabweichung des Wasseraufnahmevermögens bei Wiederholungsversuchen mit den < 63 µm und > 250 µm Fraktionen eines Röt-Tonsteins mit einer Probenmenge > 0,7 g.

Kegel	< 63µm		> 250 µm	
	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert
zentriert	4,5 (n=4)	40,4	1,2 (n=4)	52,7
etwas randlich	4,5 (n=7)	39,0	3,4 (n=4)	50,0
randlich	6,8 (n=3)	36,6	-	-

Das Wasseraufnahmevermögen ist auch von der Kationenbelegung der Tonminerale abhängig, wie XIANG (1997) am Haselgebirgston zeigte, der hauptsächlich aus rötlichen und graugrünen Tonen aus Illit und Chlorit mit Gipseinlagerungen bestanden.

### 6.1.2 AUFNAHME VON WASSER AUS DER DAMPFPHASE

Im direkten Kontakt mit Wasser kommt es zu strukturellen Veränderungen der Probe, da Feststoffbestandteile und Porenfüllung direkt mit dem Wasser reagieren. Die mechanischen Effekte kann man ausschalten, indem man die Proben in der Nähe einer freien Wasserfläche in kontrolliertem Klima mit einer Luftfeuchte nahe 100 % Wasserdampf aussetzt (BUTENUTH et al. 2004). Es findet dann kein Transport im Sinne des Durchfließens der Probe statt, sondern die Adsorption erfolgt als dreiatomiges Wassermolekül.

Um die Wasseraufnahme aus der Dampfphase mit dem Enslin-Versuch vergleichen zu können, wurden die Proben 25 °C und 98 % relativer Luftfeuchte im Klimaschrank (WK 340 der Firma WEISS Umwelttechnik) ausgesetzt, bis sich eine Massenkonstanz einstellte. Das

Equilibrium war in Vorversuchen in der Regel nach 2 bis 3 Tagen erreicht. Zur Sicherheit wurden jedoch alle serienmäßig verwendeten Proben einheitlich 7 Tage unter klimatisierten Bedingungen belassen. Die eingestellten Temperatur- und Luftdruckbedingungen entsprachen etwa denen des Enslin-Versuches.

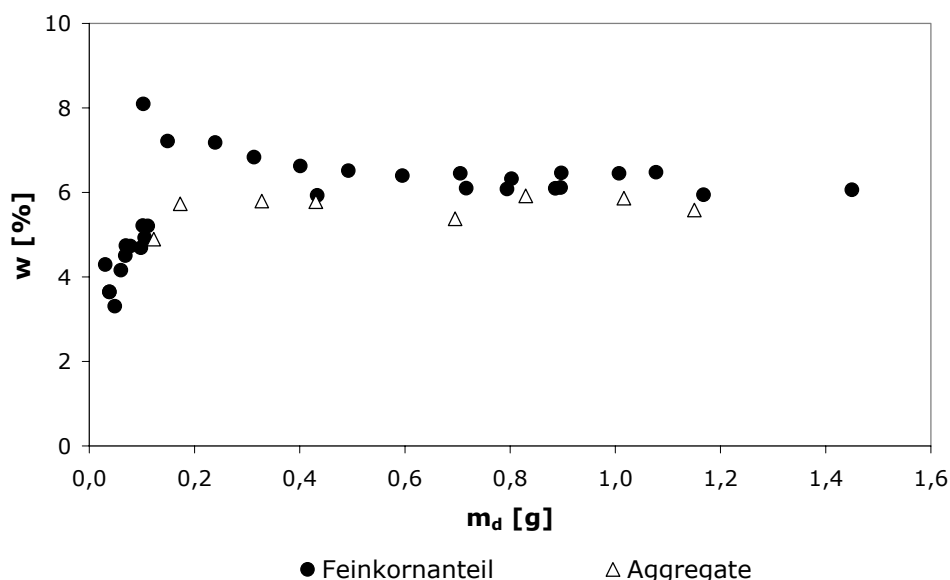
Bei den von BUTENUTH et al. 2004 untersuchten Bohrkernscheiben hatte die Probengröße keinen Einfluss auf die relativ aufgenommene Wassermenge, lediglich die Zeit bis zum Einstellen des Equilibriums verlängerte sich. In Vergleichsmessungen an einer Probe < 63 µm eines Röt-Tonsteins zeigte sich eine starke Streuung der adsorbierten Wassermenge (Abbildung 18) bei sehr geringen Probenmengen. Bei den Vergleichsmessungen mit Aggregaten > 2 mm zeigte sich hingegen ein zunehmender Trend der Wasserdampfadsorption mit größer werdender Probenmenge. Bei sehr geringen Probenmengen ist hier die Aufnahme von Wasser geringer jedoch stellt sich schon ab einer Probenmenge von etwa 0,2 g ein etwa gleich bleibender Wert ein. Hauptproblem des Versuches zur Wasserdampfaufnahme ist die sofortige Abgabe von Wasser, wenn die Probe aus den Klimabedingungen entfernt wird. Die Genauigkeit des Messergebnisses ist deshalb von der Zeit abhängig, die zwischen dem Öffnen des Klimaschranks und dem Auswiegen verstreicht. Dieser Fehler wirkt sich natürlich bei geringen Probenmengen deutlicher aus. Die Feuchte-Bedingungen im Klimaschrank werden auch durch kurzzeitiges Öffnen der Tür empfindlich gestört.

Damit liegt die für repräsentative Ergebnisse erforderliche Mindestprobenmenge für beide Versuche in einer vergleichbaren Größenordnung.

Die Aufnahme eines Adsorbats (Wasserdampf) durch das Adsorptionsmittel (Tonstein) in Abhängigkeit von Konzentration bzw. Dampfdruck des Adsorbats bei konstanter Temperatur wird durch eine Sorptionisotherme beschrieben. Unter der Annahme, dass die Wassermoleküle als Monolayer adsorbiert wurden, kann eine Berechnung der spezifischen Oberfläche  $S_{vap}$  erfolgen (BUTENUTH et al. 2004). Die molare Masse von Wasser ist 18. 1 mol sind  $6,023 \cdot 10^{23}$  Moleküle. 1 Wassermolekül benötigt etwa  $18 \text{ \AA}^2$  Fläche – das entspricht  $18 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ . Daraus ergibt sich die spezifische Oberfläche:

$$(22) \quad S_{vap} = \{[(m_{vap} / 18) \cdot (6,023 \cdot 10^{23})] \cdot 18 \cdot 10^{-20}\} / m_d$$

wobei  $m_{vap}$  die Masse des adsorbierten Wassers und  $m_d$  die Trockenmasse der Probe sind.



**Abbildung 18** Abhängigkeit der adsorbierten Wassermenge als gravimetrischer Wassergehalt  $w\%$  von der verwendeten Probenmasse für die Fraktion < 63 µm eines Röt-Tonsteins ( $n=31$ ) und Aggregate > 250 µm ( $n=8$ ).



## 6.2 Spezifische Oberfläche

Die beiden vorweg beschriebenen Versuche geben einen indirekten Aufschluss über die vorhandene spezifische Oberfläche. Diese kann auch direkt über Gasadsorption gemessen werden. Es ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse der drei Versuche miteinander korrelieren. Die spezifische Oberfläche gibt Aufschluss über die Porenraumbeschaffenheit. Sie einerseits eine Funktion der Porengrößenverteilung. Andererseits wird sie auch von der Oberflächenstruktur, insbesondere der Rauigkeit, der Feststoffoberflächen bestimmt.

Die Bestimmung der spezifischen Oberfläche erfolgte mit dem FLOWSORB 2300 nach der Ein-Punkt-BET-Methode (BRUNAUER et al. 1938, DIN 66131). Diese ermöglicht, an Granulaten, Pulvern oder porösem Material die Gasmenge zu bestimmen, die auf der Probenoberfläche als monomolekulare Schicht adsorbiert wird. Die Bestimmung der spezifischen Oberfläche durch Stickstoff-Adsorption wurde gewählt, da so z.B. im Gegensatz zur Methylenblau-Methode keine Zerstörung des Gefüges erfolgte. Wegen des Fehlens quellfähiger Tonminerale war nicht damit zu rechnen, dass die Messwerte der spezifischen Oberfläche nach BET-Methode von der etwas genaueren Glycerin-Methode stark abweichen würden, weshalb auf eine Messung der spezifischen inneren Oberfläche verzichtet werden konnte.

Die Adsorption erfolgt in der Nähe des Siedepunktes des Gases, da dort der Platzbedarf eines einzelnen Gasmoleküles unter bestimmten Vorraussetzungen genau bekannt ist. Als Analysegas wurde ein Stickstoff-Helium-Gemisch im Verhältnis 30 Vol-% zu 70 Vol-% verwendet. Nach der Adsorptionstheorie entspricht 1 ml Stickstoff bei einer Umgebungstemperatur von 27 °C und einem Druck von 1 atm (1,013 bar) einer Oberfläche von 2,84 m<sup>2</sup>. Der Einfluss der Temperatur auf die Messergebnisse wird im Allgemeinen als gering angesehen, während sich Luftdruckschwankungen stark auswirken. Vor der Messung ist deshalb eine Kalibrierung des Gerätes erforderlich.

Der Messbereich des verwendeten FlowSorb-Gerätes liegt zwischen 0,5 und 25 m<sup>2</sup>. Die Probenvorbereitung der im Trockenschrank bereits vorgetrockneten Proben konnte im FlowSorb durchgeführt werden, da nicht zu erwarten war, dass aus den Proben korrosive Gase freigesetzt werden würden. Die trockene Probe wurde in den Probenträger gegeben, so dass noch ein gleichmäßiger Gasfluss möglich war. Der Ausgasvorgang wird zeitlich optimiert, wenn er bei der Maximaltemperatur durchgeführt wird, bei der die Probe thermisch stabil ist. Wegen der Anwesenheit von Tonmineralen wurden die Proben bei 40 °C ausgeheizt. Als Referenz wurden die Messungen an denselben Proben nach dem Ausheizen bei 100 °C wiederholt. Die Probe ist entgast, wenn sich keine weitere Oberflächenänderung bei weiterer Beheizung bei gleicher Temperatur ergibt. Des Weiteren wurden von ausgewählten Proben Heizreihen mit zwischen 40 und 350 °C durchgeführt.

Die Probe wird zur Messung der Adsorption auf die Temperatur von flüssigem Stickstoff gekühlt, dabei darf kein gefrorenes Kondensat Kontakt zum Probenhalter bekommen, da sonst eine ausreichende Kühlung der Probe nicht mehr gewährleistet ist. Die Messung für den Adsorptionsvorgang dauert etwa 3 bis 4 min. Wenn sie abgeschlossen ist, kann auch die Desorption gemessen werden. Die Erwärmung der Probe kann durch Eintauchen des Probengefäßes in Wasser beschleunigt werden. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wird vom Hersteller für dieses Gerät mit +/- 0,02 % angegeben. Da der Adsorptionspeak in der Regel nicht so scharf und deutlich ist, wird vereinbarungsgemäß der bei der Desorption ermittelte Wert als Oberfläche genommen.

Die Oberfläche  $S$  der Probe wird aus den gemessenen Drücken und Gasvolumina nach Gleichung (28) berechnet, die sich wie folgt (BRUNAUER et al., 1938) aus der BET-Gleichung herleiten lässt:

$$(23) \quad (P/P_0)/V_G [1 - (P/P_0)] = 1 / \{ (V_m \cdot C) [(C-1) / (V_m \cdot C)] \cdot P/P_0 \}$$

mit dem Sättigungsdruck des Gases  $P_0$ , dem Volumen des adsorbierten Gases  $V_G$  beim Druck  $P$ , dem Gasvolumen der monomolekularen Schicht  $V_m$  und einer von der

Adsorptionsenergie abhängigen Konstante C ergibt sich unter bestimmten Voraussetzungen eine Vereinfachung der Gleichung

$$(24) \quad S = V_m \cdot A \cdot N / M_v$$

die die Oberfläche angibt. Die Konstante C ist normalerweise sehr groß, weshalb die Gleichung (23) auf

$$(25) \quad (P/P_0) / V_G [1 - (P/P_0)] = (1/V_m) [(1/C) + (P/P_0)]$$

reduziert werden kann. Da der Quotient  $P/P_0$  viel größer als  $1/C$  ist, ergibt sich durch die Änderung in

$$(26) \quad (P/P_0) / V_G [1 - (P/P_0)] = (1/V_m) \cdot (P/P_0)$$

kein großer Fehler. Diese Gleichung kann nach  $V_m$  umgestellt

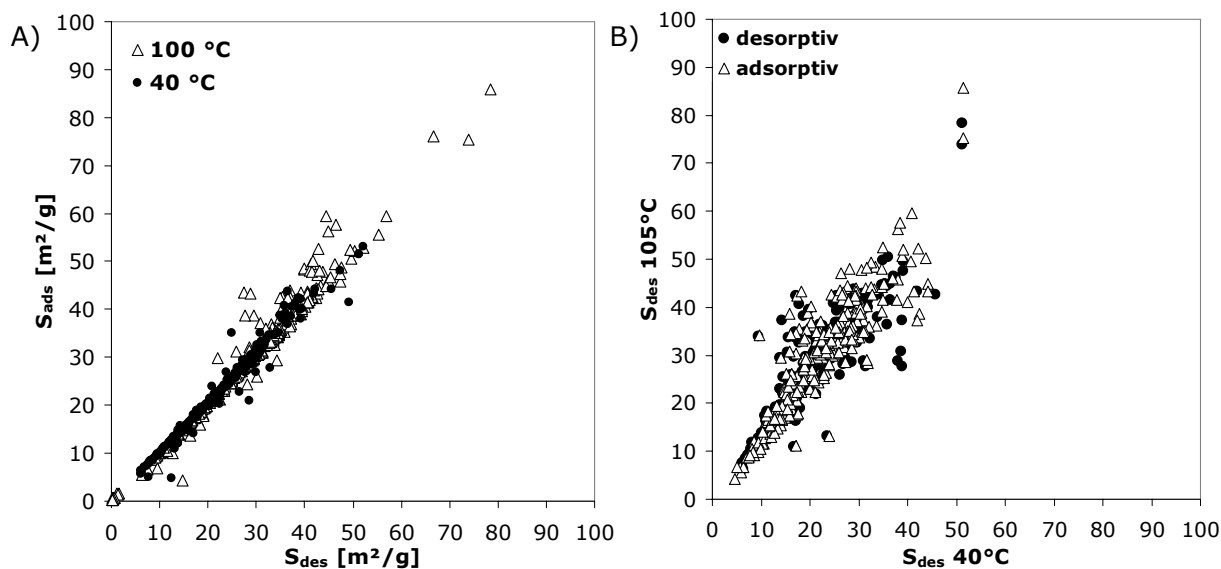
$$(27) \quad V_m = V_G [1 - (P/P_0)]$$

und in (24) eingesetzt werden, woraus sich die Arbeitsgleichung des FlowSorb (BRUNAUER et al., 1938) ergibt:

$$(28) \quad S = V \cdot A \cdot N [1 - (P/P_0)] / M_v$$

Dabei sind V das adsorbierte oder desorbierte Gasvolumen ( $V_{ads}$  oder  $V_{des}$ ), A die Avogadro'sche Zahl (Anzahl der Gasmoleküle für 1 mol eines Gases bei Standard-Druck-Temperatur-Bedingungen), N die Fläche, die ein Molekül des Gases einnehmen kann, P der Druck im System,  $P_0$  der Sättigungsdruck, d.h. der Dampfdruck des flüssigen Gases bei der Adsorptionstemperatur, und  $M_v$  das molare Volumen des Analyse-gases.

Wie zu erwarten, besteht zwischen adsorptiv und desorptiv gemessener Oberfläche ein linearer Zusammenhang, jedoch streuen die Werte besonders bei höheren Ausheiztemperaturen relativ stark (Abbildung 19 A). In der Regel ist die gemessene Oberfläche bei höherer Ausheiztemperatur etwas größer. Die Standardabweichung bei Wiederholungsmessungen beträgt im Mittel 0,23  $m^2/g$  bei 105 °C Ausheiztemperatur und 0,25  $m^2/g$  bei 40 °C Ausheiztemperatur (Abbildung 19 B).



**Abbildung 19** A) Vergleich der adsorptiv und desorptiv gemessenen Spezifischen Oberfläche aller untersuchten Proben; Messung mit einer Ausheiztemperatur von 40 °C (n=317) und einer Messung mit einer Ausheiztemperatur von 100 °C (n=360); B) Vergleich der gemessenen Spezifischen Oberfläche bei 40 °C Ausheiztemperatur und bei 105 °C Ausheiztemperatur.

### 6.3 Trocken- und Korndichte

Trocken- und Korndichte sind charakteristische Eigenschaften, mit deren Kenntnis, die Berechnung des Porenanteils möglich ist. Die Korndichte wurde vor allem als Eingangsparameter für die Korngrößenanalysen mittels Lasergranulometrie bzw. Sedimentationsanalyse benötigt.

#### 6.3.1 TROCKENDICHTE

Die Trockendichte [ $\text{g/cm}^3$ ] der Tonsteine wurde durch Tauchwägung bestimmt. Dazu wurde ein charakteristisches Aggregat getrocknet und mit Haarspray versiegelt, so dass zumindest kurzzeitig ein Eindringen von Wasser verhindert wurde. Die Dichtebestimmung starker verwitterter Proben gelang auf diesem Wege nicht immer, da vor allem der Opalinuston zu sofortigem Zerfall bei Wasserkontakt neigte.

Als Hauptfehlerquelle ist das Abbröckeln kleiner Teile von den Aggregaten zu sehen, die durch die Maschen des verwendeten Haltenetzes hindurch passten und in den Wasserbehälter fielen. Dadurch wird die Masse unter Auftrieb verkleinert, was ein größeres Volumen vortäuscht, da das tatsächlich verloren gegangene Feststoffvolumen kleiner als das seiner Masse entsprechende Wasservolumen ist.

#### 6.3.2 KORNDICHTE

Die Bestimmung der Korndichte [ $\text{g/cm}^3$ ] ist nach DIN 18124 mit verschiedenen Methoden möglich. Auf die alleinige Bestimmung der Korndichte mittels Kapillaryknometer wurde verzichtet, da bei Wasserkontakt Änderungen des Feststoffvolumens zu erwarten sind, sofern lösliche Zemente wie Sulfate und Karbonate (bzw. quellfähige Tonminerale) vorhanden sind. Des Weiteren sind hierfür relativ große Probenmengen notwendig, was nicht immer zu gewährleisten war.

Stattdessen wurde ein Multipyknometer der Firma Quantachrome verwendet. Das Verfahren basiert ebenso auf der Theorie von Flüssigkeitsverdrängung zur Volumenbestimmung von Archimedes. Das verdrängte Fluid ist in diesem Fall ein Gas, das auch in die feinsten Poren eindringen kann, wobei Helium aufgrund seiner geringen Atomgröße und seines inerten Verhaltens gut geeignet ist. Das Multipyknometer misst die wahre Dichte bzw. das wahre Volumen von Festgesteins- oder Gesteinsmehlproben mit Hilfe des Druckunterschiedes, der entsteht, wenn eine bekannte Menge Helium unter Druck von einem genau bekannten Referenzvolumen  $V_R$  in die Probenzelle strömt.

Der Zustand der Probenzelle ist nach Einstellen des Gleichgewichtes nach dem Einströmen des Gases durch folgende Gleichung definiert:

$$(29) \quad P_a \cdot (V_c - V_s) = n_a R \cdot T_a$$

wobei  $P_a$  der Umgebungsdruck,  $n_a$  die Molzahl des Gases im Zellvolumen ( $V_c$ ),  $R$  die Gaskonstante und  $T_a$  die Umgebungstemperatur sind. Wenn der Druck im Referenzvolumen ungefähr 488 kPa oberhalb des Umgebungsdrucks liegt, kann der Zustand des Referenzvolumens durch folgende Gleichung ausgedrückt werden:

$$(30) \quad P_1 \cdot V_R = n_1 \cdot R \cdot T_a$$

Dabei sind  $P_1$  der Druck oberhalb des Umgebungsdrucks und  $n_1$  die Gesamtzahl von Molen des Gases im Referenzvolumen. Wird das Referenzvolumen mit der Probenzelle verbunden, so fällt der Druck im System auf den Druck  $P_2$ , der durch folgende Gleichung gegeben ist:

$$(31) \quad P_2 \cdot (V_c - V_s - V_R) = n_a \cdot R \cdot T_a + n_1 \cdot R \cdot T_a$$

In Gleichung (31) können die Ausdrücke „ $n_a \cdot R \cdot T_a$ “ und „ $n_1 \cdot R \cdot T_a$ “ durch „ $P_a \cdot (V_c - V_s)$ “ und „ $P_1 \cdot V_R$ “ ersetzt werden, dann ergibt sich:

$$(32) \quad V_c - V_s = [(P_1 - P_2) / (P_2 - P_a)] \cdot V_R$$

Wenn der Umgebungsdruck  $P_a = 0$  gesetzt wird, so können alle gemessenen Drücke relativ zum Umgebungsdruck wie folgt dargestellt werden:

$$(33) \quad V_c - V_s = (P_1 - P_2) / P_2 \cdot V_R$$

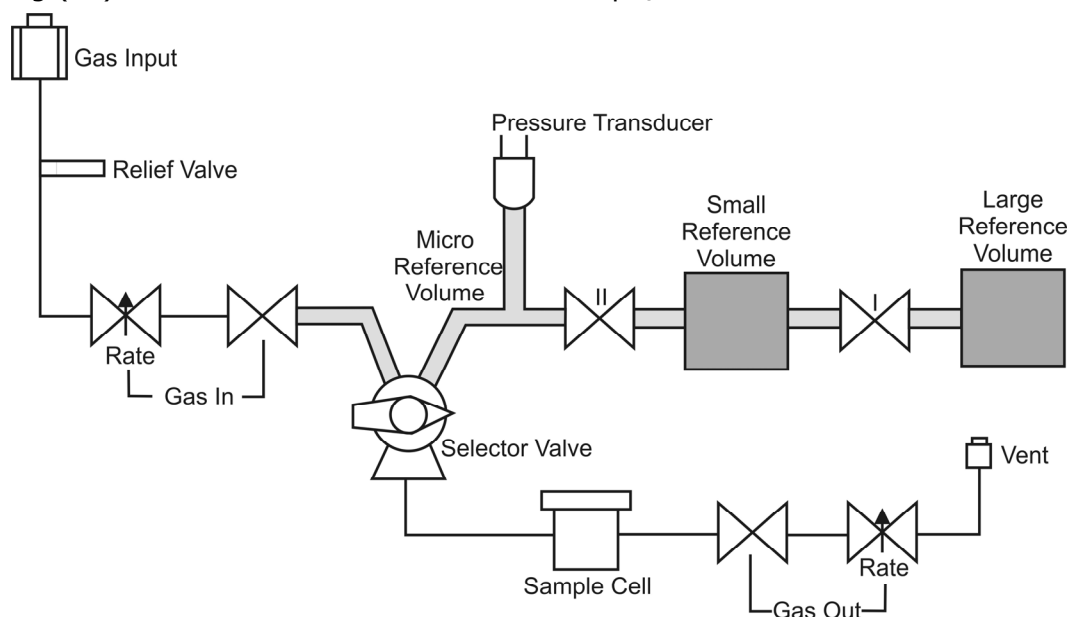
Durch Umstellung ergibt sich daraus als Arbeitsgleichung:

$$(34) \quad V_s = V_c - V_R [(P_1 / P_2) - 1]$$

dabei sind  $V_s$  das wahre Probenvolumen,  $V_c$  das Zellvolumen des Probenbehälters,  $V_R$  das Referenzvolumen,  $P_1$  der Systemdruck nach Befüllung des Referenzvolumens und  $P_2$  der Druck im System, nachdem die Probenzelle mit dem Analysegas gefüllt wurde.

Zunächst muss das kalibrierte System von Kontaminationen durch Gas bzw. Dampf gereinigt und bei Untersuchung von Gesteinsmehl gegebenenfalls ein Vakuum angelegt werden. Es müssen die Masse der Probe, der Druck  $P_1$  nach dem Füllen des Referenzvolumens und der Druck  $P_2$  nach den Füllen der Probenzelle gemessen werden.

Der Versuch wird standardmäßig dreimal wiederholt, wobei die Abweichung der Einzelergebnisse nicht größer als 0,2 % sein sollte. Das Volumen der Probe  $V_s$  kann nach Gleichung (34) ermittelt und daraus die Korndichte  $\rho_{MUP}$  bestimmt werden.



**Abbildung 20** Schematischer Aufbau des verwendeten Heliumpyknometers.

Als Fehlerquelle kommt unter anderem ein nicht inertes Gasverhalten in Frage, was in der Gleichung zu Grunde gelegt wird, weshalb nur trockenes Helium bei Raumtemperatur als Analysegas verwendet werden kann, da Adsorption an der Probenoberfläche den Druck in der Zelle beeinflussen würde. Die Größe dieses Fehlers hängt von der Beschaffenheit des Porenraums und der Oberfläche der Probe ab. Kontaminationen im Porenraum können die Masse der Probe, aber auch das ermittelte Volumen zu groß erscheinen lassen. Da der Porenraum bereits teilweise mit einem Fluid gefüllt ist, kann eine geringere Gasmenge in die Probe einströmen und der bereits vor der Messung gefüllte Porenraum wird dem Festkörper zugerechnet. Volatile Porenfüllungen können die Messergebnisse verfälschen, was sich in Messabweichungen größer als 0,2 % widerspiegelt. Ein weiterer Hinweis auf volatile Kontaminationen ist ein gradueller Druckabfall, wenn die Gasmoleküle die Probenoberfläche wieder verlassen und sich ein Gleichgewichts-Partialdruck einstellt, solange die Probe in den Gasfluss einbezogen ist. Eine zu hohe spezifische innere Oberfläche kann ebenfalls zu Fehlern führen, die allerdings korrigiert werden können, wenn der effektive Durchmesser (Van-der-Waals-Durchmesser) der Gasmoleküle und die spezifische innere Oberfläche der Probe bekannt sind. Ursache sind Hohlräume zwischen der Probenoberfläche und dem Massenzentrum der Gasmoleküle, die zu klein sind, um von einem Gasmolekül eingenommen zu werden. Der Fehler ist erfahrungsgemäß bei etwa einem Gramm Probe mit hoher spezifischer innerer Oberfläche (ca. 1000 m<sup>2</sup>/g) im Bereich von 0,05 cm<sup>3</sup> zu erwarten.

## 6.4 Korn- und Aggregatgrößenbestimmung

Die Korngrößenbestimmung der Tonsteinaggregate erfolgte mittels Trockensiebung. Die Bestimmung der Korngröße der Partikel  $< 63 \mu\text{m}$  erfolgte zum Teil mittels Lasergranulometrie, zum Teil mittels Sedimentationsanalyse.

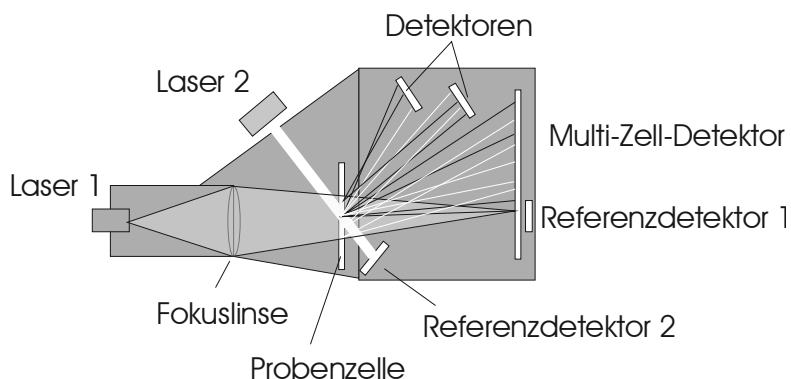
### 6.4.1 AGGREGATGRÖßENVERTEILUNG MITTELS SIEBANALYSE

Die Korngrößenverteilung der Tonsteinaggregate wurde in Anlehnung an die DIN 18123 mit folgendem Siebsatz durchgeführt: 63 mm / 31,5 mm / 16 mm / 8 mm / 4 mm / 2 mm / 1 mm / 0,5 mm / 0,25 mm / 0,125 mm / 0,063 mm. Zunächst wurde die originale Aggregatgrößenverteilung der vorsichtig bei 40 °C getrockneten Proben bestimmt. Danach wurde das Material mit Wasser versetzt und erneut getrocknet und gesiebt. Diese Trocknungs-Befeuchtungs-Zyklen wurden mehrfach durchgeführt, bis ohne zusätzliche mechanische Beanspruchung der fortschreitende Aggregatzerfall mit der Siebung kaum noch messbar war. In der Regel war dieser Zustand nach dem 5. Siebdurchgang erreicht.

### 6.4.2 LASERGRANULOMETRIE

Die Korngrößenverteilung des Feinanteils  $< 63 \mu\text{m}$  und die primäre Korngrößenverteilung des dispergierten Gesteins (Dispersion durch vorsichtigen Ultraschalleinsatz) wurden zum größten Teil mittels Lasergranulometrie bestimmt. Das Verfahren wurde ausgewählt, da mit relativ wenig Aufbereitungsaufwand schnelle und gut reproduzierbare Messungen möglich sind.

Mit dem verwendeten Lasergranulometer CILAS 920 Quantachrome ist die Korngrößenanalyse im Bereich zwischen 0,7 und 400  $\mu\text{m}$  möglich. Das Messprinzip basiert auf der Tatsache, dass alle Partikel einer Probe das Licht eines monochromen Laserstrahls beugen (Abbildung 21). Die Mie-Theorie (MIE 1948) beschreibt die Lichtstreuung an kugelförmigen elektrisch leitenden und nicht leitenden Teilchen. Ergebnis ist eine Intensitätsverteilung des Streulichtes in Abhängigkeit vom Streuwinkel für alle Wellenlängen und Teilchengrößen (LAGALY et al. 1997). Ein Partikel mit einem großen Durchmesser beugt den Laserstrahl nur wenig, d.h. in einem kleinen Winkel. Ein emittierter Laserstrahl erfährt auf seinem Weg durch die Messkammer, die eine Suspension beinhaltet, durch die Feststoffteilchen eine Beugung.



**Abbildung 21** Prinzip der Korngrößenbestimmung mittels Laserbeugung.

Wenn der Teilchendurchmesser kleiner als die Wellenlänge des Laserstrahls ist, dann ist die Lichtstreuung vom Winkel unabhängig. Bei Partikeln mit einem Teilchendurchmesser, der größer als die Lichtwellenlänge ist, kann zur Teilchengrößenbestimmung die Fraunhofer-Näherung verwendet werden, die aus der Theorie der Beugung an Gittern abgeleitet ist.

Es kommt im verwendeten Lasergranulometer eine niedrigerenergetische Laserdiode mit 3 mW Leistung und einer Wellenlänge von 830 nm zum Einsatz. Die Verteilung der Lichtenergien im entstehenden Beugungsdiagramm ist von der Partikelgröße abhängig. Geht man davon aus, dass alle Partikel rund sind, entsteht ein zentraler Spot mit konzentrischen Kreisen, deren Durchmesser indirekt proportional zum Partikeldurchmesser sind. Je kleiner die Partikel, umso größer ist der Beugungswinkel. Die granulometrische Verteilung wird mit

Hilfe von Photodetektoren aus der Energieverteilung zwischen den verschiedenen auf der Linsenfläche erschienenen Koronen bestimmt. Über die Fläche wird auf das Volumen der Teilchen geschlossen. Das Verfahren ist in DIN ISO 8130-13 (2005) geregelt. Es können Pulver in einer bezüglich Brechungsindex und Stabilität geeigneten Flüssigkeit gemessen werden.

### 6.4.3 SEDIMENTATIONSANALYSE MIT RÖNTGENDETEKTION

Da die mittels Lasergranulometrie bestimmten Kornverteilungskurven verglichen mit der augenscheinlichen Ansprache des Materials als zu grob erschienen, wurden vergleichende Untersuchungen mit der Sedimentationsanalyse durchgeführt.

Die Sedimentationsanalyse mittels Röntgendetektion ist in ISO 13317-3 (2001) näher erläutert. Das Prinzip der Absorption von niedrigenergetischen Röntgenstrahlen in einer trüben Suspension wird benutzt, um direkt die Veränderungen in der Feststoffkonzentration zu bestimmen, wenn Partikel in einer Flüssigkeit gemäß dem Stokes'schen Gesetz sedimentieren.

Das Stokes'sche Gesetz lautet

$$(35) \quad D = \sqrt{\{18 \cdot \eta\} / \{(\rho_s - \rho_f) \cdot g\} \cdot (h / t)}$$

wobei D der Partikeldurchmesser,  $\eta$  die Viskosität der Flüssigkeit,  $\rho_s$  die Korndichte,  $\rho_f$  die Dichte der Flüssigkeit, g die Erdfallbeschleunigung und h die Höhe, die ein Partikel in der Zeit t sedimentiert. Verschiedene Faktoren, wie eine nicht sphärische Partikelgeometrie, die dem Stokes'schen Gesetz als Voraussetzung zu Grunde liegt, die Konzentration in der Suspension, nicht laminare Fließbedingungen, Brownsche Bewegung der Teilchen, Porosität der Partikel, Temperaturänderung durch Heizwirkung des Röntgenstrahles, die Reynolds-Zahl beeinflussen die Messung in unterschiedlichem Maße. Sie können durch Parametereingabe bei der Berechnung der Korngrößenverteilung mit der Steuerungssoftware des Gerätes berücksichtigt werden. Es ist eine Messung im Bereich zwischen 0,1 und 300  $\mu\text{m}$  möglich.

Die Absorption von Röntgenstrahlen ist nur von der Masse des absorbierenden Materials abhängig. Streuung, Brechung und Beugung spielen anders als bei Strahlen im bzw. nah am Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts keine Rolle. Damit ist die Absorption der Röntgenstrahlung von der Partikelgröße unabhängig.

Wenn I die Intensität des Röntgenstrahls ist, kann die Veränderung der Intensität über die Durchgangsentfernung x durch ein absorbierendes Medium mit der Dichte  $\rho$  als

$$(36) \quad -dI/I = (\mu / \rho) \cdot \rho \, dx$$

geschrieben werden, wobei  $\mu$  die lineare Massenabsorptionskoeffizient ist. Durch Integration dieser Gleichung erhält man

$$(37) \quad I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

Dabei ist  $I_0$  die Ausgangsintensität des Röntgenstrahls. Der Absorptionskoeffizient  $\mu/\rho$  hängt von der Atomzahl Z des absorbierenden Stoffes und der Wellenlänge  $\lambda$  ab:

$$(38) \quad \mu / \rho = c \cdot Z^3 \cdot \lambda^{5/2}$$

Das Gerät (MICROSCAN II Quantachrome ®) arbeitet in einem Energiebereich zwischen 12,5 und 15,0 kV. Aus der Intensität des Röntgenstrahls zu unterschiedlichen Zeiten kann die Veränderung der Suspensionsdichte berechnet und bei bekannter Korndichte des Feststoffanteils dessen Massenanteil bestimmt werden. Diese Berechnung erfolgt intern durch die Steuerungssoftware des Gerätes.

Die Probe muss vor der Messung vollständig dispergiert werden, dafür ist der Einsatz von Ultraschall und gegebenenfalls eines Antikoagulanz (Natriumpyrophosphat  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ ) erforderlich.

## 6.5 Direkter Scherversuch im Rahmenschergerät

Die Scherfestigkeit wurde im direkten Scherversuch in Anlehnung an DIN 18137-3 (2002) unter verschiedenen Randbedingungen bestimmt. Es wurde teilweise der Versuchsaufbau ohne Parallelführung des Stempels, später der Versuchsaufbau mit Parallelführung des Stempels, verwendet. Es war Ziel der Versuche, den unterschiedlichen Einfluss der Wasser-Feststoff-Wechselwirkung verschieden auf die Festigkeit der Tone zu quantifizieren. Dafür soll der Zusammenhang zwischen herrschender Saugspannung im teilgesättigten Porenraum und der Festigkeit untersucht werden.

Im direkten Scherversuch bleibt die Normalspannung über den Versuch konstant und die Scherbeanspruchung wird durch einen mechanischen Vorschub erzeugt. Um die Anteile von Reibungsfestigkeit und Haftfestigkeit zu trennen, sind mehrere Teilversuche mit unterschiedlichen Normalspannungen erforderlich. Unter der Voraussetzung, dass die Beanspruchung und das Abscheren in der erzwungenen Gleitfläche stattfinden und die Scherkraft über diese Fläche gleichmäßig verteilt ist, kann die Scherspannung berechnet werden. Deshalb sollte die Probenhöhe möglichst gering sein, da sonst statt einer definierten Scherfuge auch ein bloßes Verformen der Probe möglich wäre.

Es können sich Porenwasserdrücke auf Grund der aufgebrachten Normalspannung oder infolge der Zunahme der Spannungen beim Abscheren aufbauen. Es wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass diese sich durch genügend langsames Abscheren abbauen können (siehe 6.5.1). Bei normal konsolidierten Tönen nimmt im drainierten Versuch das Porenvolumen ab bzw. im undrainierten Versuch der Porenwasserdruck zu. Die Scherverschiebungslinien unterscheiden sich jedoch kaum voneinander (SCHULTZE & MUHS 1967). Bei vorbelastetem Ton nimmt beim drainierten Versuch auf Grund der Dilatanz das Volumen zu. Entsprechend entstehen beim undrainierten Versuch negative Porenwasserdrücke. Die Scherfestigkeit ist deshalb wegen Zugspannungen im Porenwasser, die sich als Druckspannungen auf den Boden auswirken, größer als im drainierten Versuch (SCHULTZE & MUHS 1967). Im direkten Scherversuch lassen sich Porenwasserdrücke jedoch nicht bestimmen.

Die innere Reibung bewirkt, dass für jede beliebige Schnittebene (im Falle des direkten Scherversuchs in der erzwungenen Scherfuge) das Verhältnis von Schub- und Normalspannung beschränkt ist:

$$(39) \quad \tau / \sigma_n \leq \tan \varphi'$$

Das Spannungsverhältnis kann anhand Mohrscher Spannungskreise dargestellt werden.

Der Bruch tritt ein, wenn

$$(40) \quad \tau = c' + \sigma_n \tan \varphi'$$

erfüllt ist. Unter Bruch ist zu verstehen, dass das Material nicht in der Lage ist, eine weitere Steigerung der Schubspannung aufzunehmen. Es erfolgt dann entweder Deformation (nur im triaxialen Scherversuch) oder die Ausbildung einer Gleitfuge.

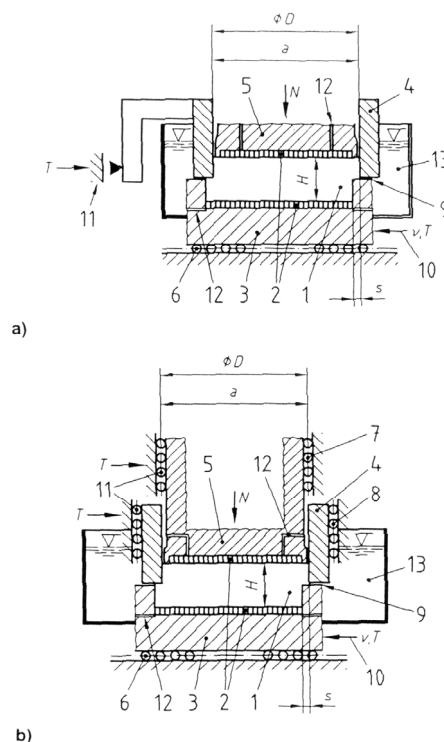
Bei Stoffen mit ausschließlich innerer Reibung resultiert die Scherfestigkeit jeweils aus der Normalspannung. Einige Stoffe besitzen eine Scherfestigkeit, die von der Normalspannung unabhängig ist. Diese Kohäsion beruht in Böden im Wesentlichen auf der Kapillarität. Bei unvollständiger Sättigung stellen sich Wassermenisken in den Porenwickeln ein. Durch die Oberflächenspannung werden die Körner gegeneinander gepresst. Diese Kapillarkohäsion geht bei vollständiger Wassersättigung verloren. Des Weiteren können elektrochemische Anziehungskräfte zwischen Tonpartikeln sowie Zemente einen Kohäsionsanteil an der Scherfestigkeit bewirken, der von der Normalspannung unabhängig ist. Die Kohäsion wird stark vom Verdichtungsgrad und dem Chemismus des Porenwassers (HVORSLEV 1960) beeinflusst.

Der Einfluss des Porenwassers, aber auch der Porenluft, darf bei der Ermittlung der Scherfestigkeit nicht vernachlässigt werden. Es gilt das Prinzip der effektiven Spannungen (BISHOP 1959 aus TERZAGHI 1956):

$$(41) \quad \sigma' = \sigma - p_l + \chi \cdot (p_l - p_w)$$

Dabei sind  $\sigma'$  die wirksame Spannung,  $\sigma$  die Gesamtspannung,  $p_l$  der Porenluftdruck,  $p_w$  der Porenwasserdruck und  $\chi$  ein vom Sättigungsgrad und der Bodenart etc. abhängiger Parameter (BJERRUM 1959). Für gesättigte Böden ist  $\chi = 1$  für vollständig trockene Böden gilt  $\chi = 0$ .

Hauptfehlermöglichkeiten sind Ungenauigkeiten, die darauf beruhen, dass der Spannungszustand während des Versuchs nicht vollständig bekannt ist, weil Messungen des Porenwasser- und Porenluftdrucks sowie des Seitendrucks auf die Wandung fehlen. Außerdem entsprechen die Randbedingungen für die Bewegung nicht immer denen in der Natur (SCHULTZE & MUHS 1967), da der Probe ein Versagen in einer vorgegebenen Scherfuge aufgezwungen wird.



**Abbildung 22** Längsschnitt durch das Rahmenschergerät a) Gerät mit verschiebbarem unteren Rahmen und ohne Parallelführung des oberen Rahmens und des Normalbelastungsstempels; b) Gerät mit verschiebbarem unteren Rahmen und Parallelführung des oberen Rahmens und des Normalbelastungsstempels. 1) Probekörper, 2) Filterplatten, 3) unterer Rahmen – horizontal parallel geführt, 4) oberer Rahmen, 5) Stempel für Normalbelastung  $N$ , Lagerplatte mit Horizontalführung des unteren Rahmens, 7) senkrechte Parallelführung des Stempels für Normalbelastung, 8) senkrechte Parallelführung des oberen Rahmens, 9) vertikal einstellbarer Spalt, 10) Einleitung des Vorschubs und der Scherkraft  $T$ , 11) Widerlager für die Scherkraft  $T$  am oberen Rahmen (und bei b) am oberen Stempel), 12) Drainagebohrungen, 13) Wasserkasten. (aus DIN 18137-3)

### 6.5.1 EINFLUSS DER VORSCHUBGESCHWINDIGKEIT AUF DIE SCHERFESTKEIT BINDIGER BÖDEN

Es wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass bei zu schneller Durchführung des direkten Scherversuches an bindigen Böden, sich an der Scherfuge aufbauende Porenwasserdrücke wesentlichen Einfluss auf die letztlich ermittelten Scherparameter haben. Anhand eines wenig überkonsolidierten Tones wurde unter verschiedenen Versuchsbedingungen untersucht, inwiefern diese Gesetzmäßigkeiten gleichermaßen für überkonsolidierte Tone gelten. Die Ergebnisse von solch einem relativ gering



überkonsolidierten Ton auf stärker inhomogenes und höher konsolidiertes Material sind nur bedingt übertragbar. Es gilt zu berücksichtigen, dass die Festigkeit der verwitterten Tonsteine nicht allein vom Verhalten der replastifizierten bindigen Matrix abhängen, sondern von den Eigenschaften der diagenetisch geprägten Tonsteinbröckchen mitbestimmt sind.

Um den Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit, aber auch den sonstigen Rahmenbedingungen des direkten Scherversuches, auf die ermittelten Reibungswinkel und Kohäsion bindiger Böden zu erfassen, wurde ein leicht überkonsolidierter, leicht plastischer, hellgrauer, schluffiger schwach sandiger Ton unter variierenden Bedingungen untersucht. Die Proben wurden gestört und ungestört in einer auflässigen Tongrube am Westrand von Halle / Saale in einem mächtigen homogenen Tonhorizont tertiären Alters gewonnen. Der Einbau in den Scherversuch erfolgte entweder gestört homogenisiert mit möglichst gleicher Dichte oder durch das Ausstechen ungestörter Probekörper.

Nach DIN 18137-3 kann die zulässige Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$  entweder aus dem Scherweg  $s_f$  und der erforderlichen Konsolidationszeit  $t_{kon}$

$$(42) \quad v_f = s_f / (12 \cdot t_{kon})$$

abgeschätzt oder in Abhängigkeit von der Plastizitätszahl (siehe Tabelle 4) angenommen werden.

**Tabelle 4** Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$  in Abhängigkeit von der Plastizitätszahl  $I_p$ .

$I_p$ [%]	$v_f$ [mm/min]
bis 25	0,040
25 bis 40	0,008
über 40	0,002

Der Scherweg beträgt bei dem verwendeten Rahmenschergerät 20 mm, die Konsolidierung konnte einheitlich jeweils mit dem in der DIN 18137-3 (2002) angegebenen Minimum von 30 min durchgeführt werden, so dass sich aus (42) eine Geschwindigkeit von 0,056 mm/min ergibt.

Die Plastizitätseigenschaften des Tons wurden nach DIN 18122 (2000) bestimmt (siehe Tabelle 5). Es resultiert eine Plastizitätszahl  $I_p$  von 20,2 %, womit nach der vorgeschlagenen Klassifizierung eine Vorschubgeschwindigkeit von 0,04 mm pro Minute gerechtfertigt wäre. Für diese Studie wurden 0,002 / 0,005 / 0,010 / 0,015 / 0,03 / 0,05 / 0,07 / 0,09 / 0,11 / 0,13 / 0,15 mm/min als Vorschubgeschwindigkeiten gewählt.

**Tabelle 5** Plastizitätseigenschaften, Wassergehalt und Konsistenzzahl des Tertiärtons (Mittelwert aus vier Teilproben).

$w$ [%]	25,7
$w_L$ [%]	45,5
$w_P$ [%]	25,4
$I_p$ [%]	20,2
$I_c$	0,96

Es wurden mehrere Versuchsreihen unter veränderten Randbedingungen durchgeführt (siehe Tabelle 6). Abweichend von DIN 18137-3 (2002) wurden die Versuche teilweise an Proben mit natürlichem Wassergehalt ohne nachträgliche Flutung und mit künstlich erzeugtem Wassergehalt nahe der Fließgrenze durchgeführt. Zur Bestimmung der effektiven Scherparameter wurden die Proben nach Aufbringen der Normalspannung zur Konsolidation geflutet. Die Einzelproben wurden jeweils mit der Normalspannung konsolidiert, unter der sie später abgeschert wurden.

Wenn mit Kohäsion zu rechnen ist, dürfen laut DIN 18137-3 (2002) die Normalspannungen nicht zu dicht zusammen liegen, da sonst der Einfluss von Streuungen bei der Ermittlung der effektiven Scherparameter zu hoch ist. Um die Einflüsse der Vorschubgeschwindigkeit

vor allem im kritischen Bereich zu überprüfen, wurden teilweise extrem geringe – in der Praxis wohl eher selten auftretende Überlagerungsspannungen gewählt. Bei niedrigen Normalspannungen ist der Einfluss von Probenstörungen und Gerätereibung besonders hoch, weshalb in den Reihen D, H, F und S (Tabelle 6) höhere Überlagerungsspannungen angewendet wurden.

Um Verkippen zu vermeiden, wird empfohlen, den oberen Rahmen und den Stempel parallel senkrecht zur Scherebene zu führen. Die Scherkraft  $T$  verteilt sich auf die beiden Führungen (7 und 8 in Abbildung 22). Der untere Rahmen ist horizontal verschiebbar und die Führungen mit der Platte starr verbunden. Welchen Effekt diese Änderung des Versuchsaufbaus nach sich zieht, soll ein Vergleich der Reihen B und E zeigen (Tabelle 6). Des Weiteren gibt es einzelne Vergleichsversuche mit höheren Auflasten und unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten.

**Tabelle 6** Randbedingungen der Versuchsreihen im Rahmenschergerät.

Reihe	Auflasten	Konsolidierung	Vorschubgeschwindigkeiten	Wasserbedeckung	Bemerkung
<b>A</b>	3 / 6 / 12 kN/m <sup>2</sup>	30 min	0,015 / 0,03 / 0,05 / 0,07 / 0,09 / 0,11 / 0,13 / 0,15 mm/min	geflutet	
<b>B</b>	3 / 6 / 12 kN/m <sup>2</sup>	30 min	0,03 / 0,07 / 0,15 mm/min	trocken	
<b>C</b>	3 / 6 / 12 kN/m <sup>2</sup>	30 min	0,03 / 0,07 / 0,15 mm/min	geflutet	mit Schmiermittel
<b>D</b>	10 / 25 / 50 / 100 / 200 kN/m <sup>2</sup>	30 min	0,002 / 0,005 / 0,010 / 0,015 / 0,03 / 0,05 / 0,07 / 0,09 / 0,11 / 0,13 / 0,15 mm/min	geflutet	
<b>E</b>	3 / 6 / 12 kN/m <sup>2</sup>	30 min	0,07 / 0,15 mm/min	trocken	ohne Führung von oberem Rahmen und Stempel
<b>F</b>	10 / 25 / 50 / 100 / 200 kN/m <sup>2</sup>	30 min	0,015 / 0,03 / 0,07 / 0,15 mm/min	geflutet	Wassergehalt nahe der Fließgrenze
<b>G</b>	3 / 6 / 12 kN/m <sup>2</sup>	30 min	0,015 / 0,03 / 0,07 / 0,15 mm/min	geflutet	Wassergehalt nahe der Fließgrenze
<b>H</b>	10 / 25 / 50 / 100 / 200 kN/m <sup>2</sup>	30 min	0,002 / 0,005 / 0,010 / 0,015 / 0,03 / 0,05 / 0,07 / 0,09 / 0,11 / 0,13 / 0,15 mm/min	trocken	
<b>S</b>	10 / 25 / 50 / 100 / 200 kN/m <sup>2</sup>	30 min	0,030 / 0,150 mm/min	trocken / geflutet	Wiederholungen zur statistischen Überprüfung der Reproduzierbarkeit

### 6.5.2 EINFLUSS DER WASSERVERHÄLTNISSSE AUF DIE SCHERFESTIGKEIT HALBFESTER TONSTEINE

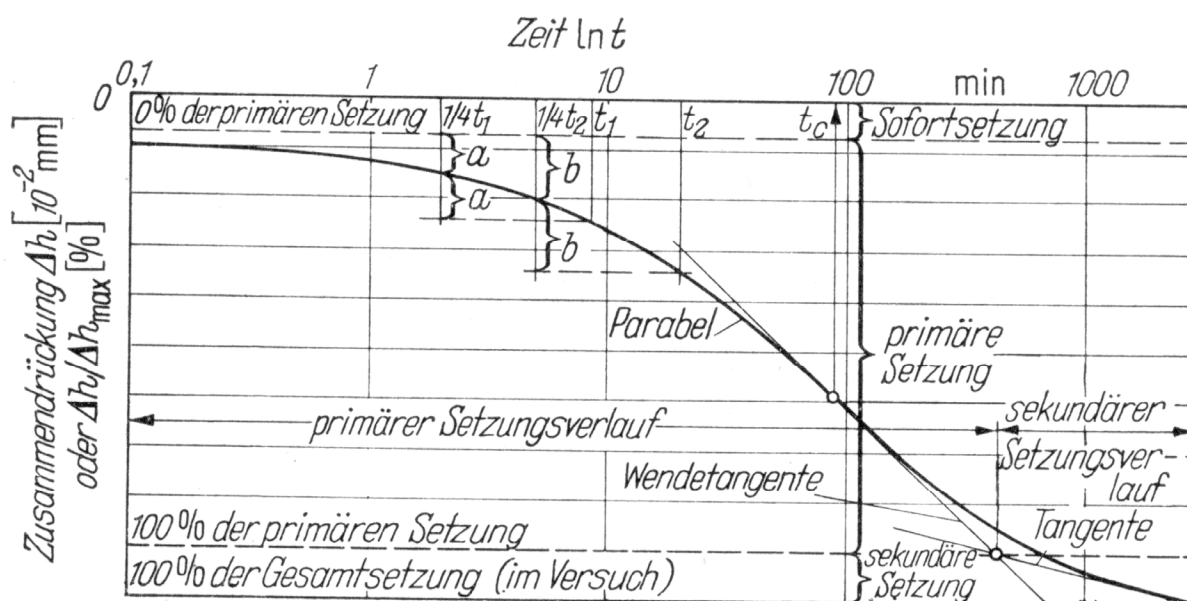
An Proben der Verwitterungstypen 2 bis 4 sowie an dem homogenisierten Referenzton wurden direkte Scherversuche unter verschiedenen Wasserverhältnissen durchgeführt. Die Versuche erfolgten mit luftgetrockneten Proben und Proben mit natürlichem Wassergehalt im trockenen Versuchsaufbau, sowie bei höheren Wassergehalten unter Wasserbedeckung. Neben der Scherfestigkeit wurde außerdem die Aggregatzerkleinerung während des Schervorgangs durch Siebung nach vorsichtigem Trocknen bestimmt. Durch Regression der Saugspannungskurve konnten die bei Versuchsende herrschenden Saugspannungen berechnet werden. Um Aufschluss über deren Entwicklung während des Scherversuches zu erhalten, wurden Versuche am Referenzton durchgeführt, bei denen der Scherweg unter sonst gleichen Randbedingungen schrittweise verlängert wurde und die jeweiligen Wassergehalte bzw. Sättigungsgrade bestimmt wurden.

### 6.6 Kriechversuche

Neben der Scherfestigkeit ist auch das zeitabhängige Probenverhalten von ingenieurgeologischer Bedeutung. Die Veränderung des Spannungszustandes eines Fest- oder Lockergesteins kann zu bruchlosen oder von Brüchen begleiteten Deformationen führen. Deformationen können elastisch, plastisch, duktil oder spröde verlaufen. Die

„Festigkeit“ eines Bodens oder Felsgesteins ist der Widerstand gegen die bruchlose oder zum Bruch führende Deformation. Die Zusammendrückbarkeit eines Bodens ist eine nichtlineare Kenngröße und für verschiedene Belastungsstufen unterschiedlich. Sie wird im Kompressions-Durchlässigkeits-Versuch für verschiedene Laststufen bei unterschiedlichen Versuchsanordnungen ermittelt. Üblicherweise wird der Versuch mit verhinderter Seitenausdehnung durchgeführt. Eine einheitliche Regelung existierte bislang für diesen Versuch nicht. Jedoch wird in neuerer Zeit mit dem Norm-Entwurf DIN 18135, (1999) und der Vornorm DIN ISO/TS 17892-5 (2005) eine einheitliche Regelung angestrebt.

Zur Versuchsdurchführung werden möglichst ungestörte Proben im Stechzylinder mit Durchmessern von 95 mm und Höhen von 55-120 mm verwendet. Die Ergebnisse sind nur bei einem großen Verhältnis  $d / h$  von Reibung an der Probenwandung unabhängig. Man unterteilt in Sofortsetzung, Primärsetzung und Sekundärsetzung. Für den primären Setzungsanteil gilt die Konsolidationstheorie. Die sekundäre Setzung wird als plastisches Nachfließen verstanden, welches durch Umlagerungsprozesse durch Gleiten von Tonpartikeln aneinander und dem Aufbrechen von Kornbindungen entsteht.



**Abbildung 23** Ermittlung des Anteils von primärer und sekundärer Setzung aus dem Zeit-Setzungs-Diagramm (aus SCHULTZE & MUHS 1967).

Den Endzeitpunkt der primären Setzung erhält man durch die Bildung des Schnittpunktes der Tangente an den Wendepunkt des s-förmigen Teils der Zeit-Setzungs-Linie und der linearen Steigung der Sekundärsetzung (Abbildung 23). Als Kennwerte der Verformbarkeit erhält man die auf die Ausgangshöhe bezogene Setzung und das Steifemodell (Tabelle 7).

Die verwendete manuelle hydraulische Prüfpresse ist in Abbildung 24 dargestellt. Die Stechzylinder wurden gegebenenfalls auf die erforderliche Länge gekürzt. Die planparallelen Endflächen der Probe wurden teilweise mit Hilfe einer Drehbank erzeugt. Die Lastaufbringung erfolgte manuell mit Hilfe einer hydraulischen Handpumpe. Mit Stickstoff gefüllte Gasspeicher puffern Druckschwankungen durch hohe Setzungsbeträge weitestgehend ab. Da eine Austrocknung der Probe ohne eine Wasserlagerung der Proben bei so langen Versuchszeiten nicht zu verhindern war, wurden die Proben im Versuchsstand mit Folie verhüllt, um einen kleinen Raum mit relativ hoher Luftfeuchte zu erhalten, der die Austrocknung zu verringerte. Der Raum, in dem die Prüfpresse aufgestellt war, war auf 20 °C temperiert. Betriebsbedingte Temperaturschwankungen beliefen sich auf +/- 3 K, der Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchte wurde während der Versuchsdauer mit einem Klimaschreiber aufgezeichnet. Der aus den Temperaturschwankungen resultierende Messfehler ist vernachlässigbar. Wie Versuche im Klimaschrank zeigten, sind die

temperaturbedingten Volumenänderungen von Probe und Messvorrichtung zumindest ohne eine zusätzliche vertikale Belastung unterhalb der Messgenauigkeit der Wegmesseinrichtung.

**Tabelle 7** Kennwerte der Verformbarkeit ( $\Delta h$  – Höhenänderung,  $h_a$  – Ausgangsprobenhöhe,  $\Delta P$  – Spannungsänderung):

Bezogene Setzung	$s' = \Delta h / h_a$	[m]
Steifemodul	$E_s = \Delta P / \Delta s'$	[kN/m <sup>2</sup> ]



**Abbildung 24** Verwendete manuelle hydraulische Kriechpresse.

## 6.7 Quell- und Schrumpfverhalten

Durch Wasseraufnahme können Tone und Tonsteine quellen oder bei behinderter Volumenausdehnung Quelldrücke aufbauen. Das Quellpotential eines Gesteins oder Bodens hängt von der Materialzusammensetzung, aber auch den Randbedingungen ab. Es wird vor allem durch Saugspannungswirkungen (negative Porenwasserdrücke), Salinität und pH-Wert des Porenwassers und nicht zuletzt die Verfügbarkeit von Wasser beeinflusst.

**Tabelle 8** Theoretische maximale Quelldrücke und Verformungen bei physikalischen Quellvorgängen ( nach PIMENTEL 2003)

Art der Wasseraufnahme	Materialverhalten	Quellmechanismus	$\sigma_{\max}$ [MPa]	$\epsilon_{\max}$ [%]
	fest	intrakristallin	100	100
adsorbiert	diffuse Schicht	osmotisch	10	20
frei	flüssig	mechanisch	<<1	<1

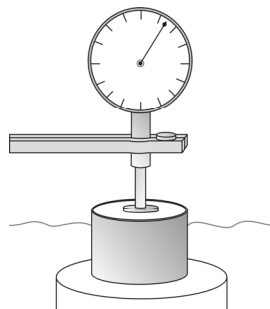
Man kann physikalisch und chemisch induzierte Quellvorgänge unterscheiden. Unter physikalischen Quellvorgängen versteht man die Anlagerung von Wasser intrakristallin in quellfähigen Tonmineralen, adsorbiert als diffuse Wasserschicht an der Kornoberfläche oder frei im Porenraum. Die intrakristalline Quellung ist in der Regel vor der Diagenese abgeschlossen und lässt sich nur durch sehr hohe Temperaturen rückgängig machen (PIMENTEL 1996), die erst bei der Gesteinsmetamorphose realisiert werden. Sie spielt bei geotechnischen Fragestellungen daher eine untergeordnete Rolle, sofern es durch die Verwitterung nicht zu Tonmineralneubildung kommt. In Abhängigkeit von Temperatur und Verwitterungsgrad kann ein Teil der zentralen Kationen mit niedriger geladenen ausgetauscht werden, so dass der Tonpartikel ein positives Ladungsdefizit erhält. Gleichzeitig hat die Oberfläche wegen des typischen Schichtaufbaus eine negative Ladung, was die Anlagerung von Kationen und Wassermolekülen erleichtert. Die Wasserdipolmoleküle lagern sich orientiert an, so dass jede aufgenommene Schicht nach außen negativ geladen ist. Mit jeder aufgenommenen Schicht nimmt die Ladungsdichte nach außen hin ab. Man kann drei Zonen unterscheiden. Das intrakristallin angelagerte Wasser

hat eine hohe Dichte und verhält sich gelartig. In der diffusen Zone ist die Dichte von der Entfernung von der Partikeloberfläche abhängig. Freies Wasser füllt den verbliebenen Porenraum, wenn zum Beispiel durch eine Entlastung negative Porenwasserdrücke entstehen. Die damit verbundene Volumenzunahme wird als mechanisches Quellen (ISRM 1994) bezeichnet. Die Bindungsenergie und das Verhalten des Wassers in den verschiedenen Zonen sind unterschiedlich, weshalb auch zwischen intra-kristallinem, osmotischen und mechanischen Quellvorgängen unterschieden werden kann. In Tabelle 8 sind die maximal zu erwartenden Verformungen und Quelldrücke für diese drei Mechanismen angegeben. Die beim intrakristallinen und osmotischen Quellen auftretenden Kräfte können diagenetische Bindungen aufbrechen, der Einfluss des mechanischen Quellens wird als vernachlässigbar angesehen. Mögliche chemische Quellvorgänge sind die Umwandlung von Anhydrit in Gips bzw. die Volumenvergrößerung bei der Oxidation von Pyrit.

In den meisten Fällen wird sich ein Tonstein vor einer Baumaßnahme im Equilibrium befinden, d.h. wassergesättigt und mit Porenwasserdrücken entsprechend der Überlagerung sein. Man kann beim Quellvorgang 3 Phasen unterscheiden. Phase 1: Es herrscht ein sehr hoher Quelldruck, der zu relativ wenig Verformung und keinen mikrostrukturellen Veränderungen führt. Phase 2: Bei hohen Quelldrücken kommt es zu Deformation und mikrostrukturellen Veränderungen. Phase 3: Es erfolgt der Abbau des Quelldruckes durch Deformation (PIMENTEL 2003). Je nach Mechanismus und Material kann der Quellvorgang Monate bis Dekaden in Anspruch nehmen

Es konnte bisher kein eindeutiger, direkter Zusammenhang zwischen Diagenese, Verwitterungsgrad und Quellfähigkeit gefunden werden (v. WOLFFERSDORFF & FRITZSCHE 2003), aber ein höherer Verwitterungsgrad bewirkt höhere Quellraten bei Entlastung sowie geringere Quelldrücke und einen beschleunigten Quellvorgang. Mit der Volumenzunahme bzw. den entstehenden Zwängungsspannungen bei Dehnungsbehinderung kann ein Rückgang der Festigkeit und Steifigkeit verbunden sein. Diese Festigkeitsabnahme erfolgt nach PIMENTEL (1996) nahezu linear proportional zum Wassergehalt. Er weist jedoch ausdrücklich darauf hin, dass die von ihm gemachten Aussagen, nicht für zerfallsanfällige Tonsteine gelten, da diese ihren Charakter als Festgestein verlieren.

Es gibt verschiedene Versuchseinrichtungen für die Bestimmung der Quellfähigkeit, wie kombinierte Quelldruck-Quellhebungstests, Mehrschritt-Quellhebungstests und den Huder-Amberg-Test. Für die Auswertung der verschiedenen Versuchsanordnungen wird gleichermaßen ein 1D-Quellmodell (GROB 1972) herangezogen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden lediglich Freiquellversuche (und Schrumpfversuche) durchgeführt, bei denen ausschließlich die Volumenänderung ohne Lastaufbringung gemessen wurde. Die Versuchsanordnung lehnte sich leicht abgewandelt an die DGEG-Empfehlung (1986) für Quellhebungsversuche an. Die Proben befanden sich in einem Metallring, um seitliche Dehnung zu verhindern und den Zerfall durch Wasserlagerung einzuschränken. Eine zusätzliche Auflast wurde nicht aufgebracht (Abbildung 25).



**Abbildung 25** Skizze der Versuchsanordnung in den Quell-Schrumpf-Versuchen.

Es handelt sich bei allen vier Proben, die für die Quellversuche verwendet wurden, um Röt-Material, das mittels Ausstechringen von 5,6 cm Durchmesser und 4 cm Höhe aus einem

Probennahmezylinder entnommen wurde. Der Einbau erfolgte auf drei unterschiedliche Weisen: w105 bedeutet, die Probe wurde vor dem Quellen bei 105 °C bis zur Massekonstanz getrocknet. Analog dazu bedeutet w40, dass die entsprechende Probe bei 40 °C bis zu Massekonstanz getrocknet wurde. Die beiden Proben wnat wurden mit ihrem natürlichen Wassergehalt als Ausgang dem ersten Quellversuch unterzogen. Dieselben Proben wurden nach der ersten Quellung einem Schrumpfversuch unter Raumtemperaturbedingungen ausgesetzt, nach dessen Ablauf die zweite Quellung erfolgte.

## **6.8 Wasserrückhaltevermögen**

Die Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens ermöglicht die direkte Messung einer Saugspannungskurve. Es wird ein Druck (hier Luftdruck) aufgebracht, dem entsprechend sich ein Gleichgewichtswassergehalt im Porenraum einstellt. Umgekehrt entspricht einem bestimmten Wassergehalt eine bestimmte Saugspannung, deren Höhe Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften des Tons hat. Die Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens ist in der DIN 19683-5 (1973) und DIN-ISO 11274 (2001) geregelt. Mit der verwendeten Druckmembranzelle ist die Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens des Bodens unter definierten Druckbedingungen in einem Bereich von 10 bis 1550 kN/m<sup>2</sup> möglich. In Abbildung 26 ist der Aufbau des Gerätes dargestellt.

Die Saugspannung wird in der Regel als pF – Wert mit dem zugehörigen Wassergehalt angegeben. Ist die Saugspannung eines Bodens bekannt, können Feld- und Luftkapazität und andere pflanzenphysiologische Bodeneigenschaften daraus abgeleitet werden, was vor allem in der Land- und Forstwirtschaft von Bedeutung ist. Unter ingenieurgeologischen Gesichtspunkten sind die aus der Saugspannung möglichen Rückschlüsse auf die Porengrößenverteilung und das Quell- und Schrumpfungsverhalten von Tonböden bzw. der Zusammenhang zwischen Wasserrückhaltevermögen und dem Gefrierverhalten eines Bodens bedeutend (JESSBERGER 1971). Aus Saugspannungsuntersuchungen ist auch die indirekte Ermittlung der ungesättigten Wasserleitfähigkeit eines Bodens möglich (WALZENBACH 1991). Die ungesättigte Leitfähigkeit wird von der Saugspannung beeinflusst, da durch das herrschende Matrixpotential der Sättigungsgrad des Porenraumes und damit der zur Verfügung stehende Fließquerschnitt bestimmt wird. Die rechnerische bzw. grafische Ermittlung der Wasserleitfähigkeit aus Saugspannungsversuchen wird ausführlich bei KIRKHAM & POWERS (1972) beschrieben. Im Rahmen dieser Arbeit soll insbesondere auf den Zusammenhang zwischen im Porenraum herrschenden Saugspannungen und dem Verwitterungsverhalten sowie der Scherfestigkeit eingegangen werden (siehe Kap. 8).

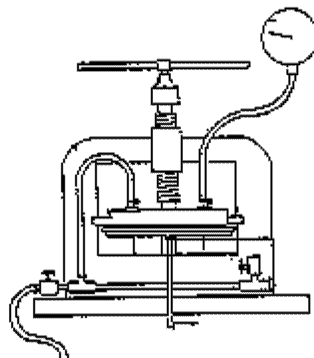
In Böden vorhandenes Wasser kann in freibewegliches Sickerwasser und an die festen Bodenpartikel gebundenes Haftwasser unterschieden werden. Das Haftwasser ist verschieden stark an die Bodenmatrix gebunden, so werden die Bindungskräfte für Kapillarwasser nur mit ca. 20 bis 1500 kN/m<sup>2</sup> und für Adsorptionswasser mit ca. 245000 bis 590000 kN/m<sup>2</sup> angegeben (WALZENBACH 1991). Die Wasserbindungsintensität kann als Arbeit ausgedrückt werden, die verrichtet werden muss, um dem Boden eine bestimmte Wassermenge zu entziehen. Diese Wasserbindungsintensität wird auch als Wasserspannung bzw. Saugspannung bezeichnet (SCHOFIELD 1935). Die Saugspannung eines Bodens ist gleich Null, wenn dieser vollständig gesättigt ist. Als Potentialkonzept (SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL 1984) bezeichnet man die Summe aller für die Bewegung des Wassers im Boden verantwortlichen Kräfte. Der Einfluss des Bodens wird durch das Matrixpotential dargestellt, welches von der Größe der adsorptionsfähigen Oberflächen, der Porendurchmesser und der Korngrößenverteilung abhängig ist. Durch eine Änderung der Lagerungsdichte, auch durch Quellen oder Schrumpfen, wird das Matrixpotential verändert (siehe Kap. 4.6).

Geht man davon aus, dass keine Wasserbewegung im Boden stattfindet, also Matrixpotential und Gravitationspotential gleich groß sind, so ist die Saugspannung eines Bodens um so größer, je größer die Entfernung von der Grundwasseroberfläche ist. Daraus ergibt sich auch der Einfluss der Höhe der verwendeten Proben, da sich in der Probe eine

Wassersäule einstellt, die den Messwert beeinflusst. Demnach müsste mit einer theoretischen Probenhöhe von Null gearbeitet werden. Man kann diesen Fehler jedoch bei  $p_F > 1,5$  angesichts der Versuchsgenauigkeit nahezu vernachlässigen, da er in diesen Größenordnungen nur gering zum Tragen kommt (SCHLICHTING et al. 1995).

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in der Regel in einem Diagramm, in dem die Wassergehalte gegen die  $p_F$  – Werte abgetragen werden. Je flacher der Verlauf der  $p_F$  – Kurve ist, um so bindiger und wasserrückhaltender ist der Boden (WALZENBACH 1991).

Es kommt eine spezielle Cellulose-Acetat-Membranfolie zum Einsatz, die wasserdurchlässig aber luftdicht ist. Mit Hilfe eines Druckminderers wird im Überdruckverfahren die Druckluft auf Messdruck geregelt. Unabhängig davon, ob mit gestörten oder ungestörten Proben gearbeitet wird, ist die vollständige Sättigung des Materials zu Versuchsbeginn wichtig. Idealerweise sollten feldfrische Proben verwendet werden, da ausgetrocknete Bodenproben aufgrund von Hydrophobie- bzw. Hystereseerscheinungen ein verändertes Wasserrückhaltevermögen haben können. Des Weiteren ist jede Beanspruchung der Proben zu vermeiden, die das Gefüge oder den Porenraum des Materials verändern kann. Die Saugspannungskurve wird durch stufenweises Erhöhen des Druckes ermittelt und jeweils der entsprechende Gleichgewichtswassergehalt bestimmt. Zur Sättigung werden die Proben in eine Wanne gestellt, die bis auf halbe Höhe der Probenringe mit Wasser gefüllt ist. Die Sättigungsdauer für die erdfeuchten Proben lag in der Regel zwischen ein und zwei Wochen. Auf das Anlegen eines Vakuums, um die Sättigung der Tonsteine zu beschleunigen, wurde verzichtet, um Gefügestörungen durch schnell entweichende Luft zu vermeiden.



**Abbildung 26** Skizze des Druckmembrangerätes.

Berechnung des Wassergehaltes für eine bestimmte Saugspannung erfolgt nach DIN-ISO 11274:

$$(43) \quad w(pm) = \{ m(pm) - m_d \} / m_d \cdot 100 \%$$

Dabei sind  $w(pm)$  der Wassergehalt auf Grundlage der Masse bei einem Matrixpotential  $p_m$  [g],  $m(pm)$  die Masse der Bodenprobe bei einem Matrixpotential  $p_m$  [g],  $m_d$  die Masse der ofentrockenen Bodenprobe [g]. Diese Berechnung ist zulässig, wenn der Anteil mit  $d \geq 2$  mm weniger als 20 % beträgt. Da die Tonsteinaggregate aus kleineren Partikeln bestehen, aber der interne Porenraum größerer Aggregate einen erheblichen Anteil haben dürfte, wurde diese Formel dennoch für alle Proben eingesetzt.

Da Wasser eine Dichte um  $1 \text{ g/cm}^3$  hat, kann aus der Wassermenge, die eine Probe unter definierten Saugspannungen enthält, auf das Porenvolumen geschlossen werden. Das so ermittelte Porenvolumen entspricht nicht dem Gesamtporenvolumen, es repräsentiert einen Bereich eines oberen und eines unteren Grenzdurchmessers (SCHLICHTING et al. 1995). Unter der Annahme, dass alle Poren gleich groß und kugelig sind, kann ein Äquivalentdurchmesser errechnet werden, für den das ermittelte Wasserrückhaltevermögen typisch ist. Die Berechnung erfolgt nach der Formel:

$$(44) \quad d_p = 0,3 / p$$

Dabei sind  $d_p$  der Porendurchmesser [cm] und  $p$  die Saugspannung [mbar = cm WS].

Besonders kritisch ist der plane Kontakt der Probe mit der Membran. Diese Bedingung ist im Falle von Tonsteinproben aus verschiedenen großen Aggregaten nicht immer zu erfüllen. Es wurde versucht dem durch entsprechend längere Versuchszeiten bis zum Gleichgewichtswassergehalt Rechnung zu tragen.

## 6.9 Konsistenzgrenzen

Die Bestimmung der Atterbergschen Konsistenzgrenzen nach DIN 18122 erfasst die Zustandsänderung eines bindigen Bodens bei abnehmendem Wassergehalt von der breiigen zur plastischen Form (Fließgrenze), von der plastischen zur halbfesten Form (Ausrollgrenze) und von der halbfesten zur festen Form (Schrumpfgrenze). Der Versuch liefert die Kenndaten für die Einteilung der bindigen Böden bei der Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke nach DIN 18196 und wurde durchgeführt, um zu überprüfen, ob diese in der geotechnischen Praxis oft eingesetzte Klassifikationsmethode für die stark überkonsolidierten Tone überhaupt sinnvoll ist.

Die Bestimmung der Konsistenzgrenzen der überkonsolidierten Tonsteine war erst nach gründlicher Probenaufbereitung möglich, dazu wurden größerer Aggregate vorsichtig zerkleinert, längere Zeit in Wasser gelagert und wiederholt durchgeknetet, bis eine homogene Masse entstanden war, mit der sich die Versuche durchführen ließen. Die dafür notwendige Störung des Gefüges ist als besonders kritisch anzusehen. Die hier ermittelten Ergebnisse sind als Anhaltspunkt für die Plastizität der untersuchten halbfesten Tonsteine, nicht aber als bodenmechanischer Kennwert zu verstehen.

Die Plastizität  $I_p$  ergibt sich aus der Differenz der Wassergehalte von Fließ- und Ausrollgrenze zu:

$$(45) \quad I_p = w_L - w_P$$

Die Konsistenzzahl  $I_C$  beschreibt den Zustand des Bodens mit natürlichem Wassergehalt  $w$  und errechnet sich aus  $I_p$  und  $w_L$ :

$$(46) \quad I_C = (w_L - w) / I_p$$

Der Wassergehalt beim Übergang eines Bodens von dem halbfesten in den festen Zustand wird als Schrumpfgrenze  $w_s$  bezeichnet. Ab diesem Punkt, der in der Regel durch einen Farbumschlag vom Dunklen zum Hellern gekennzeichnet ist, ändert sich das Volumen bei weiter abnehmendem Wassergehalt kaum noch.

$$(47) \quad w_s = (V_d / m_d - 1 / \rho_s) \cdot \rho_w$$

Dabei sind  $V_d$  das Volumen des trockenen Probekörpers [ $\text{cm}^3$ ],  $m_d$  die Trockenmasse des Probekörpers [g],  $\rho_s$  die Korndichte des Bodens [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ] und  $\rho_w$  die Dichte des Wassers [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

## 6.10 Mineralcharakterisierung

Die mineralogische Zusammensetzung hat einen deutlichen Einfluss auf die möglichen Wechselwirkungen des Feststoffs mit Porenfluiden. Die Art der Tonminerale bestimmt nicht nur physiko-chemische Oberflächeneigenschaften, sondern hat auch maßgeblichen Einfluss auf die Sedimentstruktur.

Zur Disaggregation wurden etwa 10 g der Probe in etwa 500 ml destilliertem Wasser unter zeitweiser Wirkung von Ultraschall behandelt. Es ist eine vorsichtige Aufbereitung notwendig, um den Anteil an Nichttonmineralen in der Tonfraktion durch Kornzertrümmerung nicht zu erhöhen und die Tonminerale nicht zu verändern. Die Ultraschallwirkung darf nur wenige Minuten dauern, da sonst eine Exfoliation der Tonpartikel und Veränderungen durch die starke Erhitzung der Suspension eintreten können (MOORE & REYNOLDS 1997). Vor allem die Proben des Opalinustons waren teilweise gipshaltig, was zur Koagulation führte. Auf chemische Reagenzien wurde verzichtet, dafür wurde der Waschvorgang mit destilliertem Wasser so oft wiederholt, bis der Gips entfernt war. Die Korngrößentrennung erfolgte nach Siebung durch ein Sieb mit 63  $\mu\text{m}$  Maschenweite durch Sedimentation. Auf die chemische Entfernung von Eisenverbindungen wurde verzichtet, da



die chemische Behandlung vor allem die Röntgendiagramme von Wechsellagerungsmineralen verändert und nach MOORE & REYNOLDS (1997) die Notwendigkeit nicht erwiesen ist.

Zur Tonmineralcharakterisierung wurden die Fraktionen  $< 2 \mu\text{m}$  und  $2 \mu\text{m} < 63 \mu\text{m}$  lufttrocken, Glykol-gesättigt bei  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  sowie nach Erhitzen bei  $580 \text{ }^\circ\text{C}$  (BRINDLEY & BROWN 1980) in einem Röntgendiffraktometer von Phillips untersucht. Gerätebedingt fehlen die Peaks für Winkel  $2\theta < 5^\circ$ , dafür existieren Eichmessungen von bekannten Mischungen, so dass die Intensitäten der hinteren Peaks auswertbar sind. Die quantitative Analyse erfolgt durch Integration über die Fläche und Einbeziehung des Massenschwächungskoeffizienten. Die Messung erfolgte bis  $2\theta = 2\theta$  mit einer Schrittweite von  $0,02$  mit  $\text{CuK}\alpha$ -Strahlen.

### 6.11 REM

Ziel der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen war zum einen die Bestimmung der Struktur. Es wurde mittels Bildanalyse die räumliche Anordnung der Tonblättchen der unterschiedlich verwitterten Tonsteine bestimmt. Zum anderen machte der Kryotransfer die direkte Beobachtung des Wassers im Porenraum möglich.

Die REM-Untersuchungen wurden hauptsächlich am Zentrum für Werkstoffanalytik in Lauf a. d. Pegnitz durchgeführt, das über ein hochauflösendes Rasterelektronenmikroskop (LEO 1530 VP mit zwei unterschiedlichen Detektoren MPSE und Inlens) und ein Kryotransfersystem (Gatan) verfügen. Weitere Aufnahmen ohne Kryotransfer wurden am Rasterelektronenmikroskop des Geologischen Institutes in Halle gemacht. Für die Untersuchung der Wechselwirkungen von Wasser bzw. wässrigen Lösungen mit Tonmineralen ist der Erhalt des Hydrat- und Porenwassers in den Proben von besonderer Bedeutung. Eine Untersuchung von nicht dehydrierten Tonproben unter dem Rasterelektronenmikroskop ohne besondere Präparation ist nicht möglich, da das im Vakuum aus der Probe frei werdende Wasser die Untersuchung unter dem Rasterelektronen-Mikroskop stört. Die Probenpräparation durch Gefrierschock führt zu einer stabilen und nahezu volumentreuen Probe und dauert nur wenige Minuten, während andere Verfahren zum Erhalt des Wassers in Tonmineralen durch chemische Stabilisierung mehrere Tage in Anspruch nehmen können und dabei noch Veränderungen der Struktur und des Chemismus bewirken. Durch den Gefrierbruch werden zudem interne Strukturen sichtbar gemacht. Die Proben bleiben durch die Kryopräparation voll hydratisiert, das heißt auch empfindliche, stark wasserhaltige Tonminerale und die Porenlösung bleiben quasi unverändert erhalten und der Elementgehalt wird nicht verändert, so dass eine Elementaranalyse mit Energiedispersion (EDX) der Minerale und der Porenlösungen möglich ist.

Der Kryotransfer bringt jedoch auch einige Probleme mit sich. Bei einer 100%-igen Sättigung kann kein 3D-Bild erzeugt werden. Es ist dann lediglich eine Eisfläche mit Mineralunterbrechungen zu sehen. Der optimale Wassergehalt ist nur schwierig zu bestimmen. Für jede Probe muss die Sublimationszeit individuell ermittelt werden. Es muss eine ausreichende Wassersättigung vorhanden sein, um die Verteilung des Wassers im Porenraum beurteilen zu können, jedoch muss diese niedrig genug sein, um ein dreidimensionales Bild zu erhalten. Andernfalls ist nur noch eine qualitative Aussage möglich. Die optimale Sublimationszeit ist stark von der Dichte des Korngefüges abhängig. Die Sublimation der in Flüssigstickstoff schockgefrorenen und gebrochenen Proben erfolgte bei  $20 \text{ Pa}$  und  $-85 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die Sublimationszeit wurde entsprechend des Wassergehaltes variiert, da nur oberflächlich anhaftendes Wasser entfernt werden sollte. In den Röt-Tonsteinen mit natürlichem Wassergehalt wurden die besten Ergebnisse mit Sublimationszeiten zwischen zwei und vier Minuten erzielt. Für die Proben des Opalinustons waren kürzere Sublimationszeiten zielführend, bei den wenig verwitterten konnte sogar ohne Sublimation bedampft werden. Die Proben wurden nach dem Sublimationsvorgang zwischen  $140$  und  $200 \text{ s}$  lang mit Platin bedampft.

## 7 Versuchsergebnisse

In den folgenden Kapiteln sind die Versuchsergebnisse im Einzelnen dargestellt. Die Trocknungs-Befeuchtungswechsel und die damit verbundenen Siebanalysen, sollten helfen, die Zerfallsanfälligkeit der unterschiedlich stark verwitterten Tonsteine zu charakterisieren. Scher- und Kriechversuche dienen zur Bestimmung der verwitterungsabhängigen Festigkeitseigenschaften, die sich entsprechend unterschiedlichem Wasserangebot verändern. Wasseraufnahmevermögen, Oberflächenmessungen, Quell- und Schrumpfversuche sowie die Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens dienen zur direkten Charakterisierung der Feststoff-Wasser-Wechselwirkung. Nicht zuletzt sollten strukturelle Untersuchungen mittels REM die gemachten Beobachtungen stützen. Die Untersuchungen des tertiären Tons stellen einen Exkurs dar, um die Zusammenhänge zwischen der Saugspannung und dem Festigkeitsverhalten besser zu verstehen. In Kapitel 8 wird versucht, aus den einzelnen Versuchsergebnissen ein Gesamtbild zu entwickeln.

### 7.1 Wasseraufnahme

Entsprechend der herrschenden Saugspannung im trockenen Material wird beim Einsickern von Niederschlagswasser bzw. durch kapillaren Anstieg unterschiedlich schnell eine unterschiedliche Menge Wasser aufgenommen. Auch Anlagerung von Wasserdampf aus der feuchten Bodenluft ist möglich. Durch Indexversuche, wie den Versuch nach Enslin-Neff bzw. die Wasserdampfadsorption unter definierten Klimabedingungen, kann das Wasseranlagerungsverhalten der trockenen Tonsteine auf unterschiedlichen Wegen charakterisiert werden.

#### 7.1.1 WASSERAUFNAHMEVERMÖGEN NACH ENSLIN / NEFF

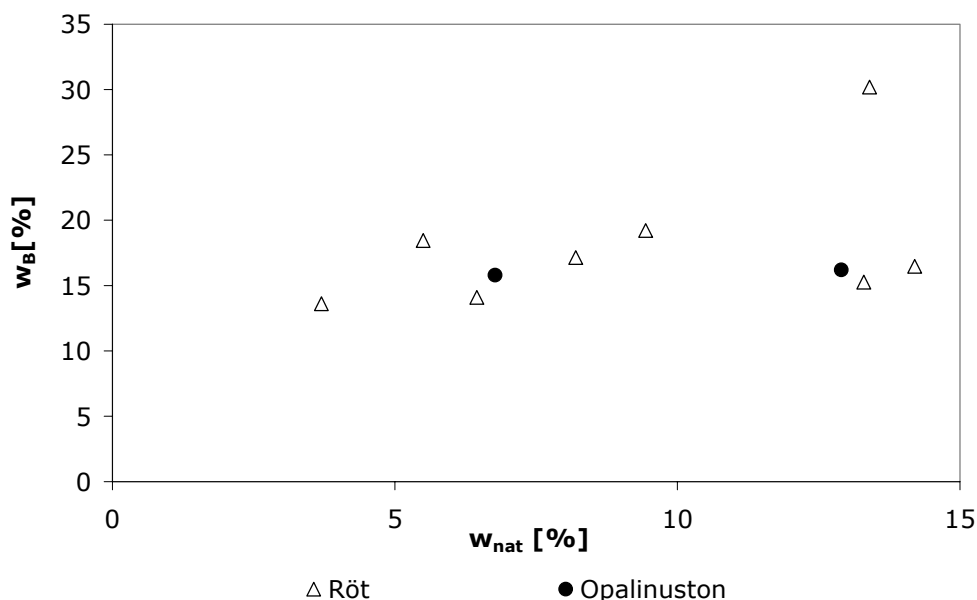
Hierbei wird das Wasseraufnahmevermögen des Gesteins bzw. der Tonsteinaggregate vom Wasseraufnahmevermögen der darin enthaltenen Tonminerale getrennt betrachtet.

##### 7.1.1.1 Wasseraufnahmevermögen der Tonsteinaggregate

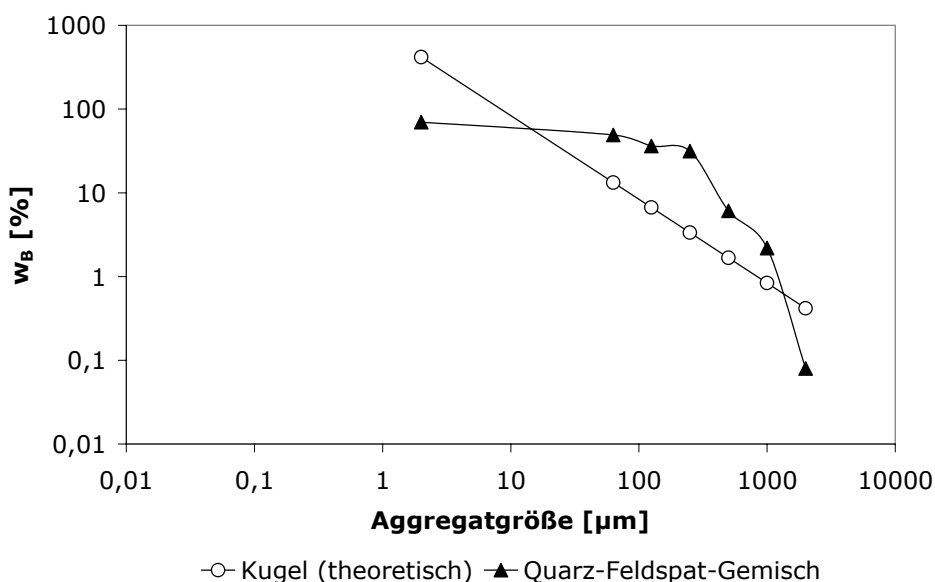
Das in Abbildung 27 angegebene Wasseraufnahmevermögen der Tonsteine wurde als gewichtetes Mittel entsprechend der Anteile der einzelnen Kornfraktionen an der Kornverteilungskurve berechnet, da das Versuchsgerät eine Bestimmung an einer ungestörten Gesteinsprobe nicht zulässt. Aggregate > 4 mm konnten im Enslin-Versuch nicht berücksichtigt werden. Diese sind jedoch auch von geringerer Bedeutung, da die Tonsteine in der Regel bereits nach einmaligem Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel fast vollständig in kleinere Aggregate zerfallen. Die Messung erfolgte an Teilproben der Einzelfraktionen. Die maximal aufnehmbare Wassermenge korreliert kaum mit dem natürlichen Wassergehalt. Das errechnete Wasseraufnahmevermögen liegt zwischen 14 und 30 %. Der natürliche Wassergehalt der Proben war generell niedriger als die Wasseraufnahmekapazität. Wegen der oberflächennahen Beprobung ist der natürliche Wassergehalt stark von den Witterungsbedingungen bei der Beprobung beeinflusst. Dies führt zu starken Schwankungen des natürlichen Wassergehalts. Innerhalb eines am gleichen Tag beprobten zusammenhängenden Verwitterungsprofils ist der Zusammenhang zwischen natürlichem Wassergehalt und Wasseraufnahmekapazität etwas deutlicher zu erkennen, wie die Werte der Proben des Zementwerk Deuna (DEU) und die des Opalinustons aus der Tongrube bei Essingen (ESS) in Abbildung 27 zeigen.

Die theoretisch maximal mögliche adsorbierbare Wassermenge erhält man, indem man eine bestimmte Schichtdicke adsorbierten Wassers annimmt und aus dem daraus resultierenden Wasservolumen dessen Masse berechnet. Dazu setzt man Kugeln mit den Siebfraktionen äquivalenten Durchmessern und einer Korndichte, die den Tonsteinen entspricht, voraus. In Abbildung 28 ist eine adsorbierte Wasserschicht einer Dicke von 5 H<sub>2</sub>O-Molekülen angenommen. Für die theoretischen Betrachtungen in dieser Arbeit spielt jedoch dieser Absolutwert keine entscheidende Rolle. Wichtig ist lediglich der linear abnehmende Trend des aufgenommenen Wassers mit zunehmendem Kugeldurchmesser. Als nicht poröse

Referenz wurde ein Quarz-Feldspat-Gemisch in die gleichen Fraktionen gesiebt und das Wasseraufnahmevermögen an diesen Körnern bestimmt. Auch die Referenzmischungen an einem angularen Quarz-Feldspat-Gemisch zeigen denselben stetig abnehmenden Trend, wobei die Kurve bei der Korngröße 250  $\mu\text{m}$  einen Knick hat und sich bei kleineren Korndurchmessern ein flach abnehmender und bei größeren Partikeln ein steil abnehmender linearer Zusammenhang erkennen lässt. Hauptursache hierfür dürfte sein, dass die Kapillarität bzw. die Oberflächenspannungen der größeren Partikel nicht mehr ausreichen, um eine vollständige Benetzung der Körner zu erreichen.



**Abbildung 27** Natürlicher Wassergehalt und Wasseraufnahmevermögen.



**Abbildung 28** Wasseraufnahmevermögen in Abhängigkeit von der Partikelgröße: theoretisch für kugelige Partikel (angenommene Dicke der Wasserschicht 5 Moleküle  $\text{H}_2\text{O}$ ) und an einem nicht porösen Referenzmaterial aus angularen Quarz- und Feldspatkörnern.

Betrachtet man das Wasseraufnahmevermögen der Siebfractionen der Tonsteine einzeln, so ist das Wasseraufnahmevermögen der Fraktionen  $< 63 \mu\text{m}$ ,  $> 63 \mu\text{m}$  und  $> 125 \mu\text{m}$  etwa auf gleichem bzw. mit der Korngröße leicht abnehmenden Niveau. Mit zunehmendem

Verwitterungsgrad nimmt  $w_B$  in den Fraktionen bis  $> 250 \mu\text{m}$  ab (Tabelle 9 und Tabelle 10). Ab  $> 250 \mu\text{m}$  nimmt das Wasseraufnahmevermögen mit zunehmender Aggregatgröße ab, wie man das aus theoretischen Überlegungen auch erwarten würde. Ab einer Aggregatgröße  $> 500 \mu\text{m}$  ist mit zunehmendem Verwitterungsgrad eine Zunahme des Wasseraufnahmevermögens verbunden. Vor allem nach mehrmaligen Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln treten in den größeren Fraktionen vereinzelt überraschend hohe Werte auf. Ursache hierfür ist die Verfälschung durch bei der Trocknung entstehende Klumpen der Feinfraktion. Diese Klümpchen haben eine hohe Trockenfestigkeit und werden deshalb beim Siebvorgang nicht zerstört, verhalten sich aber bei Wasserkontakt wie disintegrierter Feinanteil. Da davon auszugehen ist, dass auch im natürlichen Verwitterungsvorgang bei Austrocknung Aggregatneubildungen aus dem Feinanteil stattfinden, wurde vor dem Versuch keine Aussonderung solcher sekundären Aggregate durchgeführt.

**Tabelle 9** Wasseraufnahmevermögen  $w_B$  in Abhängigkeit von der Aggregatgrößenfraktion und der Zahl der Sieb-Verwitterungs-Zyklen unterschiedlich verwitterter Röt-Tonsteinproben (Deuna).

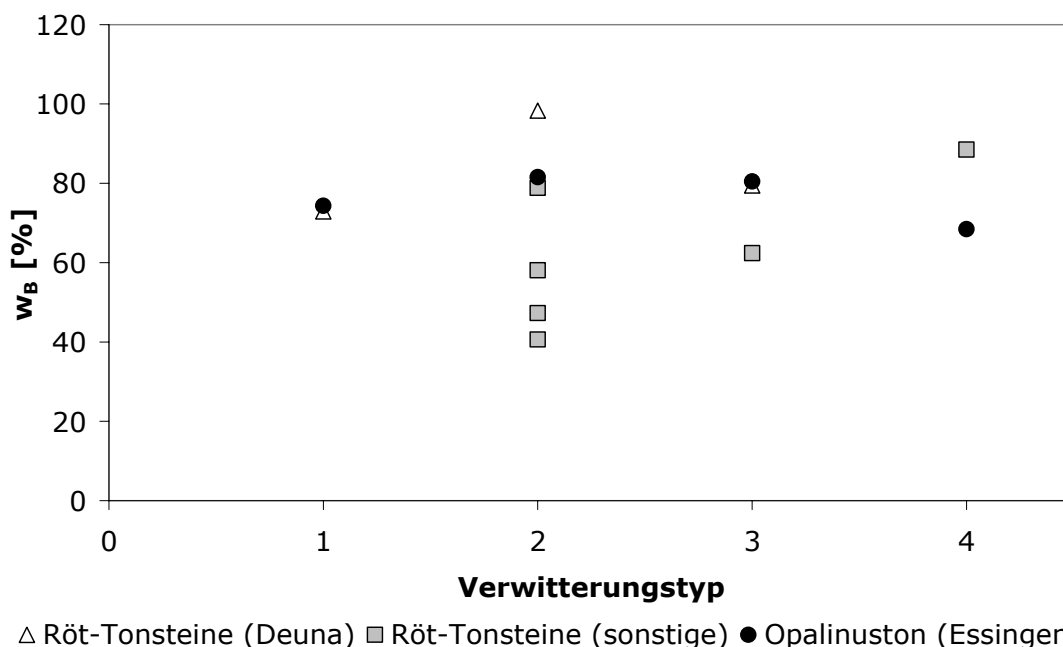
Siebfraktion:	< 63 $\mu\text{m}$	63 - 125 $\mu\text{m}$	125 - 250 $\mu\text{m}$	250 - 500 $\mu\text{m}$	500 - 1000 $\mu\text{m}$	1000 - 2000 $\mu\text{m}$	> 2000 $\mu\text{m}$
Verwitterungszyklus:							
<b>Typ 1</b>							
<b>1</b>	59,7	52,4	48,3	35,2	2,9	3,9	3,9
<b>2</b>	58,8	63,4	67,4	50,1	35,5	17,4	7,0
<b>3</b>	57,4	64,9	62,0	57,6	7,0	13,0	12,5
<b>4</b>	54,1	65,3	65,5	52,5	21,8	11,4	59,9
<b>5</b>	52,9	61,0	64,3	54,7	11,2	30,8	21,7
<b>Typ 2</b>							
<b>1</b>	46,8	47,0	44,1	33,2	10,7	8,7	5,9
<b>2</b>	55,0	44,1	46,0	40,7	15,7	14,3	2,4
<b>3</b>	51,1	50,9	44,6	44,3	14,0	13,4	10,6
<b>4</b>	53,0	53,0	52,6	29,8	23,8	40,3	51,3
<b>5</b>	48,5	52,0	48,1	42,6	13,1	16,2	35,4
<b>Typ 3</b>							
<b>1</b>	49,6	39,8	37,2	27,1	15,7	7,9	5,9
<b>2</b>	51,9	41,1	38,7	32,7	19,5	9,9	12,8
<b>3</b>	48,7	47,7	37,6	31,4	19,1	18,4	9,9
<b>4</b>	50,2	44,2	40,6	26,8	12,2	46,8	40,1
<b>5</b>	49,0	44,4	43,3	43,1	17,1	16,6	17,5

**Tabelle 10** Wasseraufnahmevermögen  $w_B$  in Abhängigkeit von der Aggregatgrößenfraktion und der Zahl der Sieb-Verwitterungs-Zyklen unterschiedlich verwitterter Opalinuston-Proben (Essingen).

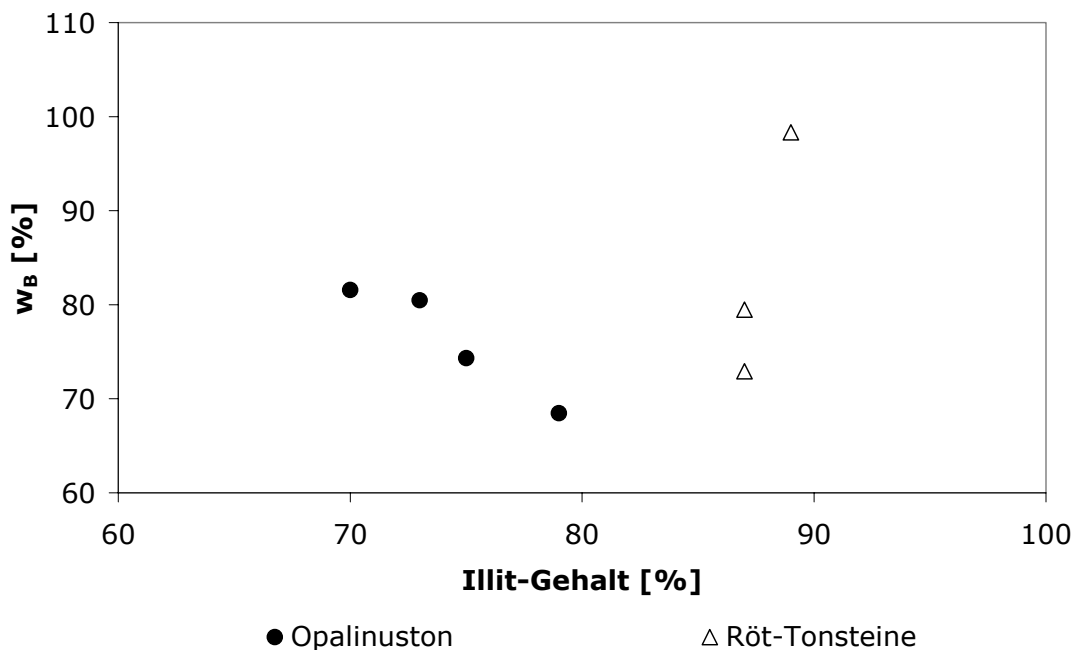
Siebfraktion:	< 63 $\mu\text{m}$	63 - 125 $\mu\text{m}$	125 - 250 $\mu\text{m}$	250 - 500 $\mu\text{m}$	500 - 1000 $\mu\text{m}$	1000 - 2000 $\mu\text{m}$	> 2000 $\mu\text{m}$
Verwitterungszyklus:							
<b>Typ 2</b>							
<b>1</b>	60,8	59,2	52,6	46,6	20,8	6,8	3,7
<b>2</b>	55,6	50,5	52,7	37,9	28,8	11,53	8,7
<b>3</b>	-	50,2	51,6	46,0	23,4	15,33	145,6
<b>4</b>	48,8	48,5	47	35,5	11,4	3,68	5,9
<b>5</b>	47,4	47,4	43,1	42,0	131,0	110,0	53,4
<b>Typ 3</b>							
<b>1</b>	-	-	-	41,6	22,5	36,6	15,3
<b>2</b>	52,6	55,6	56,2	35,0	17,9	19,7	19,2
<b>3</b>	51,2	60,6	56,5	49,7	67,3	43,9	25,3
<b>4</b>	52,1	58,4	59,1	47,3	26,3	7,3	58,5
<b>5</b>	52,2	62,9	62,2	52,8	31,7	54,4	14,3

### 7.1.1.2 Wasseraufnahme des Anteils < 2 $\mu\text{m}$

Zwischen dem Wasseraufnahmeverhalten der separierten Tonfraktion und dem Verwitterungsgrad wird kein Zusammenhang erkennbar. Die Werte des Anteils < 2  $\mu\text{m}$  liegen für Röt-Tonsteine zwischen 41 und 98 % und für Opalinuston zwischen 68 und 82 % (siehe Abbildung 29 und Anhang 2). Die Wasseraufnahme der wenig verwitterten Tonfraktion (Typ 1) ist relativ gering, steigt dann bei einsetzender Verwitterung (Typ 2) sprunghaft an, um mit zunehmender Verwitterung wieder abzunehmen. Grund hierfür ist der deutliche Zusammenhang des Wasseraufnahmevermögens der Fraktion < 2  $\mu\text{m}$  mit der Tonmineralzusammensetzung (siehe Kapitel 7.12 und Abbildung 30). Beim Opalinuston sinkt das Wasseraufnahmevermögen mit zunehmendem Illitgehalt. Die Illitgehalte der Röt-Proben unterscheiden sich kaum. Im Zusammenhang mit dem Wasseraufnahmevermögen ist ein genau umgekehrter Trend zu beobachten. Schon ein geringfügig größerer Illitgehalt bewirkt im Röt eine deutliche Erhöhung der Wasseraufnahmekapazität. Beim Opalinuston ist die Zunahme des Illitgehaltes mit einer Abnahme der spezifischen Oberfläche verbunden, die auch zu einer Abnahme der Wasseraufnahme führt. Die spezifische Oberfläche der Tonfraktion der Röt-Tonsteine korreliert dagegen nicht mit dem Illitgehalt – allerdings ebenso wenig mit dem Wasseraufnahmevermögen (siehe 7.3). Wie sich bei späteren Untersuchungen mit dem Lasergranulometer herausstellte, ist die mittlere Korngröße der Tonfraktion des Typs 2 deutlich feinkörniger als die der anderen Verwitterungstypen. Diese Abweichung der Korngrößenverteilung hat einen großen Einfluss auf das Wasseraufnahmevermögen, weshalb die Daten der Probe nur teilweise für den Vergleich der unterschiedlich verwitterten Tonsteine herangezogen werden konnten. Zusätzlich zu den zusammengehörigen Verwitterungsprofilen aus Deuna und Essingen wurden Einzelproben aus dem Röt unterschiedlicher Lokalitäten aus vergleichbarer stratigraphischer Position untersucht. Das Wasseraufnahmevermögen der separierten < 2  $\mu\text{m}$  Anteile von Röt-Tonsteinen des Verwitterungstyps 2 erreicht Werte zwischen 47 und 98 % (Abbildung 29). Die Wasseraufnahmekapazität des Tonanteils des Typs 4 aus Angersdorf bei Halle (FW5) liegt in der gleichen Größenordnung wie der Wert für den Typ 4 aus Deuna (siehe Anhang A.2).



**Abbildung 29** Wasseraufnahmevermögen der Fraktion < 2  $\mu\text{m}$  verschieden verwitterter Tonsteine aus zusammengehörigen Verwitterungsprofilen (Röt Deuna und Opalinuston Essingen) und Einzelproben verschiedener Lokalitäten (Eisenberg, Angersdorf, Wüstenzell, Dietenhan).

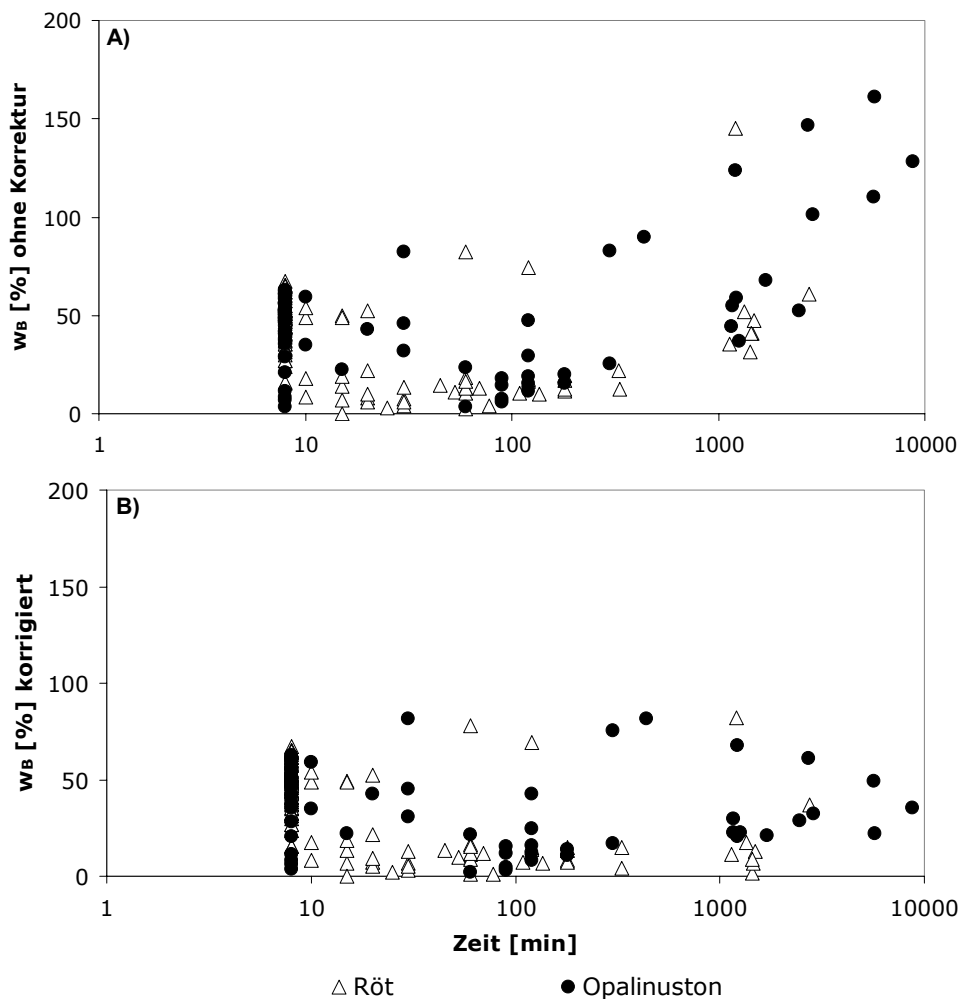


**Abbildung 30** Zusammenhang zwischen Wasseraufnahmevermögen der Fraktion  $< 2 \mu\text{m}$  und der Tonmineralzusammensetzung.

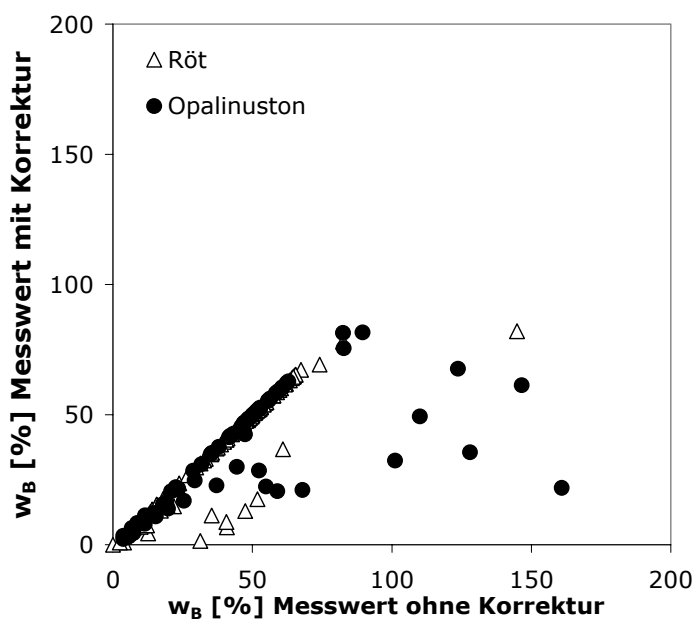
### 7.1.1.3 Mögliche systematische Versuchsfehler bei der Wasseraufnahme nach Enslin-Neff

Ist eine längere Versuchszeit nötig, weil die Wasseraufnahme der Aggregate nur sehr langsam vonstatten geht, so stört der Anteil an verdunstetem Wasser den Versuch. Es stellt sich kein konstanter Endwassergehalt ein. Vielmehr nimmt die gemessene aufgenommene Wassermenge mit einem linearen Anstieg über die Zeit zu. Da sich die beiden Effekte vor Erreichen des Endwassergehaltes überlagern, ist die graphische Ermittlung der von der Probe aufgenommenen Wassermenge aus dem Kurvenverlauf nicht möglich. Deshalb wurden die Messwerte entsprechend der im Blindversuch bestimmten Verdunstungsrate (siehe Kap. 6.1) des Enslin-Gerätes korrigiert. Wie Abbildung 31 B) zeigt, sind die korrigierten Werte nicht mehr zeitabhängig. Zwischen dem originalen und dem korrigierten Messwert müsste analog zur linearen Verdunstungsrate ein linearer Zusammenhang bestehen. Die Abweichung der Werte von dieser Geraden in Abbildung 32 beruht darauf, dass die Verdunstungsrate des Gerätes mit Probe von der ohne Probe auf der Filterplatte bestimmten verschieden sein kann. Wie die Graphik zeigt, wurde die Verdunstung in diesem Fall überschätzt. Es ist denkbar, dass die Verdunstungsrate bei einer flachen und breiten Verteilung der Probe auf der Filterplatte geringer ist, da der Wasserdampf erst durch die noch nicht vollständig durchfeuchtete Probe hindurch muss. Dort wird er zumindest teilweise an trockenen Oberflächen adsorbiert.

Eine mögliche Erklärung für die teilweise beobachtete Wiederabgabe des Wassers während des Versuchs, könnten geringe Überdrücke sein, die sich durch entweichende Porenluft aufbauen. So kann man im Extremfall beobachten, dass sich unter der Filterplatte Luftblasen bilden und gleichzeitig die Wassersäule ruckelnd zurückweicht. Dieses Phänomen tritt vor allem bei schneller Wasseraufnahme auf. Ein weniger dichter Verschluss des Trichters würde dieses Problem eventuell beseitigen, jedoch gleichzeitig die Verdunstung begünstigen. Die Wasseraufnahmekurven unterscheiden sich unabhängig von der Aggregatgröße in ihrem Verlauf. Dieser wird in erster Linie von der Geometrie des Schüttkegels beeinflusst. Kegel mit steileren Flanken weisen in der Regel eine langsamere Wasseraufnahme auf als flachere.



**Abbildung 31** Verdunstungseinfluss beim Enslin-Gerät A) Wegen des Verdunstungsanteils sind die ermittelten  $w_B$ -Werte zeitabhängig (Je nach Dauer des Versuchs bis zum Erreichen des Wasseraufnahmevermögens, ist der Verdunstungsanteil am abgelesenen Wert unterschiedlich hoch.), B) dieselben Werte nach der Verdunstungskorrektur.



**Abbildung 32** Verdunstungskorrektur des Wasseraufnahmevermögens.

### 7.1.2 AUFNAHME VON WASSER AUS DER DAMPFPHASE

Die Aufnahme von Wasserdampf aus der feuchten Umgebungsluft charakterisiert teilweise den adsorptiven Anteil der Saugspannung. Eine verallgemeinernde Aussage über eine verwitterungsabhängige Wasserdampfaufnahme von Tonsteinen kann anhand der vorliegenden Ergebnisse nicht gemacht werden. Röt-Tonsteine und Opalinuston verhalten sich deutlich verschieden. Die unterschiedlich stark verwitterten Röt-Tonsteine können mit 1,8 bis 2,4 % weniger Wasserdampf adsorbieren als der Opalinuston mit 4,6 bis 5,0 %. Diese Werte sind wieder gewichtete Mittelwerte der einzelnen Siebfraktionen des vorsichtig getrockneten Materials, um die Ergebnisse besser mit dem Wasseraufnahmevermögen nach Enslin / Neff vergleichen zu können. Die Aufnahme von Wasserdampf des Anteils < 2 µm schwankt zwischen 6 und 10 % bei den Röt-Tonsteinen. Die Tonfraktion des Opalinustons adsorbierte unabhängig vom Verwitterungstyp zwischen 10 und 11 % Wasserdampf.

Beim Röt-Tonstein des Typs 1 können die Aggregate des getrockneten Originalmaterials deutlich weniger Wasserdampf aufnehmen, als nach dem 2. bis 5. Siebzyklus. Die adsorbierte Wassermenge ist ab dem 2. Siebgang gleich bleibend. Mit einigen Ausreißern in den Werten wird ein Anstieg der Wasserdampfadsorption mit zunehmender Aggregatgröße nur undeutlich erkennbar. Beim Röt des Typs 2 nimmt die Wasserdampfaufnahme der Fraktion < 63 µm mit jedem Siebgang ab, für alle größeren Aggregate mit jedem Siebgang leicht zu (Tabelle 11). Die Werte der Fraktion < 63 µm sind erwartungsgemäß höher als die der größeren Aggregate. In den Fraktionen > 63 µm bis 1000 µm nimmt die Wasserdampfadsorption mit der Aggregatgröße zu und stagniert dann bei noch größeren Aggregaten. Für den Röt-Tonstein des Typs 3 lässt sich kein eindeutiger Trend der Wasserdampfadsorption mit zunehmenden Siebgängen feststellen. Nur die Fraktionen < 63, > 500 und > 1000 µm zeigen hier noch einen undeutlichen Anstieg. Im Bereich < 63 µm bis > 250 µm nimmt die aufgenommene Wassermenge mit zunehmender Aggregatgröße ab, bei den gröberen Tonsteinaggregaten wieder zu. Ursache dafür können Unterschiede in der Oberflächenrauigkeit und der Porosität einzelner Aggregate sein. Das würde bedeuten, dass alle Aggregate < 500 µm eine ähnliche Oberflächenbeschaffenheit haben. Bei gröberen Aggregaten dagegen steigt die Wasserdampfadsorption mit der Aggregatgröße aufgrund einer vergrößerten Oberfläche, die entweder aus einer rauerer Oberfläche oder einer Veränderung der Porengrößenverteilung resultiert.

**Tabelle 11** Wasserdampfaufnahmevermögen *w* in Abhängigkeit von der Aggregatgrößenfraktion und der Zahl der Sieb-Verwitterungs-Zyklen unterschiedlich verwitterter Röt-Tonsteinproben (Deuna).

Siebfraktion:	< 63 µm	63 - 125 µm	125 - 250 µm	250 - 500 µm	500 - 1000 µm	1000 - 2000 µm	> 2000 µm
Verwitterungszyklus:	[%] Typ 1						
1	1,9	0,6	0,4	1,4	2,1	2,5	2,1
2	2,8	2,6	3,2	3,5	3,4	3,4	3,5
3	2,8	2,7	2,9	3,1	2,7	3,2	3,2
4	2,6	2,8	3,1	3,1	3,3	3,4	3,4
5	2,8	2,7	3,0	3,2	3,3	3,3	3,2
[%] Typ 2							
1	-	0,7	1,6	1,8	2,4	2,8	2,6
2	3,4	1,7	1,7	2,3	2,8	2,9	2,9
3	2,6	1,8	1,7	2,2	2,7	2,9	3,0
4	2,5	1,8	2,0	2,3	2,7	3,0	2,8
5	2,6	1,9	2,2	2,5	3,0	3,4	2,9
[%] Typ 3							
1		1,5	1,5	1,3	1,8	2,7	3,0
2	3,1	1,8	1,6	1,4	2,3	3,0	2,9
3	2,8	1,5	1,2	1,3	2,4	2,9	2,9
4	2,8	1,6	1,6	1,4	3,0	3,2	2,8
5	2,9	1,6	1,3	1,2	2,3	3,4	3,6



Beim Opalinuston des Typs 2 gibt es keinen deutlichen Zusammenhang zwischen Aggregatgröße bzw. den Verwitterungszyklen mit der Aufnahme von Wasserdampf. Die Werte liegen einheitlich zwischen 3,9 und 4,9 %, wobei die Werte der ersten Siebung vor allem der Fraktion < 63 µm des Originalmaterials, geringfügig höher sind. Der leicht zunehmende Trend der Wasserdampfaufnahme mit der Aggregatgröße liegt innerhalb der Versuchsgenauigkeit. Anders verhält sich die etwas stärker verwitterte Probe (Typ 3, siehe Tabelle 11). Die Zunahme der Wasserdampfaufnahme mit zunehmender Aggregatgröße wird in allen Siebzyklen deutlich, wobei die feineren Aggregate (< 250 µm) ähnliche Mengen Wasserdampf adsorbieren können und eine deutliche Zunahme erst bei den gröberen Aggregaten erfolgt.

Die nach Gleichung (22) (siehe Kapitel 6.1.2) berechneten spezifischen Oberflächen der Tonfraktion steigen beim Opalinuston von 16,91 beim Verwitterungstyp 1 bis 18,13 m<sup>2</sup>/g beim Verwitterungstyp 4 kontinuierlich an. Bei den Röt-Tonsteinen beträgt die spezifische Oberfläche 10,33 m<sup>2</sup>/g bei Typ 1, 16,59 m<sup>2</sup>/g beim Typ 2 und 14,94 m<sup>2</sup>/g beim Verwitterungstyp 3. Die spezifischen Oberflächen, wie sie sich aus der Wasserdampfaufnahme ergeben, folgen den gleichen systematischen Zusammenhängen wie die Wassergehalte. Die Werte (Tabelle 12) liegen mit 0,65 bis 19,78 m<sup>2</sup>/g deutlich unter den durch N<sub>2</sub>-Adsorption ermittelten Oberflächen.

Die Wasserdampfadsorption von Röt-Tonsteinen unterschiedlicher Lokalisationen variiert stark. So sind die Messwerte für Proben aus dem Verwitterungsprofil bei Deuna (Thüringen) auffallend niedrig, während die Vergleichsmessungen an Probenreihen des Typs 2 aus Spielberg (Sachsen-Anhalt) und Diethan (bei Würzburg) erheblich größere Werte der Wasserdampfadsorption ergaben. Dies betrifft jedoch nur die Aggregate, die Werte der separierten Tonfraktion unterscheiden sich nicht signifikant. Ursache sind Unterschiede der Zementfüllung des Porenraums.

**Tabelle 12** Spezifische Oberflächen der Tonsteine errechnet aus der Wasserdampfadsorption.

Probenserie	Spez. Oberfläche [m <sup>2</sup> /g]
ESS1 (Opalinuston, Typ 2)	6,28 - 7,85
ESS3 (Opalinuston, Typ 3)	6,01 - 9,41
DEU5 (Röt, Typ 1)	0,65 - 5,63
DEU7 (Röt, Typ 2)	1,11 - 5,41
DEU10 (Röt, Typ 3)	1,89 - 5,77
DH004 (Röt, Typ 2)	2,27 - 19,78
SPHS (Röt, Typ 2)	6,38 - 15,20

**Tabelle 13** Wasserdampfaufnahmevermögen in Abhängigkeit von der Aggregatgrößenfraktion und der Zahl der Sieb-Verwitterungs-Zyklen unterschiedlich verwitterter Opalinuston-Proben (Essingen).

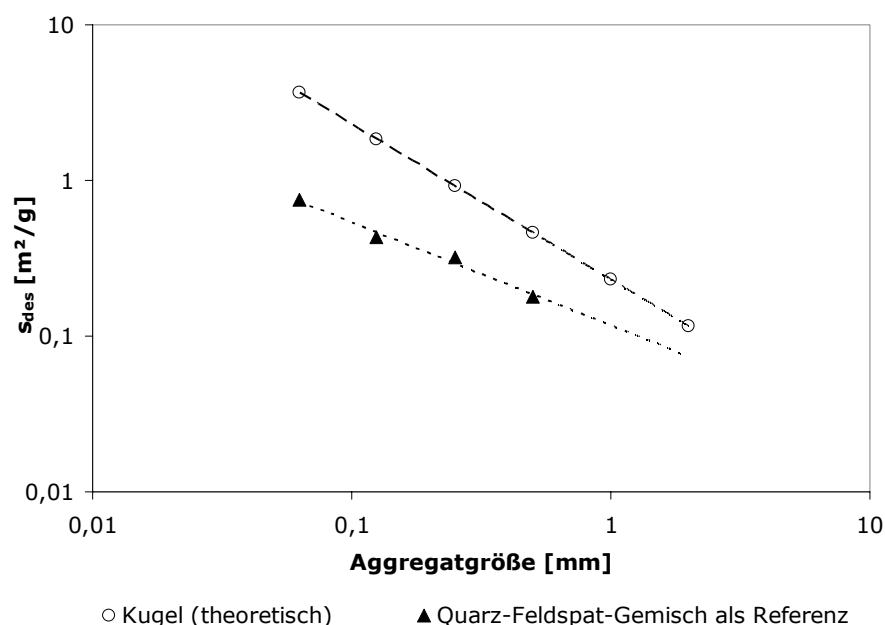
Siebfraktion: Verwitterungszyklus:	< 63 µm	63 - 125 µm	125 - 250 µm	250 - 500 µm	500 - 1000 µm	1000 - 2000 µm	> 2000 µm
<b>[%] Typ 2</b>							
<b>1</b>	4,9	4,3	4,5	4,4	4,6	4,5	4,7
<b>2</b>	4,2	4,1	4,0	4,2	4,2	4,0	3,9
<b>3</b>	-	-	-	4,0	4,0	4,1	4,1
<b>4</b>	4,3	4,4	4,2	4,2	4,2	4,1	4,1
<b>5</b>	4,3	4,4	4,4	4,3	4,3	4,2	4,0
<b>[%] Typ 3</b>							
<b>1</b>	4,3	4,5	5,0	4,9	5,0	5,1	5,0
<b>2</b>	4,3	4,3	4,4	4,5	4,7	5,0	4,6
<b>3</b>	4,4	4,3	4,3	4,2	4,2	4,3	5,4
<b>4</b>	4,3	3,7	4,0	4,4	4,7	4,7	5,5
<b>5</b>	5,0	5,2	5,1	5,1	5,2	5,5	5,9

## 7.2 Spezifische Oberfläche (BET-Methode)

Zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche wurde aus den in 6.2 näher erläuterten Gründen die relativ einfache und schnelle BET-Methode herangezogen. Wegen des Fehlens quellfähiger Tonminerale konnte auf die Bestimmung der inneren Oberfläche verzichtet werden. Die spezifische Oberfläche gibt einen Hinweis über die für die Interaktion mit Wasser zur Verfügung stehende Feststoffoberfläche. Indirekt sind auch aus den 1-Punkt-Messungen Rückschlüsse auf die Porenradienverteilung möglich, da die primären Korngrößenverteilungen der Tonsteine aus einem Verwitterungsprofil sich nicht wesentlich unterscheiden. So bedeutet eine größere spezifische Oberfläche einen größeren Anteil kleinerer Poren.

### 7.2.1 SPEZIFISCHE OBERFLÄCHE DER TONSTEINAGGREGATE

Nimmt man für ideale Kugeln eine den Tonsteinen entsprechende Korndichte an, kann man ihre theoretische spezifische Oberfläche berechnen. Diese nimmt, wie Abbildung 33 zeigt, mit zunehmendem Kugeldurchmesser kontinuierlich ab. Auch das nicht poröse Gemisch aus angularen Quarz- und Feldspatkörnern, welches schon für das Wasseraufnahmevermögen als Referenzmaterial diente, zeigt diesen Trend, wenn auch auf Grund der unebenen Kornoberfläche in etwas abgeflachter Form.



**Abbildung 33** Theoretischer Zusammenhang zwischen Spezifischer Oberfläche und Aggregatgröße.

Die Messwerte der gesiebten Röt-Tonsteine sind in Tabelle 14, die des Opalinustons in Tabelle 15 dargestellt. Die spezifische Oberfläche der Röt-Tonsteine wird mit zunehmender Aggregatgröße größer (Abbildung 34). Im Aggregatgrößenbereich  $> 63 \mu\text{m}$  bis  $< 500 \mu\text{m}$  ist dieser Anstieg zunächst nur gering. Die spezifische Oberfläche wenig verwitterter Proben ist größer (Typ 1: 10,1 bis 13,2 m<sup>2</sup>/g, Typ 2: 7,7 bis 8,2 m<sup>2</sup>/g) als die stärker verwitterter Proben (Typ 3: 6,1 bis 6,3 m<sup>2</sup>/g). Bei Aggregaten  $> 500$  und  $> 1000 \mu\text{m}$  des Typs 2 und 3 ist die spezifische Oberfläche deutlich höher, bei Typ 1 nur wenig größer, als bei den kleineren Aggregaten. Sie beträgt im Typ 1 12,1 bis 13,2 m<sup>2</sup>/g, im Typ 2 13,8 bis 16,3 m<sup>2</sup>/g und im Typ 3 8,6 bis 14,6 m<sup>2</sup>/g.

Durch die Trocknungs-Befeuchtungs-Zyklen nimmt die spezifische Oberfläche in den einzelnen Kornfraktionen in Röt-Tonsteinen des Typs 1 und 2 zunächst zu (Tabelle 14). Ab dem 3. Trocknungs-Befeuchtungszyklus nimmt sie jedoch wieder ab bzw. bleibt konstant. Der Röt-Tonstein des Typs 3 verhält sich anders. Hier zeigen alle Aggregate  $< 500 \mu\text{m}$  eine Zunahme der spezifischen Oberfläche mit jedem weiteren Verwitterungszyklus. Die Aggregate  $> 500 \mu\text{m}$  verhalten sich analog zu den weniger verwitterten Proben.

**Tabelle 14** Spezifische Oberfläche [ $m^2/g$ ] in Abhängigkeit von der Aggregatgrößenfraktion und der Zahl der Sieb-Verwitterungs-Zyklen unterschiedlich verwitterter Röt-Tonsteinproben (Deuna).

Siebfraktion:	< 63 $\mu m$	63 - 125 $\mu m$	125 - 250 $\mu m$	250 - 500 $\mu m$	500 - 1000 $\mu m$	1000 - 2000 $\mu m$	> 2000 $\mu m$
<b>Verwitterungszyklus:</b>							
<b>Typ 1</b>							
1	14,91	10,12	10,74	13,21	12,05	13,15	13,91
2	17,03	17,42	20,33	22,97	16,17	18,94	21,67
3	17,22	17,59	17,28	19,77	20,25	20,14	20,58
4	17,27	15,93	20,87	13,90	20,35	14,31	15,17
5	17,22	16,27	18,65	14,47	20,98	18,83	16,02
<b>Typ 2</b>							
1	12,36	7,67	7,74	8,18	13,80	16,26	13,76
2	18,00	11,96	12,43	14,09	15,01	17,28	14,15
3	15,76	12,66	12,86	12,85	16,97	19,73	22,45
4	11,21	10,12	11,75	13,12	15,25	20,53	14,48
5	14,06	11,74	15,17	13,06	16,80	18,50	15,45
<b>Typ 3</b>							
1	8,19	6,09	6,22	6,31	8,61	14,62	13,55
2	13,78	8,90	7,74	8,60	13,49	7,30	17,45
3	13,21	9,34	7,41	9,61	16,16	6,88	13,77
4	12,84	10,25	10,40	8,00	16,00	18,62	10,92
5	14,20	9,45	10,33	9,46	14,18	18,67	16,48

**Tabelle 15** spezifische Oberfläche [ $m^2/g$ ] in Abhängigkeit von der Aggregatgrößenfraktion und der Zahl der Sieb-Verwitterungs-Zyklen unterschiedlich verwitterter Opalinuston-Proben (Essingen).

Siebfraktion:	< 63 $\mu m$	63 - 125 $\mu m$	125 - 250 $\mu m$	250 - 500 $\mu m$	500 - 1000 $\mu m$	1000 - 2000 $\mu m$	> 2000 $\mu m$
<b>Verwitterungszyklus:</b>							
<b>Typ 2</b>							
1	25,09	25,78	26,92	25,67	25,91	23,26	26,62
2	25,42	22,00	27,37	27,05	22,18	25,35	17,83
3	22,22	24,42	24,76	23,00	26,92	22,89	21,18
4	19,52	22,37	21,62	29,40	26,12	21,66	24,49
5	19,04	23,44	24,24	22,93	9,46	21,02	27,43
<b>Typ 3</b>							
1	20,76	24,27	24,81	26,23	25,92	22,50	23,88
2	23,72	24,38	27,53	21,24	25,54	29,28	22,35
3	23,66	29,56	25,29	26,90	28,84	24,51	28,59
4	22,99	25,17	23,41	25,38	25,41	31,38	29,17
5	22,82	25,05	27,65	30,84	29,87	27,31	28,24

Die Aggregate weiterer Röt-Tonstein-Proben verhalten sich ähnlich. Bei den Proben EB1, KD1 (beide Verwitterungstyp 2) und WF7 (Verwitterungstyp 3) nimmt die spezifische Oberfläche mit der Aggregatgröße zu. Andererseits lässt sich drei Proben des Typs 2 auch eine deutliche Verringerung der spezifischen Oberfläche ab einer Aggregatgröße von 500  $\mu m$  beobachten (Abbildung 35).

Die Entwicklung der spezifischen Oberfläche der Aggregatfraktionen während der im Labor durchgeführten Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel ist nicht immer systematisch (siehe Anhang). So nimmt bei der Probe DH004 (Dietenhan) die spezifische Oberfläche bei allen Aggregaten < 1000  $\mu m$  mit jedem Verwitterungszyklus ab. Die Oberfläche der Aggregate > 1 mm nimmt von etwa 34  $m^2/g$  nach der ersten Siebung auf etwa 46  $m^2/g$  nach zweiten Siebung zu, um dann wieder kontinuierlich abzunehmen. Die Aggregate der Siebfraktion > 2 mm derselben Probe haben bei allen Verwitterungszyklen eine ähnliche spezifische Oberfläche, die um 29  $m^2/g$  schwankt.

Bei der Probe SPHS (Spielberg) wird die Oberfläche aller Aggregate > 1 mm durch die Trocknungs-Befeuchtungswechsel nicht mehr verändert. Die spezifische Oberfläche dieser

Röt-Tonstein-Probe des Verwitterungstyps 2 nimmt in der Siebfraktion > 500µm mit jedem Trocknungs-Befeuchtungswechsel ab. Bis zur dritten Siebung nimmt die Oberfläche der Aggregate > 250 ab, danach deutlich zu, wobei bei der 5. Siebung mit etwa 48 m<sup>2</sup>/g ein wesentlich größerer Wert als bei der 1. Siebung erreicht wird. Die Werte der Aggregate > 63 µm und > 125 µm unterliegen größeren, offenbar unsystematischen, Schwankungen.

Bei der untersuchten Probe des Verwitterungstyps 3 (WF7) nimmt die spezifische Oberfläche aller Aggregate > 1 mm mit jedem Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel ab. Die Aggregat-Fractionen > 500 µm, > 250 µm und > 125 µm zeigen eine deutliche Verringerung der spezifischen Oberfläche nach dem ersten Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel und einen Anstieg mit jedem folgenden. Die spezifische Oberfläche der kleinsten Aggregate (> 63 µm) nimmt kontinuierlich zu (siehe Anhang).

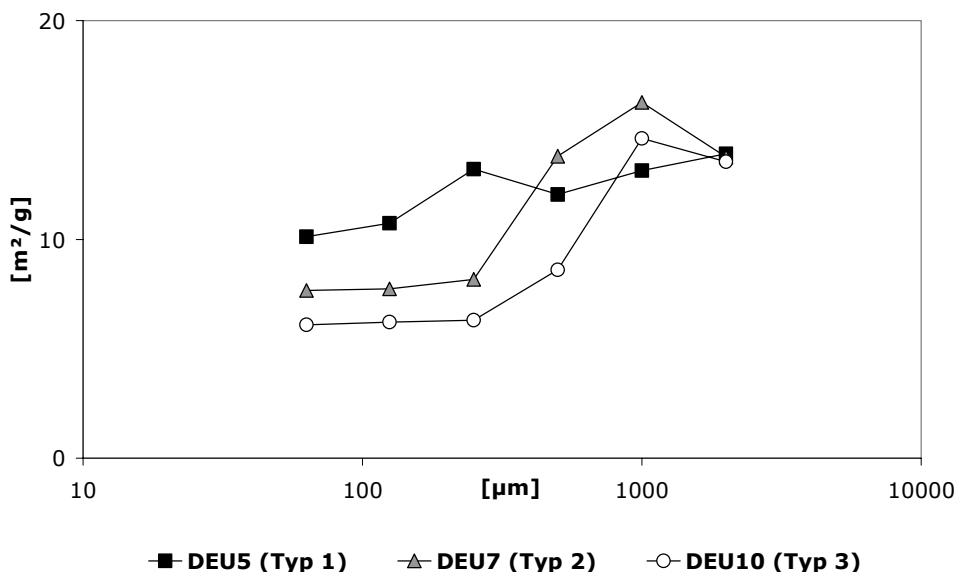


Abbildung 34 Spezifische Oberfläche der Röt-Tonsteinaggregate (Deuna) nach der ersten Trocknung.

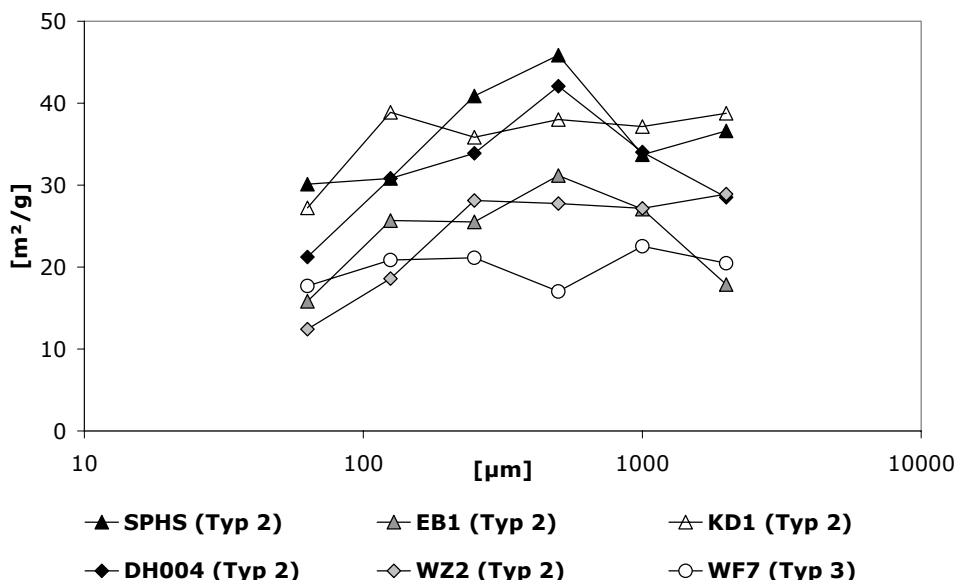
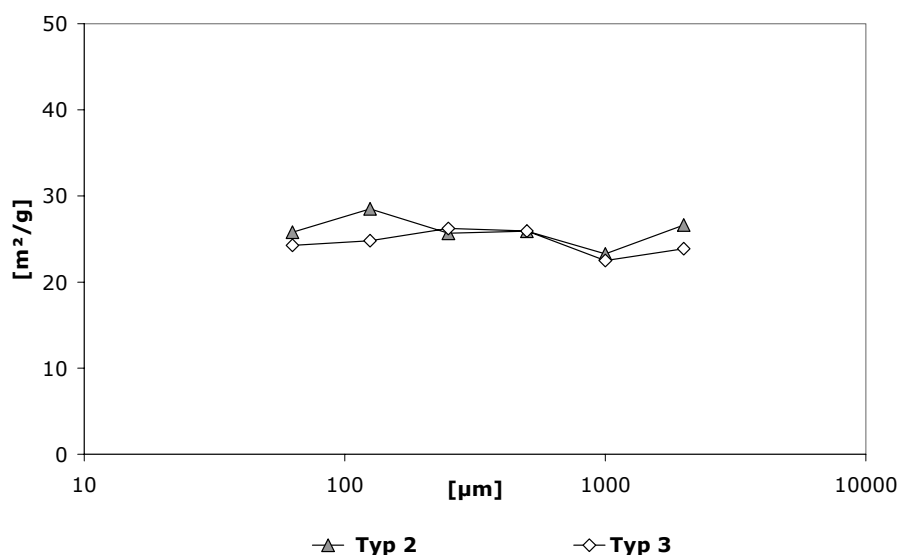


Abbildung 35 Spezifische Oberfläche der Röt-Tonsteinaggregate nach der ersten Trocknung verschiedener Lokalitäten. SPHS, EB1 und KD1: Thüringen; DH004, WZ2 und WF7: Bayern.



**Abbildung 36** Spezifische Oberfläche der Aggregate des Opalinustons (Essingen) nach der ersten Trocknung.

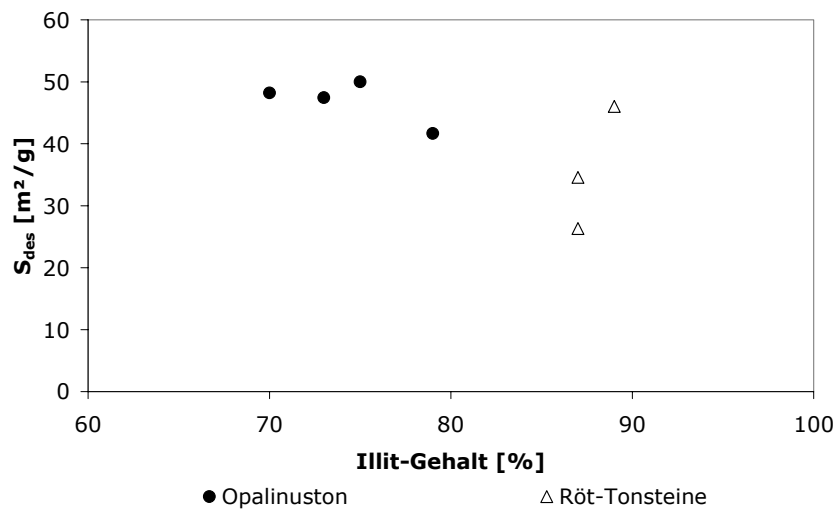
Die spezifische Oberfläche der Tonsteinaggregate des Opalinustons beträgt zwischen 20 und 30 m<sup>2</sup>/g und ist offensichtlich von der Größe der einzelnen Aggregate wenig abhängig (Abbildung 36). MERKLEIN-LEMP (1984) beobachtete mit einer spezifischen Oberfläche zwischen 26,9 und 28,8 m<sup>2</sup>/g ganz ähnliche Werte im Opalinuston. Dabei ist der Verwitterungsgrad von geringer Bedeutung. Die spezifische Oberfläche des Typs 3 ist für < 250 µm, wie auch bei den Röt-Tonsteinen, niedriger als beim Typ 2. Bei den Aggregaten > 250 bis < 2000 µm sind die Messwerte unabhängig vom Verwitterungsgrad beinahe identisch, wobei die Oberfläche mit zunehmendem Aggregatdurchmesser abnimmt. Bei den Aggregaten > 2000 µm wurden wieder größere spezifische Oberflächen gemessen, wobei die stärker verwitterte Probe des Typs 3 auch hier wieder eine geringere spezifische Oberfläche hat, als die weniger verwitterte.

Die unterschiedliche Entwicklung der spezifischen Oberfläche von Röt-Tonsteinen und Opalinuston lässt sich nur durch unterschiedliche Zerfallsmechanismen begründen. Wenn die Tonsteinaggregate im Opalinuston einfach zerbrechen, ändert sich ihre aggregatinterne Porenraumstruktur nicht und die spezifische Oberfläche bleibt annähernd gleich. In den Aggregaten der Röt-Tonsteine müssen hingegen strukturelle Veränderungen stattfinden. Ein Übertragen des Verwitterungsschemas auf den Maßstab eines einzelnen Tonsteinaggregates führt zu einem Zwiebschalen-Modell (siehe 7.6). Das Material wird allmählich von außen her aufgelockert, während im Inneren ein nahezu unverwitterter Kern verbleibt. Die äußere stark verwitterte Hülle gewinnt an Mächtigkeit wird allerdings sporadisch durch mechanische Einwirkung oder durchfließendes Wasser entfernt. Dieser Prozess erfolgt zyklisch, so dass eine zufällige Mischung aus verwitterten Aggregaten, quasi unverwitterten Aggregatkernen und abgetragener Feinsubstanz vorliegt, die ihrerseits bei Austrocknung neue Aggregate bildet. Damit lässt sich auch die scheinbar unsystematische Entwicklung der gemessenen Oberflächen erklären, da sich die Aggregate einer Probe nicht alle zwingend im gleichen Stadium ihres Zerfallszyklusses befinden müssen.

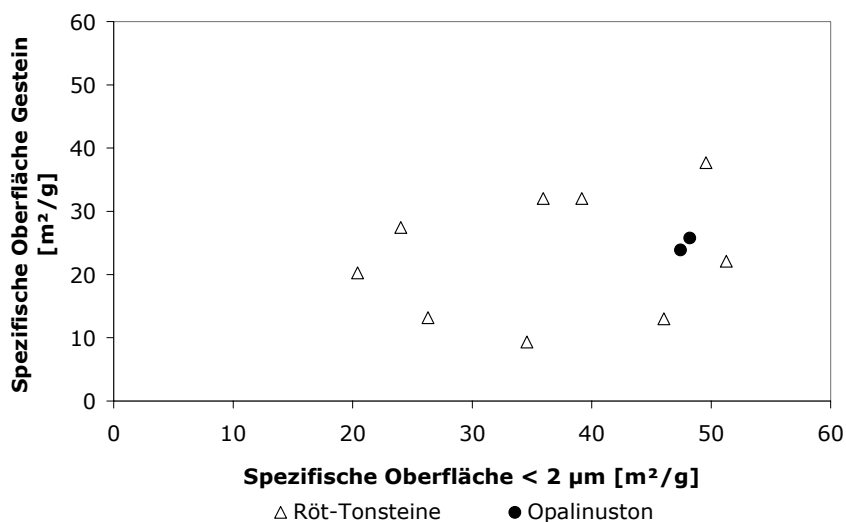
### 7.2.2 SPEZIFISCHE OBERFLÄCHE DER SEPARIERTEN ANTEILE < 2µm

Die spezifische Oberfläche der Anteile < 2 µm nimmt mit zunehmenden Illitgehalt ab, wie beim Opalinuston deutlich wird (Abbildung 37). Die Röt-Tonsteine haben so ähnliche Illitgehalte, dass ihre spezifische Oberfläche ausschließlich durch die unterschiedlichen Korngrößenverteilungen bestimmt wird. Die Spezifische Oberfläche der separierten Fraktion < 2 µm hat keinen deutlichen Einfluss darauf, wie die spezifische Oberfläche des Gesteins ist (Abbildung 38). Die Oberfläche wird vielmehr durch die Struktur innerhalb der Aggregate

bestimmt, das heißt, in welcher Geometrie die Tonpartikel zueinander angeordnet sind und wie viel Kontaktflächen, Zemente usw. bestehen.



**Abbildung 37** Spezifische Oberfläche der Fraktion  $< 2 \mu m$  in Abhängigkeit vom Illitgehalt.



**Abbildung 38** Spezifische Oberfläche des Anteils  $< 2 \mu m$  im Vergleich mit der Spezifischen Oberfläche des Gesamtgesteins verschieden verwitterter Röt-Tonsteine (aus Deuna, Spielberg, Wüstenzell, Dietenhan) und Opalinuston (Essingen).

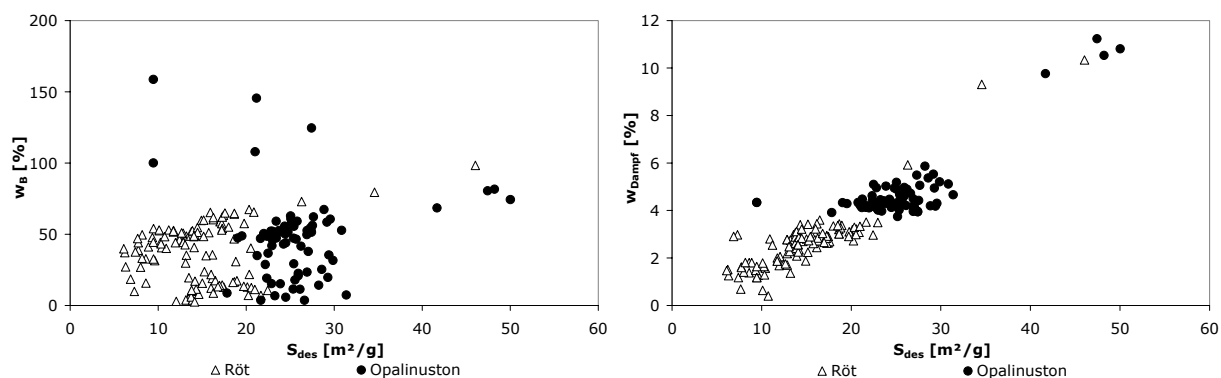
## 7.3 Vergleich von spezifischer Oberfläche (BET-Methode), Wasseraufnahmevermögen und Wasseraufnahme aus der Dampfphase

### 7.3.1 TONSTEINAGGREGATE

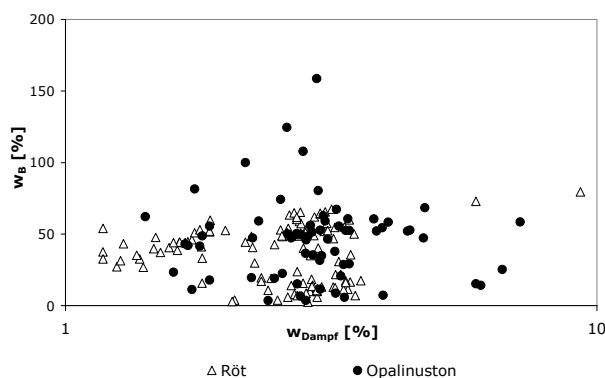
Es ist, wie erwartet, eine Positivkorrelation zwischen der spezifischen Oberfläche und der Menge adsorbierten Wasserdampfes erkennbar (Abbildung 41 und Abbildung 42). Die relativ hohe Streuung wird vor allem durch den versuchstechnisch bedingt großen Fehler bei der Messung der Wasserdampfaufnahme verursacht. Die über Wasserdampfaufnahme berechnete Fläche ist wie erwartet geringer, da das relativ große Wassermolekül (ca.  $1,4 \cdot 10^{-10}$  m nach SETZER 2005) nicht in so kleine Porenräume wie ein Stickstoffteilchen (ca.  $0,7 \cdot 10^{-10}$  m) eindringen kann.

Das Wasseraufnahmevermögen aus dem Enslin-Versuch steigt mit der aufgenommenen Wasserdampfmenge. Diese Korrelation ist etwas deutlicher als die mit der spezifischen Oberfläche (siehe Abbildung 43 und Abbildung 44).

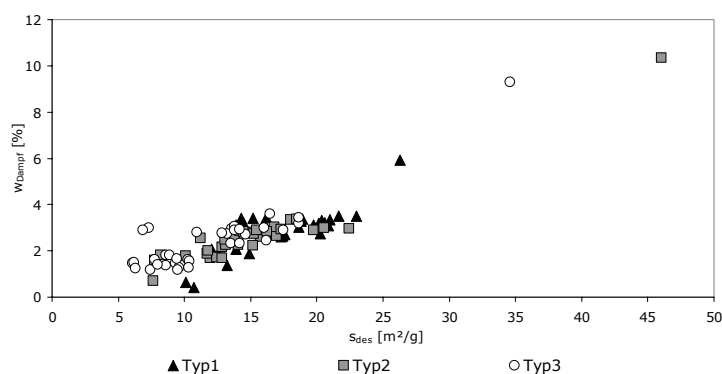
Die im Enslin-Versuch bestimmte Wasseraufnahmekapazität der Tonsteinaggregate ist nicht allein von der vorhandenen Oberfläche bestimmt (Abbildung 39). Vielmehr setzt sie sich aus einem adsorptiven Anteil und ein kapillaren Anteil zusammen. Die in den Aggregaten herrschende Saugspannung ist die treibende Kraft. Die kapillaren Kräfte in den Tonsteinaggregaten sind für die verwendete Filterplatte, die den kapillaren Wasseranstieg verhindern soll, zu groß. Die Wasseraufnahmekapazität steigt mit der spezifischen Oberfläche an (Abbildung 39 A), da der von der Oberfläche abhängige Adsorptionswasseranteil (Abbildung 39 B) in ihr enthalten ist. Das Kapillarwasser ist von der spezifischen Oberfläche unabhängig und korreliert folglich auch nicht mit der Wasserdampfadsorption (Abbildung 40). Das heißt, die spezifische Oberfläche kann nicht nur durch die Porengrößen bestimmt sein. Die Porenoberfläche muss durch unterschiedliche Rauigkeit gekennzeichnet sein.



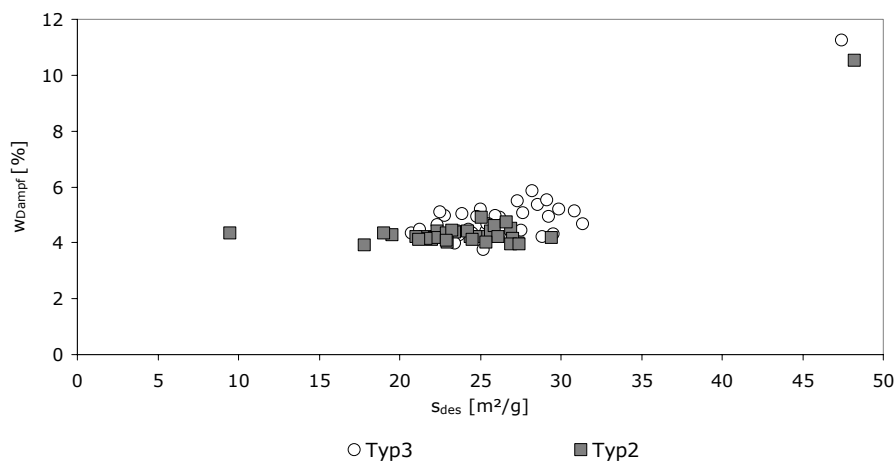
**Abbildung 39** A) Wasseraufnahme und spezifische Oberfläche, B) Wasserdampfadsorption und Spezifische Oberfläche – Einzelmessungen



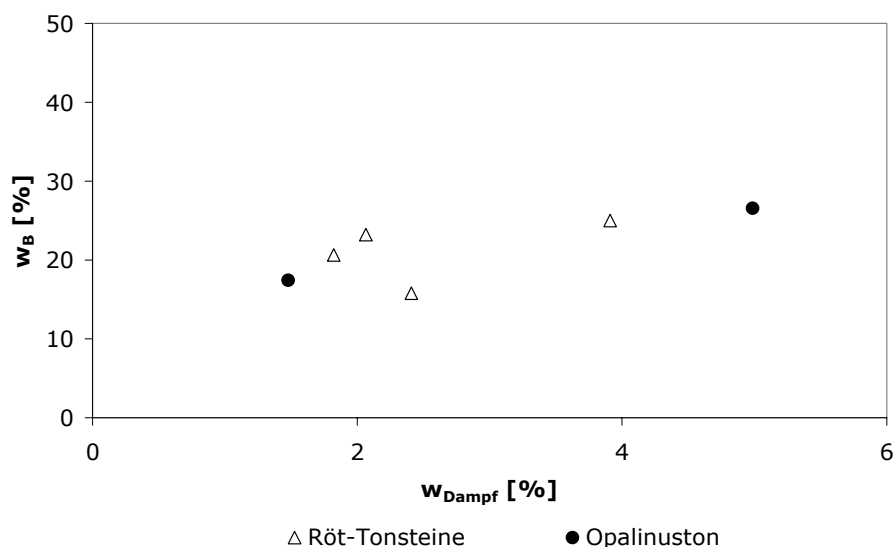
**Abbildung 40** Wasserdampfadsorption (logarithmischer Maßstab) und Wasseraufnahmekapazität – Einzelmessungen.



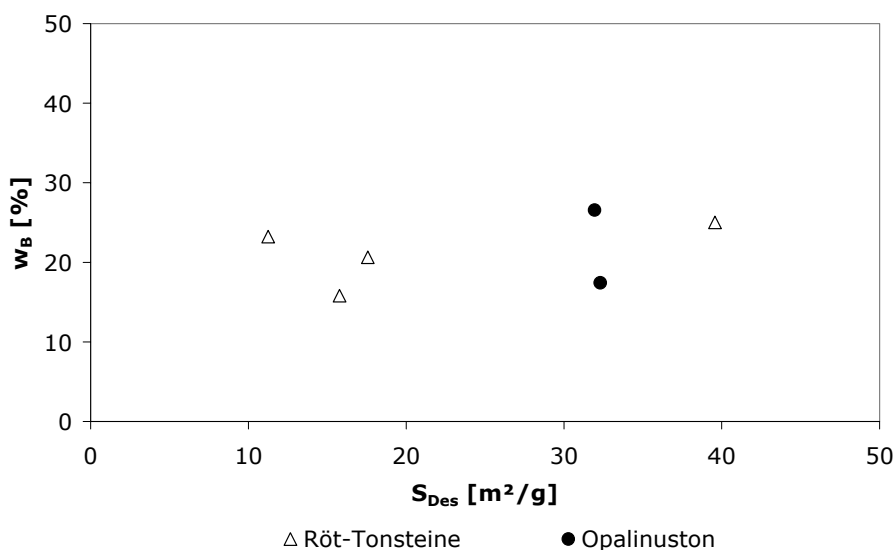
**Abbildung 41** Wasserdampfaufnahme und spezifische Oberfläche der gesiebten Aggregate - Röt-Tonstein (Deuna)



**Abbildung 42** Wasserdampfaufnahme und spezifische Oberfläche der gesiebten Aggregate - Opalinuston (Essingen).



**Abbildung 43** Wasseraufnahmevermögen (nach Enslin) und Aufnahme von Wasserdampf (aus den Siebfractionen berechnetes gewichtetes Mittel).

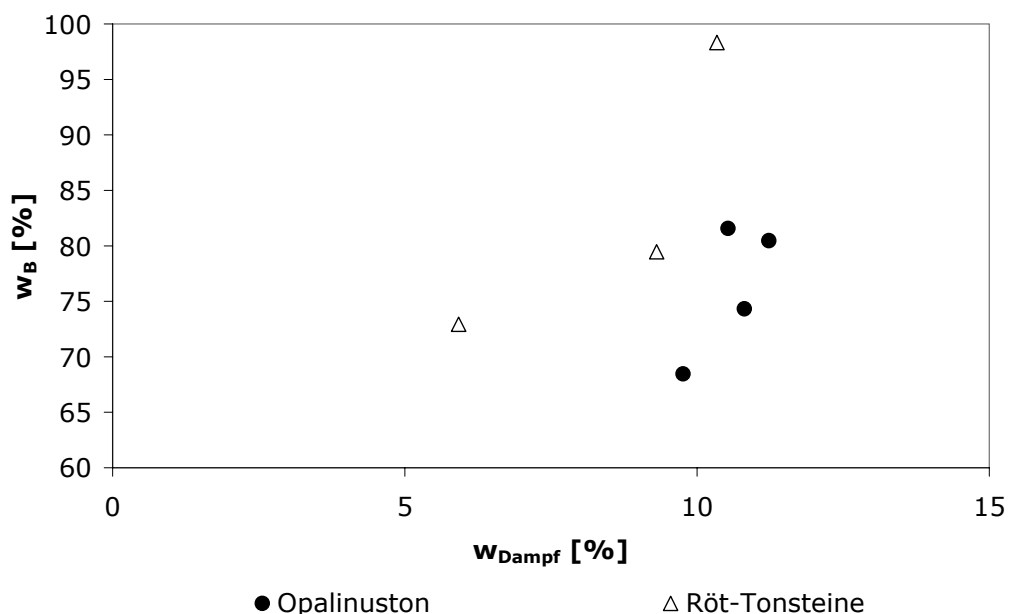


**Abbildung 44** Wasseraufnahmevermögen (nach Enslin) und Spezifische Oberfläche (aus den Siebfractionen berechnetes Mittel).

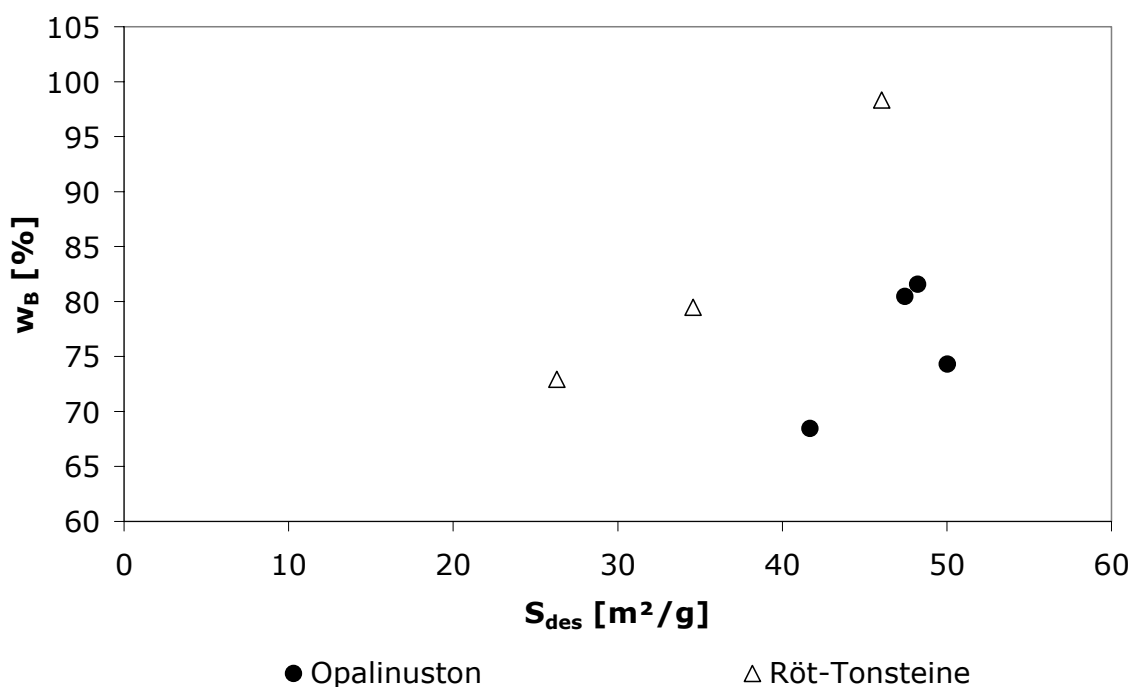


### 7.3.2 KORNFRAKTION < 2 $\mu\text{m}$

Betrachtet man die Tonfraktion, so gehen mit einer Erhöhung der spezifischen Oberfläche eine Erhöhung der Wasserdampfadsorption und eine Erhöhung des Wasseraufnahmevermögens einher, so dass alle drei Werte mäßig gut miteinander korrelieren. Hauptursache ist bei den Röt-Tonsteinen nicht der Verwitterungsgrad sondern unterschiedliche Korngrößenverteilungen. Im Falle des Opalinuston können die Korngrößenverteilungen allenfalls die niedrigeren Werte des Typs 4 erklären, da dieser eine etwas gröbere Kornverteilung hat. Es gibt einen erkennbaren Zusammenhang der Wasseraufnahme mit dem Illitgehalt (siehe 7.1).



**Abbildung 45** Wasseraufnahmevermögen und Wasserdampfadsorption der Fraktion < 2  $\mu\text{m}$  (Röt - Deuna, Opalinuston - Essingen).



**Abbildung 46** Wasseraufnahmevermögen in Abhängigkeit von der spezifischen Oberfläche der Fraktion < 2  $\mu\text{m}$  (Röt - Deuna, Opalinuston - Essingen).

## **7.4 Trocken- und Korndichte**

Die Dichtebestimmung erfolgte vor allem zur Charakterisierung des Verwitterungszustandes. Die fortschreitende Verwitterung geht mit einer Auflockerung des Gefüges einher, so dass bei stärker verwitterten Proben geringere Trockendichten zu erwarten sind. Die Korndichte wurde im Wesentlichen als Eingangsgröße für die Auswertung der Korngrößenanalysen des Feinanteils benötigt.

### **7.4.1 TROCKENDICHTE**

Die Dichte nimmt mit zunehmendem Verwitterungsgrad von 2,5 g/cm<sup>3</sup> bei Röt-Tonsteinen des Typs 1 und des Typs 2, über 2,2 g/cm<sup>3</sup> des Typs 3 bis 1,9 g/cm<sup>3</sup> des Typs 4 ab. Beim Opalinuston sind die Messungen der Dichte stärker verwitterter Proben auf Grund des sofortigen Zerfalls bei Wasserkontakt nicht gelungen. Jedoch hat der Typ 2 schon mit 2,2 g/cm<sup>3</sup> eine deutlich geringere Dichte als der Opalinuston des Verwitterungstyps 1 mit 2,4 g/cm<sup>3</sup>. Die Trockendichte des Schiepziger Tertiärton betrug 1,6 g/cm<sup>3</sup>.

### **7.4.2 KORNDICHTE**

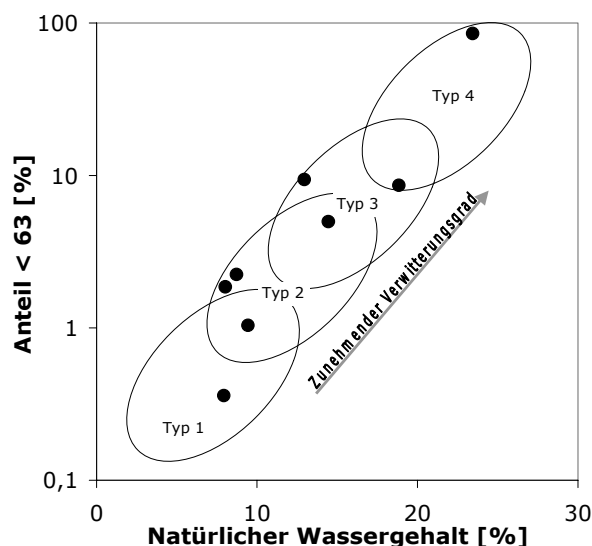
Die Korndichte der Röt-Tonsteine liegt zwischen 2,61 und 2,69 g/cm<sup>3</sup>. In einigen Fällen deutet sich in der 2. Dezimalstelle eine leichte Zunahme der Korndichte mit zunehmender Verwitterung an, das ist jedoch nicht an allen Profilen reproduzierbar und könnte auch dem zufälligen Messfehler geschuldet sein. Die Korndichte der Tonfraktion ist etwas höher und liegt für alle Verwitterungstypen um 2,70 g/cm<sup>3</sup>. Die Korndichten des Opalinustons, vor allem die der Tonfraktion, sind etwas geringer. Sie liegen um die 2,60 (Gesamtprobe) bzw. 2,57 g/cm<sup>3</sup> (Anteil < 2 µm). Diese Unterschiede zwischen Röt-Tonsteinen und Opalinuston werden in erster Linie durch den höheren Anteil an Eisenverbindungen mit hoher Dichte im Röt, bzw. dem höheren Anteil an organischen Verbindungen geringer Dichte im Opalinuston verursacht. In erster Linie wurde die Korndichte bestimmt, da sie für die Berechnung der Korngrößenverteilungen mittels Sedimentationsanalyse bzw. Lasergranulometrie als Eingangsgrößen erforderlich waren. Auf Grund der von der Verwitterung unabhängigen mineralischen Zusammensetzung (siehe 7.12) sind systematische Änderungen der Korndichte mit der Verwitterung nicht zu erwarten. Da die Messung im Heliumpyknometer an den nicht aufbereiteten Tonsteinaggregaten durchgeführt werden konnten, spiegeln Unterschiede der Korndichte im Wesentlichen Unterschiede der Zemente und auskristallisierten Porenfüllungen wieder.

## **7.5 Korngrößenbestimmung**

Durch die Siebung des vorsichtig getrockneten Materials wurde zunächst die Verteilung der Tonsteinaggregate bestimmt. Dabei lässt sich die Zunahme des Matrixanteiles (< 63 µm) mit zunehmenden Verwitterungsgrad feststellen. In Abbildung 47 ist der Matrixanteil gegen den natürlichen Wassergehalt, der mit zunehmender Verwitterung wächst, aufgetragen. Die Übergänge zwischen den einzelnen Verwitterungstypen sind aufgrund des kontinuierlichen Verwitterungsprozesses und nicht zuletzt wegen der willkürlichen subjektiven Klassifizierung fließend.

### **7.5.1 ZERFALL DURCH WIEDERHOLTE BEFEUCHTUNG UND TROCKNUNG**

Wird die getrocknete Probe mit Wasser versetzt, so wird ein deutliches Knistern hörbar und Aggregate zerfallen. Bei ausreichendem Wasserangebot ist eine Schaumbildung durch die entweichende Porenluft zu beobachten. „Die Hauptzerstörungsarbeit“ wird beim Eindringen des Wassers in den Porenraum geleistet. Als Ursachen sind das Lösen von dünnen Zementhäuten, das Aufbrechen von Feststoffbindungen bindiger Anteile mit hoher Trockenfestigkeit, die in eine flüssige Konsistenz übergehen, oder das Sprengen von Aggregaten durch kurzzeitige Porenfluidüberdrücke, wenn die Porenluft nicht schnell genug entweichen kann, denkbar.



**Abbildung 47** Zunahme des Feinkornanteil (< 63 µm) mit zunehmender Verwitterung.

Die systematische Verkleinerung der Tonsteinaggregate bei wiederholtem Trocknen und Befeuchten ist in der Verringerung des Medianwertes zu erkennen. Die Proben zerfielen in den ersten Zyklen deutlich stärker. Trägt man den jeweiligen Median gegen die Nummer des Trocknungs-Befeuchtungs-Zyklus auf, so nähern sich die Medianwerte mit zunehmender Siebungsnummer asymptotisch einer Aggregatgröße von etwa 100 µm an. Diese Beobachtung konnte gleichermaßen an den Röt-Tonsteinen und am Opalinuston gemacht werden (Abbildung 48). Die Kornverteilungskurven verlaufen annähernd parallel und verschieben sich mit jedem erneuten Trocknungs-Befeuchtungszyklus in den feinkörnigen Bereich. Durch die Bildung sekundärer Aggregate wird der Zerfallsprozess bei Vorhandensein von größeren Anteilen feinkörniger Substanz überlagert. Das feinkörnige Material < 63 µm bildet ab einem Anteil von über 5 % an der Gesamtmasse beim Trocknen relativ feste Klumpen, die nicht mechanisch aufgelöst werden konnten, ohne auch die halbfesten Tonsteinaggregate zu zerstören. Ein ähnlicher Effekt ist auch unter natürlichen Gegebenheiten zu erwarten, sofern das Feinmaterial nicht ausgespült wird. Die Verkleinerung der Tonsteinaggregate wird von einer Zunahme des Matrix-Anteiles begleitet (Abbildung 49).

Alles Material mit einer Korngröße < 63 µm wurde nicht mehr als Aggregat betrachtet. Es ist vor allem im Opalinuston nicht auszuschließen, das auch in dieser „Matrix-Fraktion“ noch kleinere Tonpartikel kleine Aggregate bilden, jedoch verhalten sich diese eher wie Einzelkörner der Schluffkorngröße, wie zum Beispiel die Versuche zum Wasseraufnahmevermögen zeigten.

Betrachtet man die Differenz der Medianwerte der Aggregatgrößenverteilung in der Originalverteilung und der Verteilung nach dem 5. Trocknungs-Befeuchtungszerfall und bezieht diese auf den Median des Ausgangsmaterials, veranschaulicht der erhaltene Wert  $Z$  (= Zerfallsneigung) die Verfeinerung des Materials, ohne für sich allein die tatsächlichen Verschiebungen in den Kornverteilungen ausreichend beschreiben zu können.

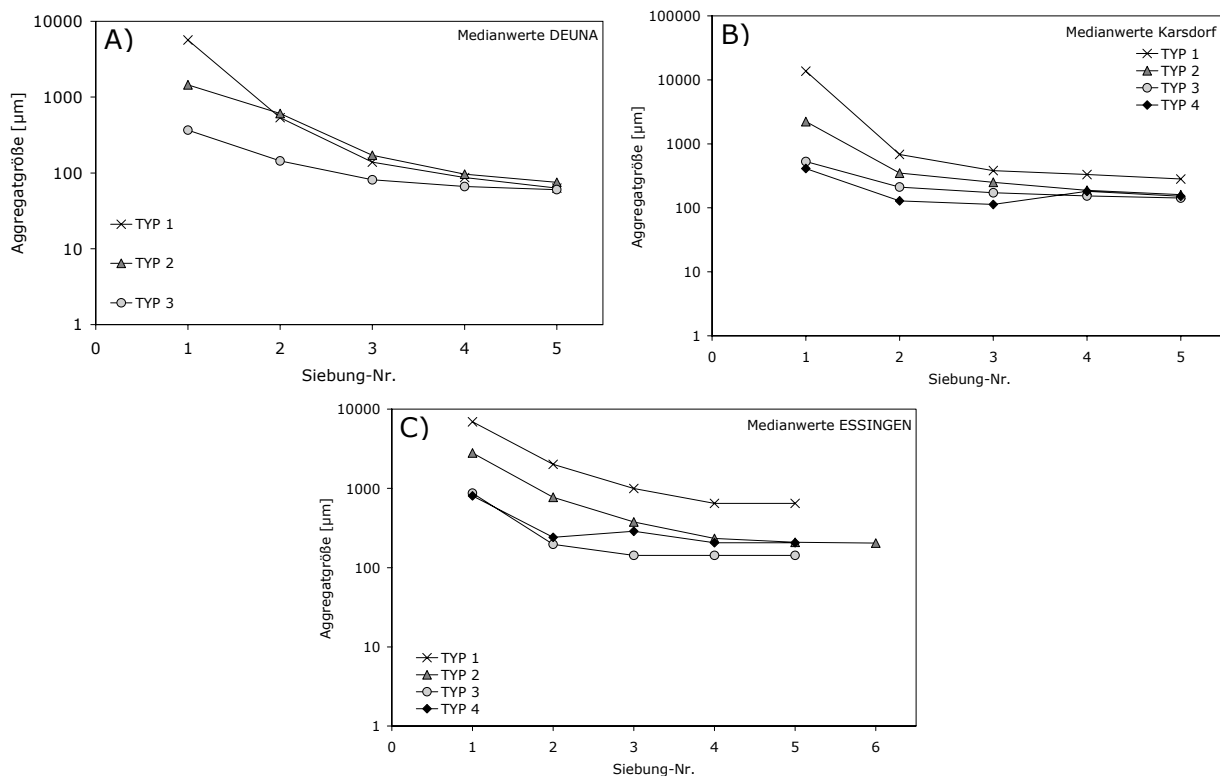
$$(48) \quad Z = \frac{D_{50/1} - D_{50/5}}{D_{50/1}}$$

Einen gleichen mittleren Aggregatdurchmesser für das Ausgangsmaterial vorausgesetzt, wird  $Z$  bei stärkerer Zerfallsneigung größer. Für die Berechnung wurden jeweils unterschiedlich verwitterte Tonsteine aus einem Verwitterungsprofil herangezogen (Tabelle 16). Die Zerfallsneigung nimmt mit zunehmendem Verwitterungsgrad ab. Dieser Effekt wird auch in den in Abbildung 50 dargestellten Aggregatverteilungskurven deutlich. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Kurven wird mit zunehmender Zykluszahl geringer. Die Werte

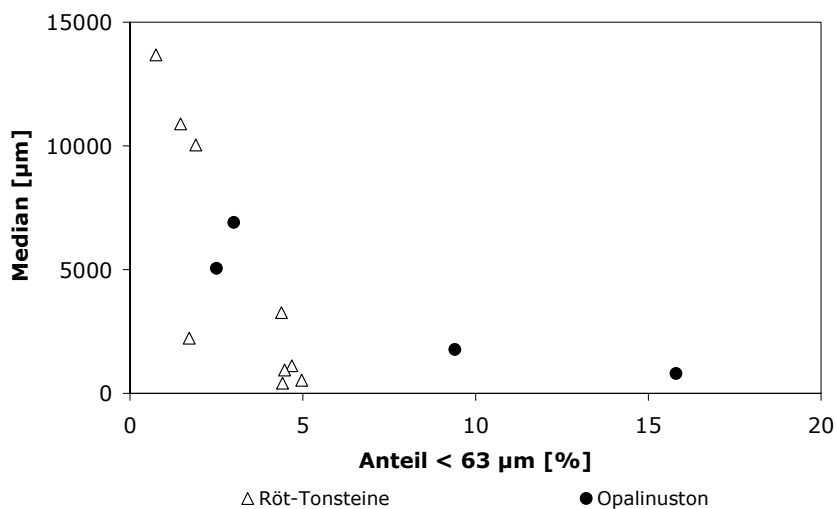
für die Zerfallsneigung von Röt-Tonsteinen liegen in einer Größenordnung von  $Z_{\text{Typ1}} = 0,98$  und  $Z_{\text{Typ4}} = 0,28$ . Die Werte der Zerfallsneigung des Opalinustons liegen zwischen  $Z_{\text{Typ1}} = 0,91$  und  $Z_{\text{Typ3}} = 0,63$ .

**Tabelle 16** Zerfallsneigung  $Z$  der unterschiedlich verwitterten Tonsteine aus drei Verwitterungsprofilen.

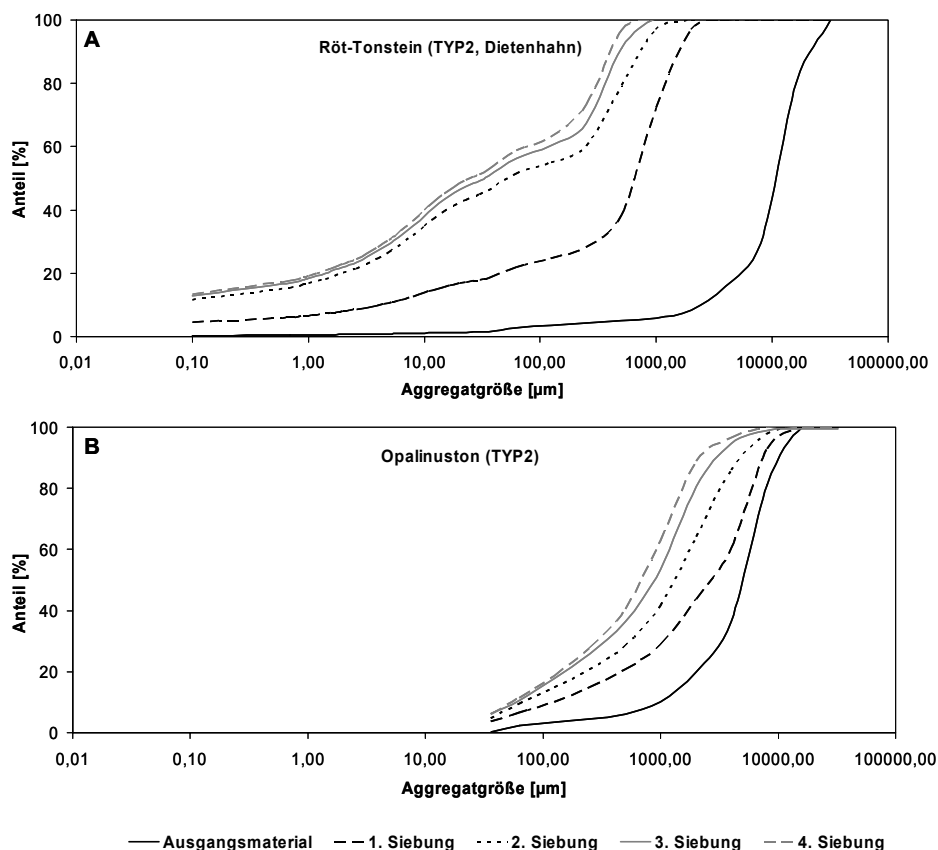
Verwitterungstyp	1	2	3	4
Röt-Tonsteine (Deuna)	0,96	0,84	0,76	0,28
Röt-Tonsteine (Karsdorf)	0,98	0,93	0,73	0,63
Opalinuston	0,91	0,86	0,63	0,74



**Abbildung 48** Medianwerte der Verwitterungszyklen: A) Röt-Tonsteine aus dem Verwitterungsprofil Deuna, B) Röt-Tonsteine aus dem Verwitterungsprofil Karsdorf, C) Opalinuston aus dem Verwitterungsprofil Essingen.



**Abbildung 49** Anteil der Korngrößenfraktion < 63 µm und Medianwerte der Aggregatgrößen nach der 1. Siebung.



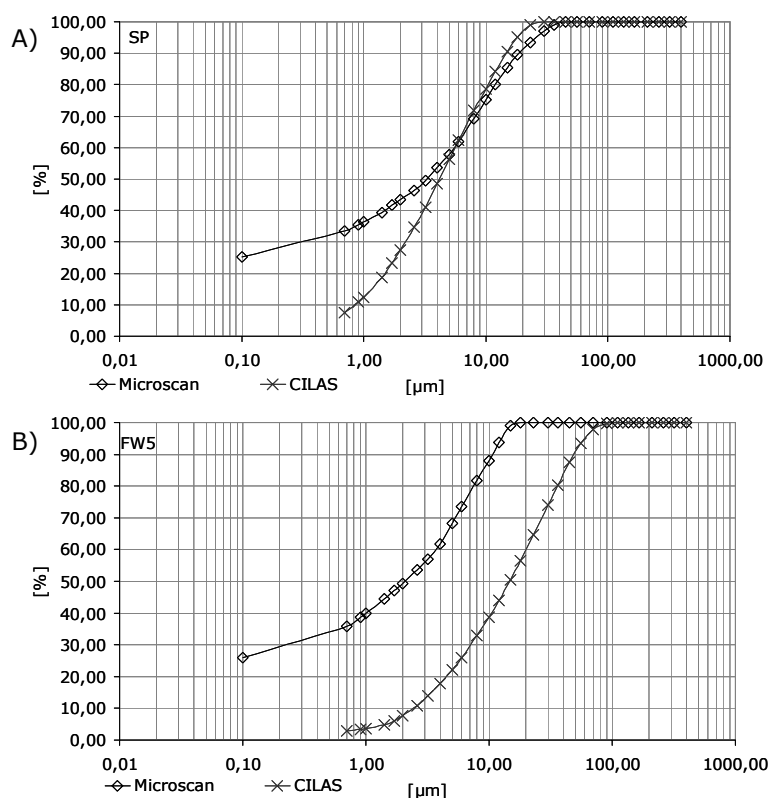
**Abbildung 50** „Verschiebung“ der Aggregatgrößenverteilung durch wiederholten Trocknungs-Befeuchtungszersfall.

### 7.5.2 VERGLEICH DER UNTERSCHIEDLICHEN MESSMETHODEN FÜR FEINANTEIL

Der Feinanteil ( $< 63 \mu\text{m}$ ) wurde mit unterschiedlichen granulometrischen Methoden bestimmt. Aufgrund der unterschiedlichen theoretischen Grundlagen ist nicht zu erwarten, dass die Ergebnisse der Korngrößenbestimmung durch Lasergranulometrie und Sedimentationsanalyse direkt vergleichbar sind. Wie Abbildung 51 zeigt, erscheint das gleich aufbereitete Material in der Sedimentationsanalyse wesentlich feinkörniger als in der Lasergranulometrie. Hauptursache hierfür dürfte die Partikelgeometrie sein. Durch die blättchenförmige Ausbildung der Tonpartikel stimmt der Äquivalentdurchmesser, der für die Berechnung des Massenanteils in der Sedimentationsanalyse herangezogen wird, trotz der Korrektur durch einen Formfaktor nur näherungsweise. Die durch den Laser gemessene Fläche ist von der Orientierung der Partikel in der Suspension abhängig. Durch die ständige Bewegung der Suspension während der Messung, befinden sich die Partikel in einer turbulenten Bewegung und sind beim Passieren des Laserstrahls unterschiedlich rotiert. Die Messung mit dem Lasergranulometer ergibt so systematisch eine Kornverteilung, die das Material grobkörniger erscheinen lässt, als die Sedimentationsanalyse mittels Röntgendetektion.

### 7.5.3 KORNGRÖßENVERTEILUNG DES FEINANTEILS

Der Anteil  $< 63 \mu\text{m}$  steigt mit zunehmender Verwitterung. Die Werte in Tabelle 17 beziehen sich auf den Feinanteil der ersten Siebung der Verwitterungsversuche nach vorsichtiger Trocknung. Die Werte des Matrixanteils erscheinen daher etwas niedrig, da der Feinanteil auf Grund seiner Trockenfestigkeit nach dem Trocknen nicht vollständig dispergiert war, sondern schwache Aggregate bildet, die beim Sieben nicht, bei Wasserkontakt jedoch sofort zerfallen. Der tatsächliche Tonsteinaggregatanteil der Proben des Typs 4 liegt unter 10 Masseprozent.



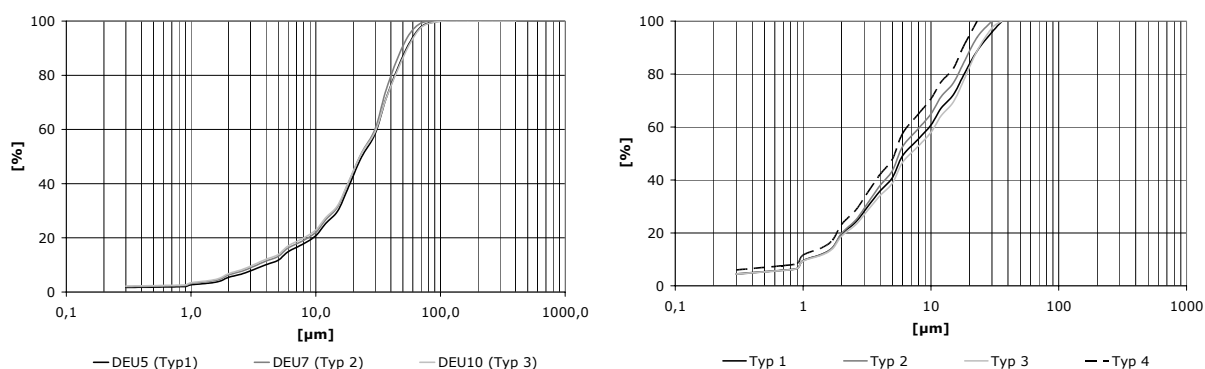
**Abbildung 51** Vergleich der Kornverteilungskurven des Anteils < 63 µm einer A) Typ 2 und B) Typ 4 – Probe ermittelt per Lasergranulometrie (CILAS) und Sedimentationsanalyse (Microscan).

Da für die systematischen Messungen aus den in 6.4 genannten Gründen die Lasergranulometrie verwendet wurde, ergeben sich Korngrößen im Schluffbereich. Grund hierfür ist die systematische im Vergleich zu Sedimentationsanalysen „Überschätzung“ der Korndurchmesser auf Grund der Partikelrotation durch diese Methode.

Die Kornverteilungskurven unterschiedlich verwitterter Proben eines zusammengehörigen Verwitterungsprofils weichen nicht stärker als Wiederholungsmessungen der gleichen Probe voneinander ab (Abbildung 52). Der mittlere Korndurchmesser und andere Perzentilwerte ändern sich zwischen den Verwitterungstypen kaum. Die beobachtbaren nicht systematischen Abweichungen sind eher zufälligen Streuungen bei der Probennahme geschuldet. Der Anteil von Partikeln < 2 µm in der Matrixfraktion steigt mit zunehmender Verwitterung geringfügig an.

**Tabelle 17** Korngrößenanteile an der Gesamtprobe und Perzentilwerte der Feinkornfraktion der Röt-Tonsteine (Verwitterungsprofil Deuna) und des Opalinustons (Verwitterungsprofil Essingen).

Röt-Tonsteine				
	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
<b>Anteil &lt; 63µm</b>	7,9 %	8,0 %	13,0 %	87,9 %
<b>Anteil &lt; 2µm</b>	5,4 %	6,3 %	6,8 %	7,0 %
<b>D10</b>	4,9 µm	4,3 µm	3,9 µm	2,6 µm
<b>D50</b>	30,2 µm	29,5 µm	29,5 µm	19,6 µm
<b>D90</b>	67,4 µm	61,3 µm	68,3 µm	67,3 µm
Opalinuston				
	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
<b>Anteil &lt; 63µm</b>	3,0 %	2,5 %	9,4 %	15,8 %
<b>Anteil &lt; 2µm</b>	2,6 %	1,7 %	5,8 %	8,7 %
<b>D10</b>	0,5 µm	0,5 µm	0,5 µm	0,5 µm
<b>D50</b>	1,6 µm	1,7 µm	1,6 µm	2,3 µm
<b>D90</b>	6,9 µm	8,4 µm	7,2 µm	15,4 µm



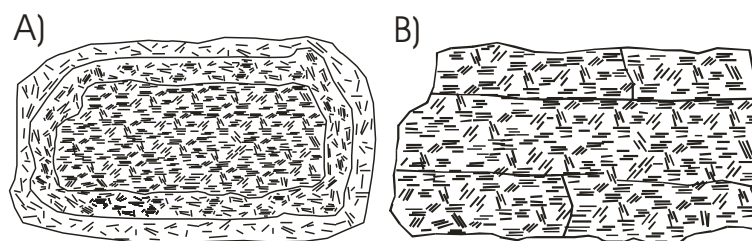
**Abbildung 52** Korngrößenverteilungen des Anteils < 63 µm (im Lasergranulometer gemessen); A) Röt-Tonsteine Deuna, B) Opalinuston Essingen.

## 7.6 Modellvorstellung des veränderlichen Tonsteingefüges

Anhand dieser Versuchsergebnisse lässt sich zunächst zusammenfassend feststellen, dass Röt-Tonsteine und Opalinuston offenbar strukturelle Unterschiede haben. Während beim Opalinuston die spezifische Oberfläche und die an die vorhandene Fläche gebundene Wasserdampfadsorption von der Aggregatgröße und Verwitterungsgrad unabhängig sind, steigen beide Werte im Röt mit zunehmender Tonsteinaggregatgröße an, nehmen aber mit fortschreitender Verwitterung ab. Bei der Wasseraufnahme nach Enslin / Neff, unterscheidet sich das Verhalten der unterschiedlichen Tonsteine jedoch kaum. Partikel und Aggregate < 125 µm haben ein vom Verwitterungsgrad unabhängiges Wasseraufnahmevermögen und verhalten sich wie ein bindiger Boden. Die Wasseraufnahmekapazität von Aggregaten > 500 µm nimmt mit zunehmender Verwitterung zu. Auch im Zerfallsverhalten unterscheiden sich Röt-Tonsteine und Opalinuston deutlich.

In Röt-Tonsteinen findet die Auflockerung der einzelnen Aggregate durch allmähliche Verwitterung von außen nach innen statt. Dadurch wird eine stärker aufgelockerte Schicht mit erhöhter Porosität gebildet, während sich zum Inneren hin der Auflockerungsgrad verringert. Mit zunehmender Verwitterung wird die äußere aufgelockerte Schicht dispergiert und damit der Anteil plastischer Matrix erhöht. In-situ liegt folglich ein Gemisch aus den verschiedenen Aggregat-Größen und nicht mehr aggregierter Matrix vor. Die Matrix ist ein weitestgehend replastifizierter Ton, der keine Aggregate mehr enthält.

Im Opalinuston bleibt die spezifische Oberfläche in allen Aggregatfraktionen gleich. Das bedeutet, dass sich während des Zerfallsprozesses keine wesentlichen Veränderungen in der Porenraumstruktur einstellen können. Die Opalinuston-Aggregate zerbrechen entlang von Partikelgrenzen (Abbildung 53), ohne dass sich die Eigenschaften des Aggregates dabei wesentlich ändern. Erst bei einer ausreichenden Zerkleinerung, verhalten sich die Tonsteinaggregate wie ein bindiger Boden, so dass sich die Eigenschaften des Gemischs ändern. Deshalb bestehen im Gesamtverhalten des verwitterten Materials Gemeinsamkeiten mit den Röt-Tonsteinen, obwohl es sich bei der Matrix nicht um einen replastifizierten Ton aus einzelnen Tonpartikeln handelt.



**Abbildung 53** Zerfallsmechanismen der Tonsteinaggregate: A) Zwiebelschalenartige Verwitterung; B) Zerbrechen entlang von Partikelgrenzen.

## 7.7 Direkter Scherversuch im Rahmenschergerät

In den Kapiteln 7.7.1 und 7.7.2 erfolgt ein Exkurs zu dem im Vergleich zu den Tonsteinen nur schwach überkonsolidierten Tertiärton, der dabei ein relativ homogenes Gefüge besitzt. Es soll einerseits der Einfluss der Schergeschwindigkeit auf die Festigkeit näher untersucht werden. Andererseits sollen die Versuche mit dem bindigen Material den Zusammenhang der Saugspannung mit dem Festigkeitsverhalten des ungesättigten Materials besser zu verstehen helfen. Es ist zu erwarten, dass die Ergebnisse von Versuchen mit diesem homogenen und schwach überkonsolidierten Material nur bedingt auf die inhomogenen Tonsteine zu übertragen sind (7.7.3).

### 7.7.1 EXPERIMENTE ZUM EINFLUSS VON VORSCHUBGESCHWINDIGKEIT, WASSERGEHALT UND DICHTHE AUF DIE SCHERFESTKEIT EINES SCHWACH ÜBERKONSOLIDierten TONS

Die im Folgenden betrachteten Scherversuche wurden im Wesentlichen unter Wasserbedeckung durchgeführt. Es war während des Versuchs eine Wasseraufnahme durch die Proben möglich, die einen Ausgleich für die unterschiedlichen Einbauwassergehalte schaffen konnte. Die relativ starken Schwankungen im Ausgangswassergehalt konnten nicht vermieden werden, da bei der Vielzahl der Versuche zum Einen eine mehrfache Probennahme bei zum Teil unterschiedlichen Witterungsbedingungen erforderlich war und zum Anderen relativ lange Lagerungszeiten der Proben zustande kamen.

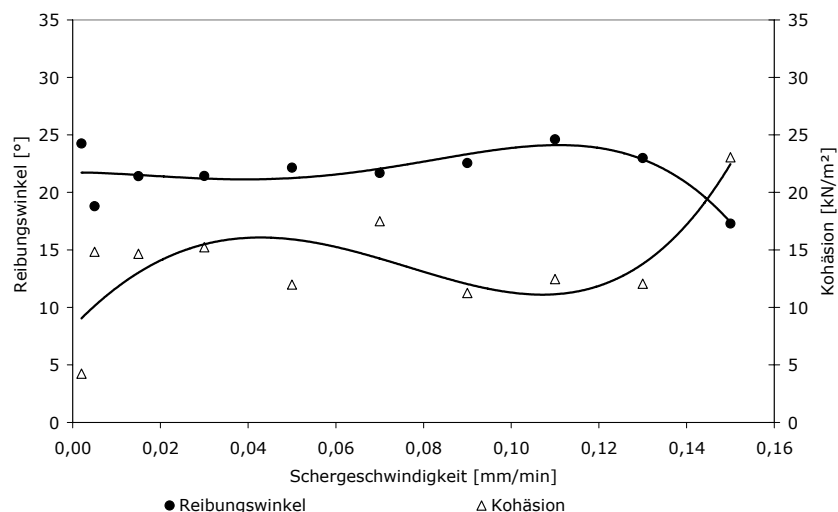
Die Bruchkräfte der Einzelversuche nehmen mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit bei Vertikalspannungen von 10 bis 200 kN/m<sup>2</sup> mit einem mehr oder weniger linearen Trend zu. Lediglich für eine Auflastspannung von 100 kN/m<sup>2</sup> lässt sich ein solcher Trend nicht beobachten. Die Bruchkräfte sind hier bei allen Vorschubgeschwindigkeiten annähernd gleich. Dadurch ergeben sich für die Schergerade unterschiedliche Steigungen (Abbildung 60). Je höher die Bruchkräfte bei den niedrigeren Vertikalspannungen sind, umso flacher wird die Schergerade. So ergeben sich bei niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten und Vertikalspannungen < 100 kN/m<sup>2</sup> in der Größenordnung zwischen 18 und 25 ° höhere Reibungswinkel als bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten. Für Vertikalspannungen > 100 kN/m<sup>2</sup> ergeben sich für die langsamen Versuche kleinere Reibungswinkel und höhere Kohäsionsbeträge. Bei den schnellsten Versuchen dieser Serie ergab sich jedoch wieder ein wesentlich geringerer Reibungswinkel. Die Kohäsionskräfte verhalten sich genau umgekehrt. In Abbildung 54 sind nur Teilversuche mit Vertikalspannungen bis 100 kN/m<sup>2</sup> berücksichtigt. Die Werte von Reibungswinkel und Kohäsion sind im Grunde alle für den untersuchten tertiären Ton plausibel.

Keinen Einfluss hat die Vorschubgeschwindigkeit auf das Volumenänderungsverhalten. Das Material verhält sich bis zum Bruch kontraktant. Bei der niedrigeren Vertikalspannung (10 und 25 kN/m<sup>2</sup>) kommt es gelegentlich zu geringfügig dilatanten Verhalten, nachdem der Peak der Scherspannung erreicht war. Die meisten Proben zeigen jedoch auch nach dem Bruch noch eine Volumenverringerung. Zum Teil verhielten sich die Proben bei 10 kN/m<sup>2</sup> Auflast während des gesamten Versuchs volumenkonstant. Die Scherversuche bei 0,002, 0,005, 0,015, 0,050 und 0,130 mm/min Schergeschwindigkeit zeigten ausschließlich kontraktantes Verhalten. Bei den Versuchen mit 0,03, 0,07, 0,09, 0,11 und 0,15 mm/min trat bei den geringeren Vertikalspannungen nach Eintreten des Bruchs eine Volumenzunahme auf.

Wassergehalt und Einbaudichte sind weitestgehend voneinander unabhängig, da letztere durch den gestörten Einbau am stärksten beeinflusst war. Der mittlere Wassergehalt war 26,1 % mit einer Standardabweichung von 4,8 % bei 130 präparierten Proben. Der Einbau erfolgte mit einem Sättigungsgrad zwischen 0,68 und 0,82, was einem Wassergehalt von 23,5 bis 28,5 % entspricht. Die sich einstellenden Ausbauwassergehalte sind in der Regel etwas höher und korrelieren nicht mit den Einbauwassergehalten. Durch die Wasserlagerung im Versuch stellte sich ein dem Spannungsniveau entsprechendes Wassergehaltsgleichgewicht ein. Die Sättigungsgrade nach Scherversuch betragen 0,73 bis



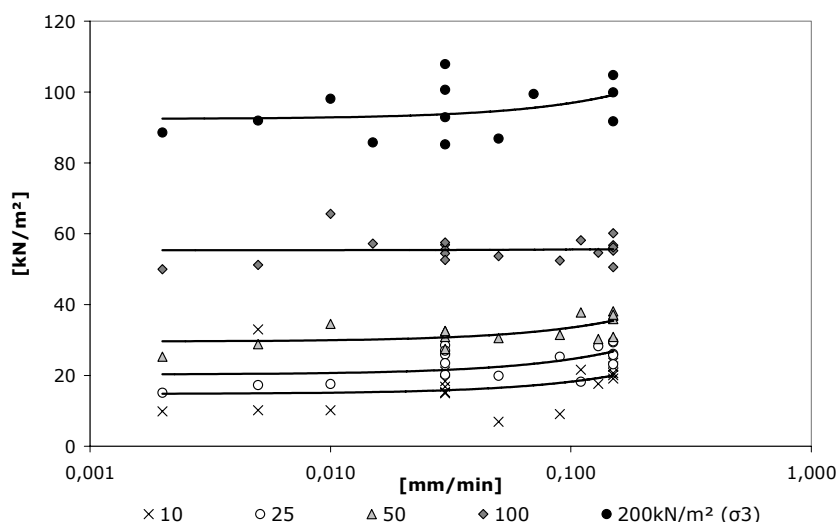
1,00, wobei die niedrigeren Wassergehalte höheren Vertikalspannungen zuzuordnen sind. Die Standardabweichung der Endwassergehalte von Wiederholungsversuchen bei gleicher Vertikalspannung und Vorschubgeschwindigkeit ist  $< 1\%$ . Es gibt keinen erkennbaren Zusammenhang zwischen der Abschergeschwindigkeit und dem Endwassergehalt. Deshalb ist davon auszugehen, dass in allen Versuchen ausreichend Zeit war, um die den Spannungsbedingungen entsprechende Wassermenge aufzunehmen.



**Abbildung 54** Reibungswinkel und Kohäsion in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit (nur Teilversuche bis  $100\text{ kN/m}^2$  berücksichtigt).

Die mittlere Einbaudichte betrug  $2,02\text{ g/cm}^3$ . Dabei gab es Schwankungen zwischen  $1,92$  und  $2,17\text{ g/cm}^3$ . Diese Extremwerte bildeten jedoch die Ausnahme. Die Standardabweichung der Dichte bei 130 gestört präparierten Proben betrug  $1,9\%$ . Bereits geringe Dichteunterschiede wirken sich gravierend auf die Bruchkräfte aus. Bei langsamer Vorschubgeschwindigkeit ( $0,03\text{ mm/min}$ ) steigen die Bruchkräfte mit zunehmender Dichte linear an. So erreicht der Versuch mit  $10\text{ kN/m}^2$  Vertikalspannung bei einer Dichte von  $1,98\text{ g/cm}^3$  eine Bruchspannung von  $14,66\text{ kN/m}^2$  und bei einer Dichte von  $2,11\text{ g/cm}^3$  eine Bruchspannung von  $21,14\text{ kN/m}^2$ . Ähnlich verhält es sich mit den anderen Laststufen. Die genauen Zahlenwerte sind Tabelle 18 zu entnehmen. In schnellen Scherversuchen mit einer Vorschubgeschwindigkeit von  $0,15\text{ mm/min}$  lässt sich kein so deutlicher Zusammenhang feststellen. Bei  $10\text{ kN/m}^2$  Vertikalspannung gibt es keine signifikanten Unterschiede der Scherspannung in Abhängigkeit von der Dichte. Bei einer Vertikalspannung von 25 und  $50\text{ kN/m}^2$  scheint die Scherspannung mit zunehmender Dichte abzunehmen. Im Falle der Versuche mit  $100\text{ kN/m}^2$  Vertikalspannung zeigten die Werte wieder einen leicht steigenden Trend (Tabelle 18). Bei Versuchen mit  $0,15\text{ mm/min}$  Vorschubgeschwindigkeit und  $200\text{ kN/m}^2$  Auflast variierten die Einbaudichten nur gering zwischen  $2,03$  und  $2,04\text{ g/cm}^3$ . Die dazugehörigen Scherfestigkeiten nahmen mit zunehmender Dichte ab.

Die gerätebedingte Streubreite der Bruchspannung liegt bei niedrigeren Vorschubgeschwindigkeiten ( $0,03\text{ mm/min}$ ) unabhängig von der beaufschlagten Vertikalspannung im Bereich von  $10\text{ kN/m}^2$ . Das bedeutet im Fall der verwendeten Überlagerungsspannungen bei der niedrigsten  $100\%$  bei der höchsten immer noch  $5\%$  der Vertikalspannung. Bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten ( $0,15\text{ mm/min}$ ) bzw. größeren Vertikalspannungen ( $200\text{ kN/m}^2$ ) wird die Streubreite zum Teil sogar noch größer. Die Standardabweichungen von Wiederholungsversuchen bei gleicher Vertikalspannung und Vorschubgeschwindigkeit betragen zwischen  $1,8$  und  $11,5\text{ kN/m}^2$  (siehe Tabelle 18) Die Streubreite äußert sich teilweise auch in einer unbefriedigenden Korrelation der Teilversuche.



**Abbildung 55** Bruchspannung in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit.

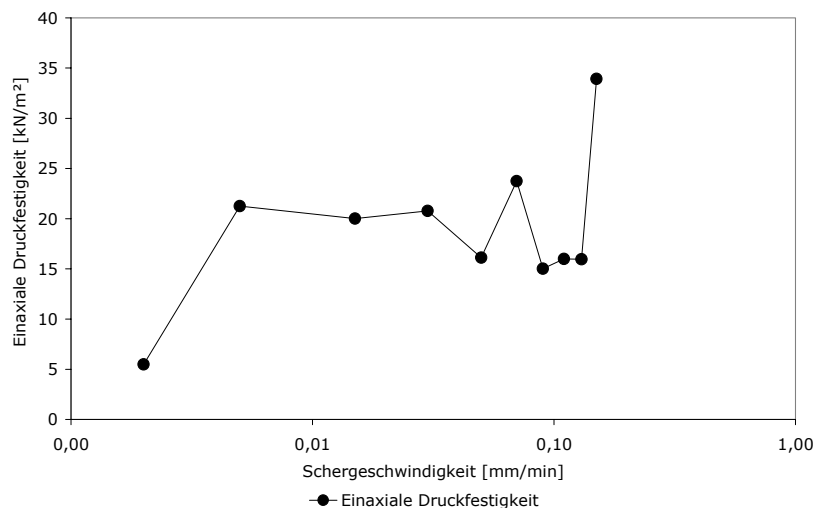
**Tabelle 18** Minimale und maximale Einbaudichten des Tertiärtons und ihre zugehörigen Bruchspannungen sowie Standardabweichungen *S* der Wiederholungsversuche (bei 10, 25, 50, 100 kN/m<sup>2</sup> *n*=9, bei 200 kN/m<sup>2</sup> Vertikalspannung *n*=4)

Vertikalspannung [kN/m <sup>2</sup> ]	0,03 mm/min				0,15 mm/min		
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	<i>S</i> [kN/m <sup>2</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	<i>S</i> [kN/m <sup>2</sup> ]	
10	1,98	14,66	2,30	1,99	19,13	2,98	
	2,11	21,14		2,04	20,06		
25	1,99	24,99	3,79	2,01	37,18	4,89	
	2,12	28,54		2,05	29,31		
50	2,01	27,46	4,20	2,02	47,21	5,32	
	2,04	32,40		2,06	35,95		
100	2,03	54,06	1,79	1,99	52,15	3,42	
	2,07	57,55		2,05	55,23		
200	2,02	85,23	11,52	2,03	104,78	6,59	
	2,06	107,87		2,04	99,91		

Aus Reibungswinkel und Kohäsion kann man bei Annahme einer geraden Grenzbedingung (nach MOHR) auf die einaxiale Druckfestigkeit schließen:

$$(49) \quad q_u = \frac{2c}{\tan(45^\circ - \varphi/2)}$$

Diese liegt im Bereich von 15 bis 24 kN/m<sup>2</sup>, wenn man zur Berechnung Reibungswinkel und Kohäsion aus den Versuchen mit 0,005 bis 0,130 mm/min Vorschubgeschwindigkeit heranzieht. In diesem Bereich gibt es keinen Zusammenhang zwischen Festigkeit und gewählter Schergeschwindigkeit, wie Abbildung 56 zeigt. Betrachtet man jedoch die Geschwindigkeitextrema, so wird deutlich, dass sich aus der Scherfestigkeit bei 0,002 mm/min Vorschubgeschwindigkeit eine mit 5,5 kN/m<sup>2</sup> sehr geringe einaxiale Druckfestigkeit ergibt. Hingegen erreicht die einaxiale Druckfestigkeit für den Versuch mit 0,150 mm/min Vorschubgeschwindigkeit rechnerisch ein Maximum der einaxialen Druckfestigkeit von 34 kN/m<sup>2</sup> (Abbildung 56). Die geringe Festigkeit bei der langsamsten Schergeschwindigkeit könnte das Resultat von Kriechvorgängen sein. Betrachtet man die Ausbildung der Scherfuge bei unterschiedlichen Schergeschwindigkeiten, so entsteht bei langsamen Versuchen eine ebene Gleitfuge mit einer deutlichen Striemung, während bei höheren Schergeschwindigkeiten Abrisse zu erkennen sind. Das Versagen tritt demzufolge eher spontan in Form eines Sprödbrechens auf. Bei schneller Belastung wird ähnlich wie bei einaxialen Druckversuchen eine größere Festigkeit erreicht.



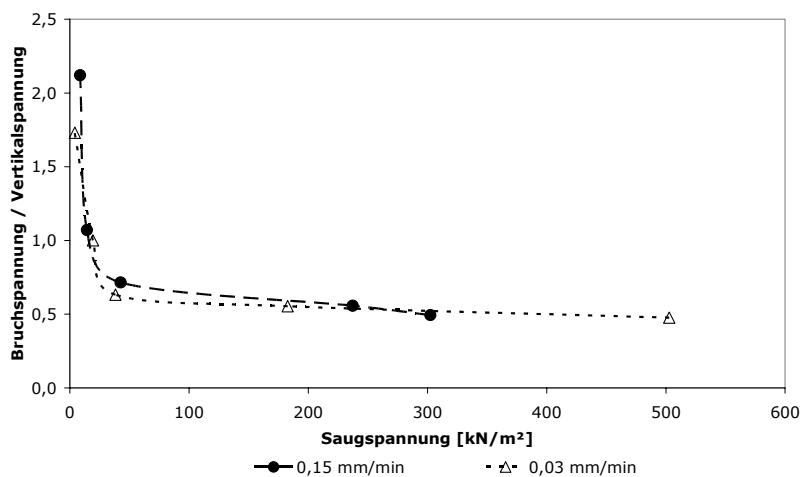
**Abbildung 56** Einaxiale Druckfestigkeit (errechnet aus Reibungswinkel und Kohäsion) in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit.

In Versuchen ohne Wasserbedeckung konnte keine Sättigung während des Schervorgangs erfolgen. Im Porenraum herrscht also eine dem Sättigungsgrad entsprechende Saugspannung. Diese wirkt als allseitiger Druck auf das Korngerüst. Im Bereich niedriger absoluter Spannungen erfolgt eine rasche Abnahme von  $\tau/\sigma$ , die dann asymptotisch gegen 0,5 ausläuft (Abbildung 57). Dabei wird der annähernd horizontale Kurvenanteil bei langsamerer Vorschubgeschwindigkeit eher erreicht. Das Verhältnis  $\tau/\sigma$  ist bei den niedrigeren Vertikalspannungen von 10 und 25 kN/m<sup>2</sup> in der Regel  $\geq 1$ , bei den höheren Vertikalspannungen von 50, 100 und 200 kN/m<sup>2</sup> eher  $< 1$ . Das Verhältnis  $\tau/\sigma$  wird umso kleiner, je größer die am Versuchsende wirkende Saugspannung ist (Abbildung 57).

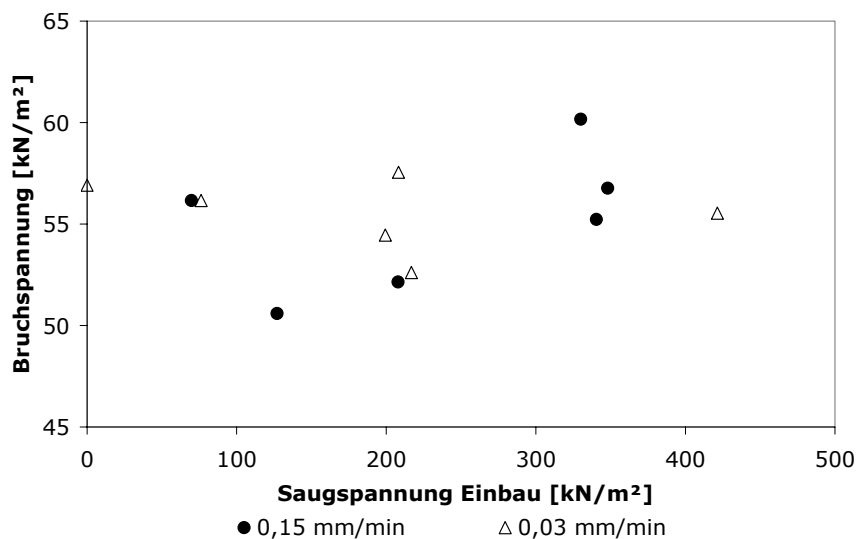
Die tatsächlich am Bruchpunkt herrschende Saugspannung ist unbekannt. Es ist davon auszugehen, dass sie im Mittelwert für die gesamte Probe höher als die am Versuchsende ist, da erstens die Probe während des Versuchs unter Wasserbedeckung auch nach dem Versagen noch Wasser aufnimmt und zweitens durch die Verringerung des Porenanteils eine Erhöhung des Sättigungsgrades stattfindet. Die Bruchspannung steigt mit zunehmender Saugspannung (Abbildung 58). Auch die „Rest“-Scherspannung steigt mit der Saugspannung am Versuchsende.

Die Bruchspannungen unter gleicher Auflast weichen bis zu 10 kN/m<sup>2</sup> voneinander ab. Die Saugspannung streut am Versuchsende unabhängig von der beaufschlagten Vertikalspannung um 2 Zehnerpotenzen zwischen 10 und 1000 kN/m<sup>2</sup> (Abbildung 59). Daraus ergibt sich, dass auch das Spannungsverhältnis Scherspannung / Vertikalspannung mit der Saugspannung zunimmt. Bei niedriger Auflast stellt die Saugspannung die größte Spannungsponente dar. In diesem Fall ist dann die Scherspannung die zweitgrößte Spannungsponente. Wenn die Vertikalspannung die Saugspannung übersteigt, haben die gemessene Scherspannung und die Saugspannung eine ähnliche Größenordnung, der Sättigungsgrad liegt dann etwas höher zwischen 77 und 80 %. (Die im Atterberg-Versuch bestimmte Fließgrenze entspricht einem Sättigungsgrad von 98 % und die Ausrollgrenze 67 %).

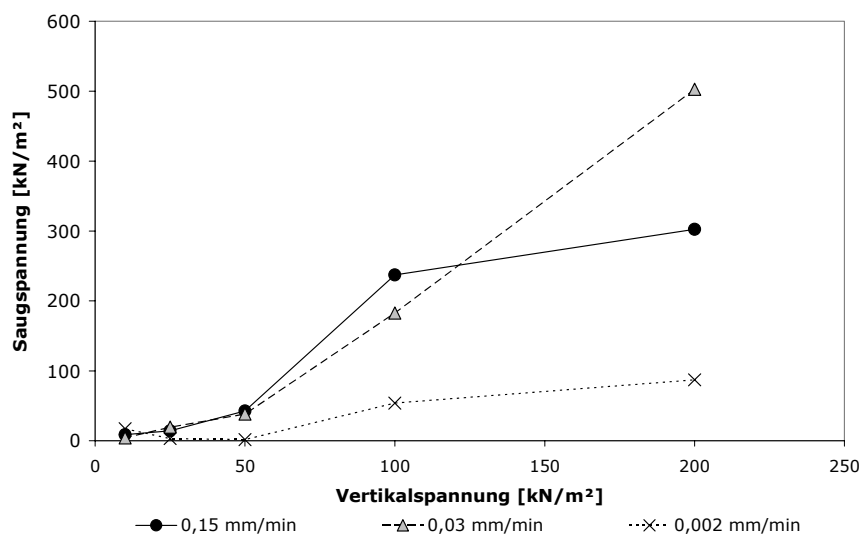
Da die Streubreite unabhängig von den absoluten Spannungen ist, könnten auch Laufwiderstände der Parallelführung bzw. Schubspannungen der beiden Rahmen gegeneinander eine Rolle spielen. Des Weiteren können Reibungskräfte zwischen Probe und oberem Scherrahmen bzw. Zwängungen bei dilatantem Probenverhalten (STOEWAHSE & BLÜMEL 2001) je nach verwendetem Gerät unterschiedlich ausgeprägt sein. Verschiedene Autoren beschrieben die Schubspannung der leeren Scherrahmen gegeneinander zwischen unter der Messgenauigkeit des Gerätes und 3 kN/m<sup>2</sup> (THERMANN et al. 2005, GOLDSCHIEDER 2003). Die „Leerlaufspannung“ des verwendeten Gerätes ist kleiner als die Messgenauigkeit der verwendeten Kraftmesseinrichtung.



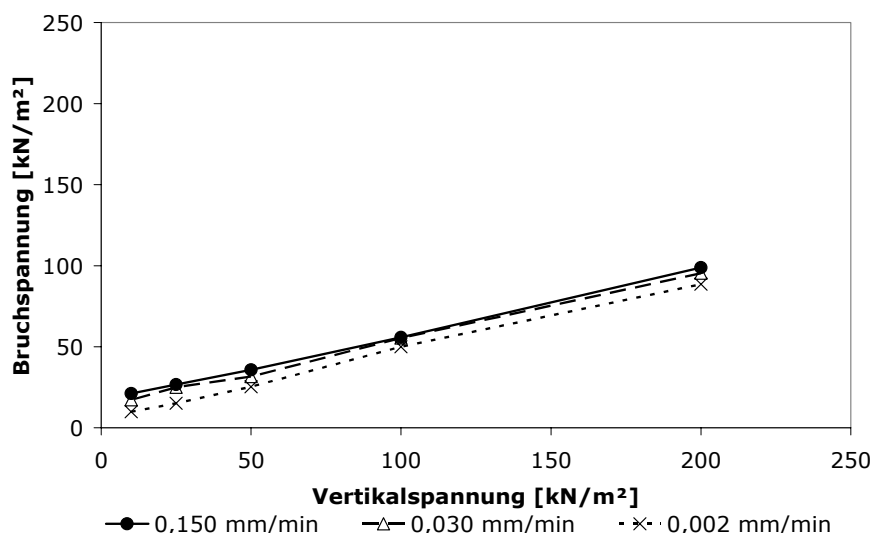
**Abbildung 57** Spannungen im Scherversuch (Versuche an Proben mit natürlichem Wassergehalt ohne Wasserbedeckung).



**Abbildung 58** Bruchspannung in Abhängigkeit von der Saugspannung bei  $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$ .



**Abbildung 59** Saugspannung bei Versuchsende in Abhängigkeit von der Vertikalspannung bei gleichem Einbauwassergehalt.



**Abbildung 60**  $\tau$ - $\sigma$ -Diagramm unter Wasserbedeckung bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten: dargestellte Spannungen sind Mittelwerte von statistischen Wiederholungsversuchen.

Verwendet man für die Saugspannungskurve den Ansatz nach FREDLUND & XING (1994), kann man die Scherfestigkeit für teilgesättigten Böden indirekt bestimmen (VANAPILLI et al., 1996), wenn man die effektiven Scherparameter im gesättigten Zustand  $c'$  und  $\varphi'$  und die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung (SWCC) kennt. Die Scherspannung  $\tau$  als Funktion der Netto-Normalspannung ( $\sigma - u_a$ ) und der Saugspannung  $s$  wird dann durch folgenden Zusammenhang beschrieben (VANAPILLI et al., 1996):

$$(50) \quad \tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + s \left[ (\tan \varphi') \left( \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \right]$$

wobei  $\theta_w$  der volumetrische Wassergehalt beim Scheren,  $\theta_s$  der volumetrische Wassergehalt bei Sättigung und  $\theta_r$  der volumetrische Residualwassergehalt sind. Der für die Berechnung erforderliche Porenluftdruck konnte im Scherversuch nicht direkt gemessen werden. Durch Umstellung der effektiven Spannungsgleichung nach BISHOP (1959) zur Beschreibung des Spannungszustandes eines ungesättigten Bodens, konnte  $u_a$  für eine bestimmte Vertikalspannung aus den gemessenen Scherwiderständen und der Saugspannungskurve näherungsweise bestimmt werden:

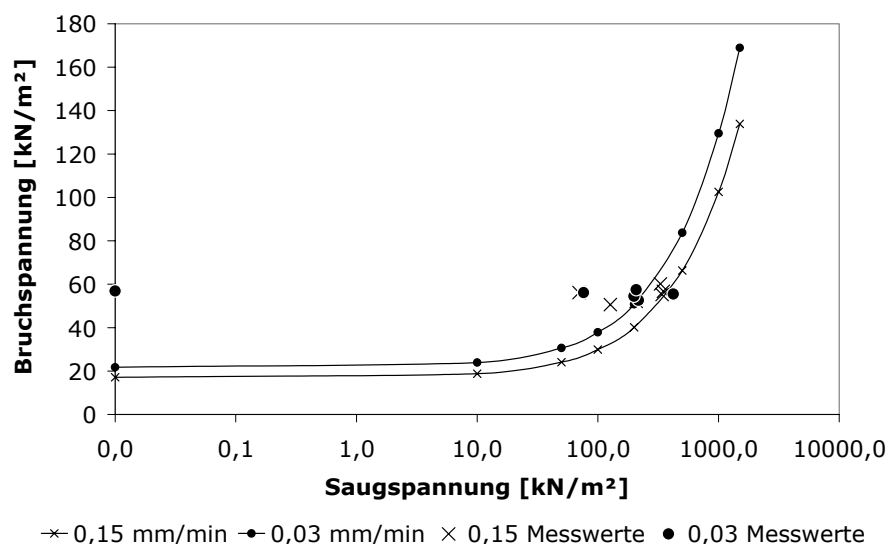
$$(51) \quad u_a = - \left\{ \frac{c'}{\varphi'} - (u_a - u_w) \cdot \chi - \sigma \right\}$$

Dabei gilt:  $(u_a - u_w) = \Psi_m \cdot \Psi_m$  ist die mittels Druckmembranapparatur ermittelte Saug- bzw. Matrixspannung.  $\chi$  ist der Wichtungsfaktor zur Berücksichtigung des Einflusses von Porenluft- und Porenwasserdruck und vom Sättigungsgrad abhängig. Er ist 0 im gesättigten Boden und 1 im vollständig trockenen Boden.

$$(52) \quad \chi = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

Eine zu große Abschergeschwindigkeit lässt keine ausreichende Umverteilung des Porenwassers zu, wenn man davon ausgeht, dass mit fortschreitender Zeit Wasser von den Makro- in die Mikro-Poren, das heißt in die Poren innerhalb der Ton-Cluster, fließt (SCHANZ et al. 2004), bis ein internes Gleichgewicht erreicht wird. Dies führt zu einer lokalen Erhöhung des Wassergehalts im Bereich der Scherfläche, der mit einer niedrigeren Saugspannung verbunden ist. Der auf der Saugspannung basierende Scherspannungsanteil wird verringert. Andererseits kann der auf der Normalspannung basierende Scherfestigkeitsanteil auf Grund von sprödem Materialverhalten erhöht sein. Bei sehr

niedrigen Schergeschwindigkeiten wird dagegen ein Materialkriechen einsetzen, das die Scherfestigkeit verringert. Beide Effekte wirken sich entgegen. Das quantitative Ausmaß lässt sich nicht ohne weiteres abschätzen, da man die tatsächlich an der Scherfläche wirkende Saugspannung nicht kennt. Messwerte der Scherfestigkeit sind in der Literatur zum Teil deutlich niedriger (BEHRENS & NEUMANN 2002, SCHANZ et al. 2004) als man nach (50) erwarten würde. Entgegen der Ansicht dieser Autoren, dass folglich weder Saugspannung noch Schergeschwindigkeit im ungesättigten Fall eine Rolle spielen, dürfte diese zu niedrigen tatsächlichen Festigkeiten zum Einem auf einer Fehleinschätzung des Saugspannungsanteils beruhen, sofern dieser nicht durch Tensiometermessung direkt bestimmt wurde. Zum anderen wird Materialkriechen bei langsamer Deformation und Sprödbbruch bei schneller Deformation nicht ausreichend berücksichtigt. JUNGE et al. (2000) beschrieben diesen Effekt auch für Zugversuche. In Abbildung 61 sind die berechneten Scherspannung-Saugspannung-Kurven für zwei unterschiedliche Schergeschwindigkeiten für die Vertikalspannung von  $100 \text{ kN/m}^2$  exemplarisch dargestellt (Diagramme für die anderen Laststufen siehe Anhang A.5). Es fällt auf, dass die Versuche mit schnellerer Schergeschwindigkeit bei gleicher Saugspannung eine niedrigere Bruchfestigkeit haben müssten. Grund hierfür sind größere Porendrücke, wie sie sich nach (52) ergeben. Die Kurven unterschiedlicher Geschwindigkeiten verlaufen annähernd parallel. Im Bereich von  $100$  bis  $500 \text{ kN/m}^2$  Saugspannung korrespondieren die Messergebnisse mäßig gut mit den theoretischen Kurven. Bei niedrigeren Saugspannungen sind die Bruchfestigkeiten in der Regel höher, als zu erwarten wäre, bei höheren Saugspannungen eher zu niedrig.



**Abbildung 61** Bruchspannung in Abhängigkeit von der Saugspannung nach (50) für zwei unterschiedliche Schergeschwindigkeiten und die Messwerte bei Vertikalspannung von  $100 \text{ kN/m}^2$ .

Durch die Setzung im Scherversuch kommt es zu einer Verringerung des Porenanteils. Die effektive Saugspannung ist also in der Regel niedriger als berechnet. Dennoch sind die Messwerte der Bruchspannung bei hohen Sättigungsgraden größer als zu erwarten wäre. Statt des nach der Vanapilli-Methode rechnerischen Zusammenhangs steigt die Bruchspannung deutlich gemäßigter linear mit der Saugspannung an. Durch die wirkende Saugspannung wird das im Porenraum enthaltene Wasser sich im Porenraum umverteilen, so dass der Sättigungsgrad zunimmt. Der volumetrische Wassergehalt, auf dem die Berechnung aufbaut, ist also während des Schervorgangs eine veränderliche Größe. Die Werte  $\theta_s$  und  $\theta_r$  als Kennwerte für die Berechnung der effektiven Saugspannung entsprechen nicht Punkten auf der tatsächlichen charakteristischen Saugspannungskurve des Bodens zum Zeitpunkt des Versagens.

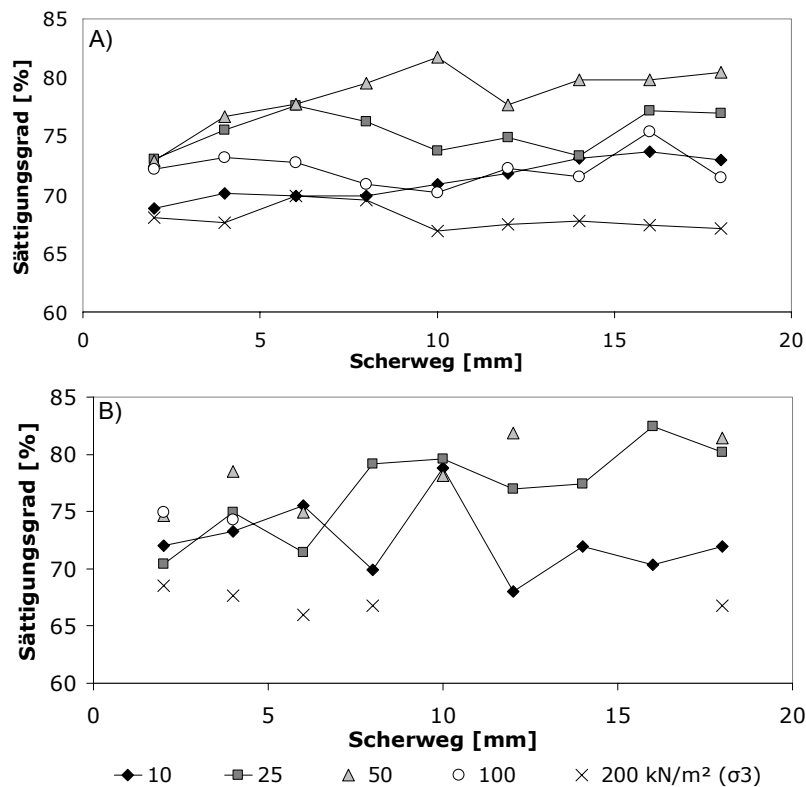
### 7.7.2 ENTWICKLUNG DER SAUGSPANNUNG WÄHREND DES SCHERVERSUCHS

Um den Verlauf der Saugspannung im Scherversuch zu charakterisieren, wurden Versuche am Tertiärton durchgeführt und die Scherung nach unterschiedlichen Scherwegen abgebrochen und der Wassergehalt bestimmt. Hierfür wurden zum Vergleich zwei unterschiedliche Vorschubgeschwindigkeiten (0,03 und 0,15 mm/min) gewählt.

Entsprechend dem Wassergehalt wirkt während des Schervorgangs im Porenraum eine Saugspannung, deren Verlauf nicht direkt messbar ist. Zu Beginn der Scherversuche herrschten im luftgefüllten Porenanteil entsprechend dem dortigen Wassergehalt Saugspannungen zwischen 100 und 900 kN/m<sup>2</sup>. Geringe Schwankungen des Wassergehaltes wirkten sich in Bezug auf die wirksame Saugspannung gravierend aus. Unabhängig vom Einbauwassergehalt stellte sich im Scherversuch ein dem herrschenden Wasserangebot und Spannungen entsprechender Wassergehalt ein. Die mit diesem Wassergehalt bzw. Sättigungsgrad verbundene Saugspannung korreliert mit dem Spannungsverhältnis von Scherbeanspruchung und vertikaler Auflast (siehe Abbildung 57). Streng genommen gilt die pF-Kurve für das Material nicht mehr, da durch die vorangehende Konsolidation und Setzungen im Scherversuch, wie oben bereits ausgeführt, die Porenverteilung verändert wurde. Ist eine Drainage verhindert oder durch geringe Wasserdurchlässigkeit zumindest eingeschränkt, so wird der Sättigungsgrad in dem Maße zunehmen, in dem die Porenzahl verringert wird. Dadurch sinkt die Saugspannung. Die tatsächlich am Versuchsende herrschende Saugspannung ist im Rahmenscherversuch nicht direkt messbar. Unter der vereinfachenden Annahme, dass die Verringerung des Porenraumes linear erfolgt, sind die Sättigungsgrade zu Beginn und am Ende des Scherversuchs indirekt proportional zum Verhältnis der Saugspannungen, so dass gilt:

$$(53) \quad \Psi_E = \Psi_A \cdot \frac{S_{RA}}{S_{RE}}$$

Auf diese Weise kann ein Näherungswert für die Saugspannung zu Versuchsende abgeleitet werden. Die Saugspannung wird in dem Maße gemindert, in dem der Sättigungsgrad zunimmt.



**Abbildung 62** Sättigungsgrade in Abhängigkeit vom Scherweg: A) bei 0,15 mm/min und B) 0,03 mm/min Vorschubgeschwindigkeit.

Wassergehalte sowie die Dichten bzw. die Porenanteile vor und nach den Scherversuchen sind voneinander unabhängig. Der Endwassergehalt ist von der Vertikalspannung abhängig. Je niedriger die Auflast, umso höher der Wassergehalt zu Versuchsende. Ein Teil der Proben verhält sich bei niedrigen Normalspannungen dilatant, was sich im Verhältnis des Porenanteils vor und nach Versuch zeigt. Die Saugspannung vor dem Versuch ist umso größer, je geringer der Porenanteil ist. Das spricht dafür, dass größere Porenanteile vor allem durch Zunahme größerer Porendurchmesser bewirkt werden. Wegen der unterschiedlichen Porenradienverteilung gilt die der Berechnung zugrunde gelegte Saugspannungskurve nur näherungsweise. JUNGE et al. (2000) wiesen für Zugversuche durch direkte Porendruckmessungen nach, dass die Wasserspannung im Bruchzustand von der initialen stark abweicht und in unterschiedlicher Entfernung von der Bruchstelle zum Versagenszeitpunkt unterschiedlich groß ist. Ferner gilt es zu bedenken, dass es sich während des Schervorgangs um einen Wasseraufnahmeprozess handelt – auf Grund von Hysterese-Erscheinungen können die Saugspannungskurven bei Wasserabgabe und Wasseraufnahme voneinander abweichen. Möglicherweise erklärt dies die großen Streuungen. Eine weitere Fehlerquelle ist der Endwassergehalt. Durch an der Oberfläche anhaftendem Wasser (wegen Wasserlagerung im Versuch) und nicht immer gleichmäßigen Abtupfen dieses Wasserfilmes könnte der Wassergehalt in unterschiedlichem Maß überschätzt worden sein.

### **7.7.3 EINFLUSS DER WASSERVERHÄLTNISSSE AUF DIE SCHERFESTIGKEIT HALBFESTER TONSTEINE**

Durch die im nicht vollständig gesättigten Halbfestgestein vorherrschenden Saugspannungsbedingungen wird auch die Scherfestigkeit der Tonsteine beeinflusst. Wie Tabelle 20 zeigt, gibt es nach derzeitigem Erkenntnisstand im direkten Scherversuch keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Verwitterungsgrad und den Scherfestigkeitsparametern Reibungswinkel und Kohäsion bei vergleichbarem Sättigungsgrad. Die Untersuchung des Materials im direkten Scherversuch ist insofern als problematisch anzusehen, als die Herstellung mehrerer äquivalenter Proben für mehrere Teilversuche bei halbfesten Tonsteinen sehr schwierig ist. Im Rahmenscherversuch kommen allenfalls mehr oder weniger gestörte Proben aufgelockerten Hangschutts zum Einsatz. Dennoch ergaben sich ähnliche Werte wie in Scherversuchen an Großproben (SOMMER et al. 1989).

Sowohl der Reibungswinkel als auch die Kohäsion werden unabhängig vom Verwitterungsgrad durch einen höheren Sättigungsgrad reduziert (Abbildung 63). Eine Veränderung des Wassergehaltes wirkt sich auf die Festigkeit der Tonsteinaggregate aus, da die Qualität des Zusammenhalts der feinkörnigen Partikel beeinflusst wird. Die Änderung der Festigkeitsparameter Reibungswinkel und Kohäsion ist im Bereich niedriger Sättigungsgrade, das heißt hoher Saugspannungen, wesentlich deutlicher als auf höherem Sättigungsniveau. Je geringer der Sättigungsgrad im Scherversuch, umso höher sind Reibungswinkel und Kohäsion. Die dem Endwassergehalt im Scherversuch entsprechende Saugspannung (Abbildung 64 und Abbildung 65) wurde mittels der Umkehrfunktion der logarithmischen Regression der gemessenen Saugspannungskurven des jeweiligen Materials berechnet (siehe Kapitel 7.10.2). Die von SOMMER et al. (1989) an Großproben von Röt-Tonsteinen ermittelten Scherparameter haben eine ähnliche Größenordnung wie die in eigenen Versuchen an kleinen Proben von nur 7 cm Durchmesser bestimmten (Tabelle 19).

Die Bruchspannungen der Einzelversuche nehmen mit zunehmender Saugspannung zu. Geht die Saugspannung gegen 0, das heißt sind die Tonsteine wassergesättigt, so ist die Bruchfestigkeit nur noch von der Auflast und einer Restkohäsion abhängig. Diese ist umso niedriger, je geringer die Aggregatstabilität und je größer der Anteil an plastifizierter Matrix sind. Bei nahezu erfolgter Austrocknung der Proben verhalten sich verschieden verwitterte Tonsteine unterschiedlich. Die Bruchfestigkeit des wenig verwitterten Opalinustons bei Saugspannungen zwischen 5000 und 6000 kN/m<sup>2</sup> ist niedriger als die bei 500 bis



800 kN/m<sup>2</sup>. Die stärker verwitterten Proben zeigen einen Anstieg der Bruchfestigkeit mit zunehmender Saugspannung bis zu einem Spitzenwert der Wasserspannung von theoretisch 3 MN/m<sup>2</sup> (Typ 3 Opalinuston). Auch wenn dieser unrealistisch hohe Saugspannungswert nur aus der p<sub>F</sub>-Kurve extrapoliert werden konnte, liegt die tatsächliche Saugspannung mit Sicherheit im adsorptiven Anteil des gebundenen Wassers > 50000 kN/m<sup>2</sup>. Die überkonsolidierten Tonsteine reagieren unterschiedlich stark auf Wassergehaltsänderungen, je nachdem ob das Material von Aggregaten oder von replastifizierter Matrix dominiert wird. In den von Aggregaten dominierten Tonsteinen spielt die Wirkung der Saugspannung auf die Scherfestigkeit eher eine untergeordnete Rolle. Die Scherfestigkeit der Röt-Tonsteine unterliegt demnach einem deutlichen Struktureinfluss.

**Tabelle 19** Vergleich der Festigkeits- und Plastizitätseigenschaften der Tonsteine aus eigenen Versuchen mit den Daten von SOMMER et al. (1989).

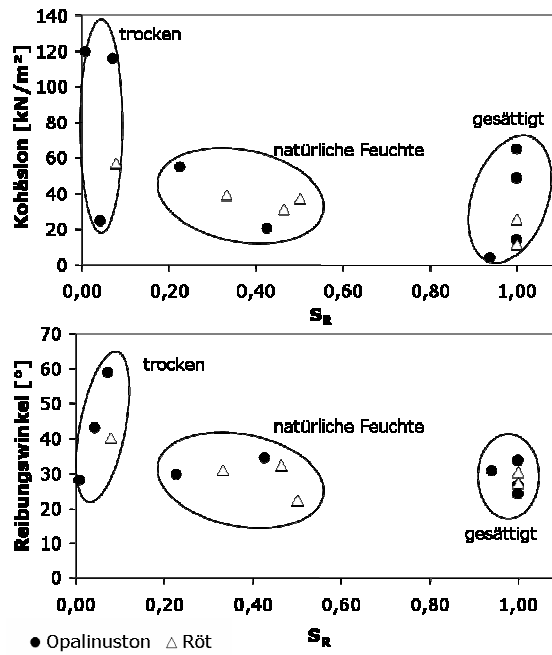
	Röt-Tonsteine SOMMER et al. 1989		Eigene Versuche	
	Bereich 1	Bereich 2	Röt-Tonsteine	Opalinuston
φ [°]	8-18	19-29	22-32	21-34
c [kN/m <sup>2</sup> ]	10-60	45-90	31-39	21-65
w <sub>nat</sub> [%]	14-25	9-14	9-28	8-19
w <sub>p</sub> [%]	21-25	17,5-22,5	15,6-21,5	18,0-22,7
w <sub>L</sub> [%]	39-50	28,5-38,0	23,6-32,7	28,6-37,6
I <sub>p</sub> [%]	17-20	10-15	8-13	11-15
I <sub>c</sub>	1,0-1,5	1,5-2,0	0,4-2,3	1,2-2,2

Es wurde versucht, analog zu den Versuchen im Tertiärton, mit Hilfe von Gleichung (50) den Zusammenhang zwischen Saugspannung bzw. Matrixpotential und der Bruchfestigkeit nachzuvollziehen. Mit Ausnahme des Verwitterungstyps 4 des Opalinustons konnten auf diesen Wege weder logisch nachvollziehbare Kurven berechnet werden, noch korrelieren die Messwerte mit diesen Kurven (siehe Anhang A.6). Der Ansatz nach FREDLUND & XING (1994) und VANAPILLI (1996) ist folglich nicht geeignet, den Zusammenhang zwischen Saugspannung und Scherspannung für die überkonsolidierten Tonsteine darzustellen. Das Wechselspiel zwischen Aggregaten und Matrix wird nicht vollständig erfasst. Für die Saugspannungskurve liegen nur Messwerte zwischen 0 und 1500 kN vor. Die Proben erreichten im Scherversuch aber teilweise eine höhere Saugspannung. Deshalb ist nicht auszuschließen, dass die durch Regression ermittelte Anpassung bei hohen Saugspannungsbeträgen, nicht mehr mit den tatsächlichen Materialverhalten korreliert. Die angepasste Saugspannungskurve beeinflusst über die volumetrischen Wassergehalte θ<sub>s</sub> und θ<sub>r</sub> die Berechnung der Scherfestigkeit nach (50) erheblich.

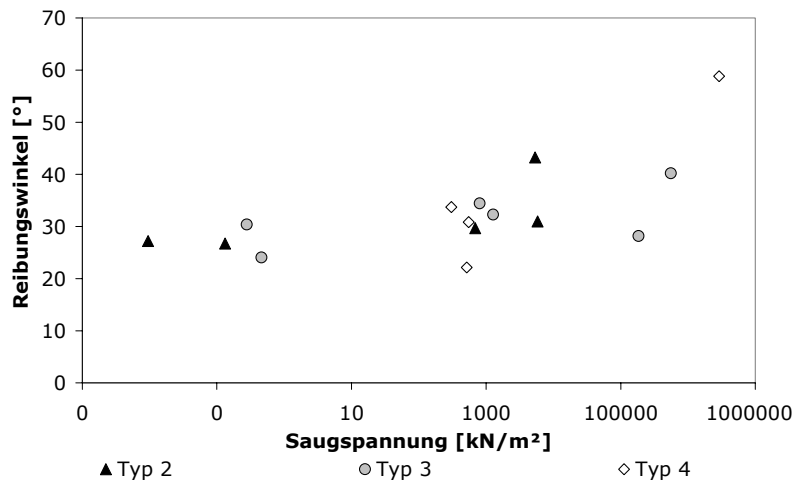
**Tabelle 20** Reibungswinkel und Kohäsion lufttrocken, bei natürlichem Wassergehalt und bei nahezu vollständiger Sättigung in Abhängigkeit vom Verwitterungstyp.

	Typ 2		Typ 3		Typ 4	
	c [kN/m <sup>2</sup> ]	φ [°]	c [kN/m <sup>2</sup> ]	φ [°]	c [kN/m <sup>2</sup> ]	φ [°]
<b>Röt-Tonsteine</b>						
trocken	-	-	56,8	40,2	-	-
natürl. Feuchte	39,1	31,0	30,9	32,3	36,9	22,2
gesättigt	11,1	27,2	25,3	30,4	-	-
<b>Opalinuston</b>						
trocken	24,6	43,3	119,3	28,2	116,0	58,8
natürl. Feuchte	54,7	29,7	20,8	34,8	64,9	33,7
gesättigt	48,9	26,7	14,0	24,1	4,2	30,9

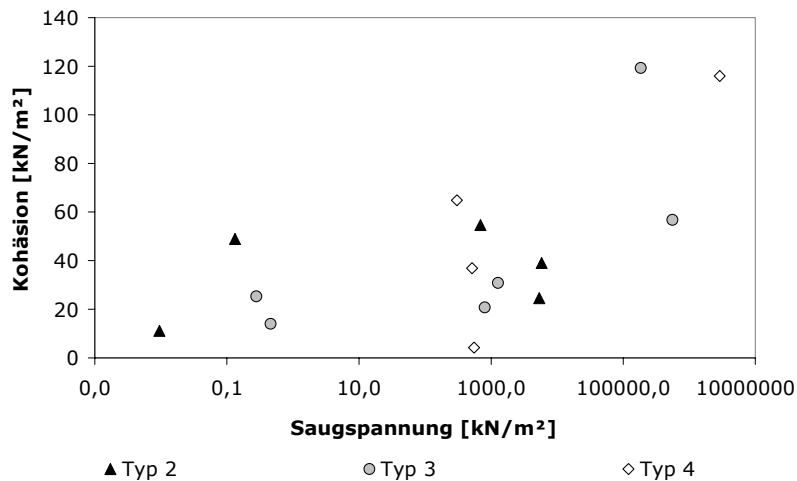
Je nach Wassergehalt und herrschendem Spannungsniveau kommt es im direkten Scherversuch zu einer messbaren Verkleinerung der Tonsteinaggregate (Abbildung 68), die im Wesentlichen auf einer Zerdrückung der Aggregate durch die Auflast und einer Zerreibung in der Scherfuge beruht. Bei Versuchen unter Wasserbedeckung und der damit verbundenen Aufsättigung des Materials spielt auch der verwitterungsbedingte Aggregatzerrfall eine Rolle.



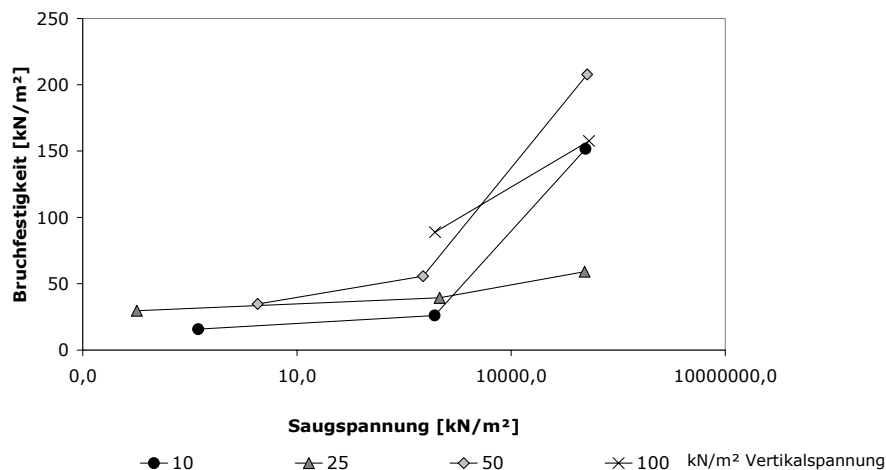
**Abbildung 63** Scherfestigkeit von Tonsteinen in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad.



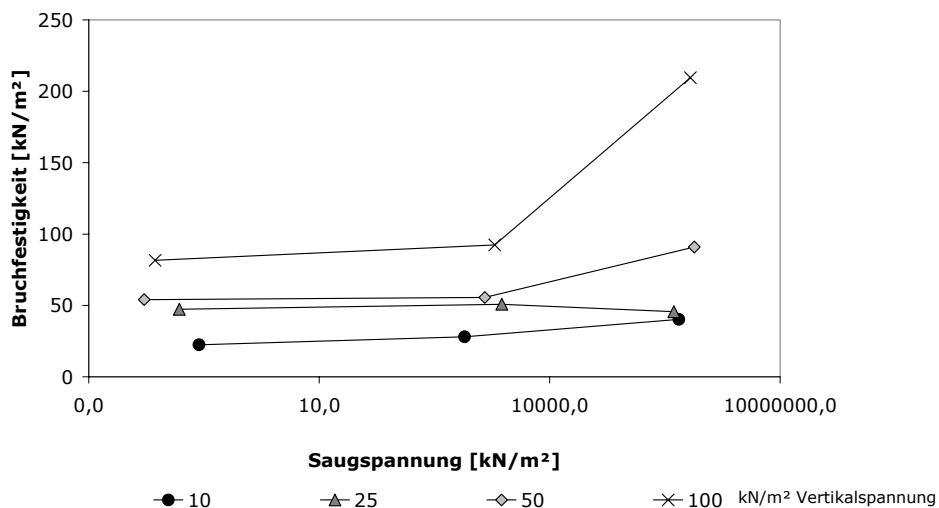
**Abbildung 64** Reibungswinkel in Abhängigkeit von der Saugspannung bei Versuchsende (Röt-Tonsteine).



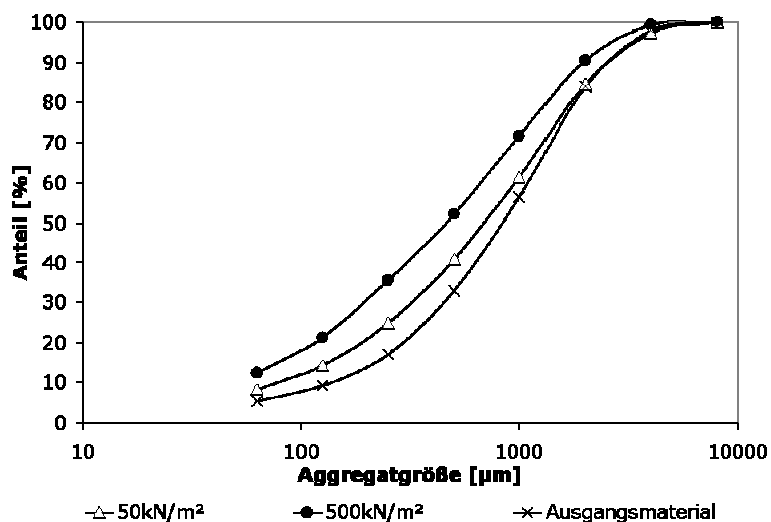
**Abbildung 65** Kohäsion in Abhängigkeit von der Saugspannung bei Versuchsende (Röt-Tonsteine).



**Abbildung 66** Bruchfestigkeit in Abhängigkeit von der Saugspannung (entsprechend dem Wassergehalt bei Versuchsende) – Opalinuston Typ 3.



**Abbildung 67** Bruchfestigkeit in Abhängigkeit von der Saugspannung (entsprechend dem Wassergehalt bei Versuchsende) – Röt-Tonstein Typ 3.



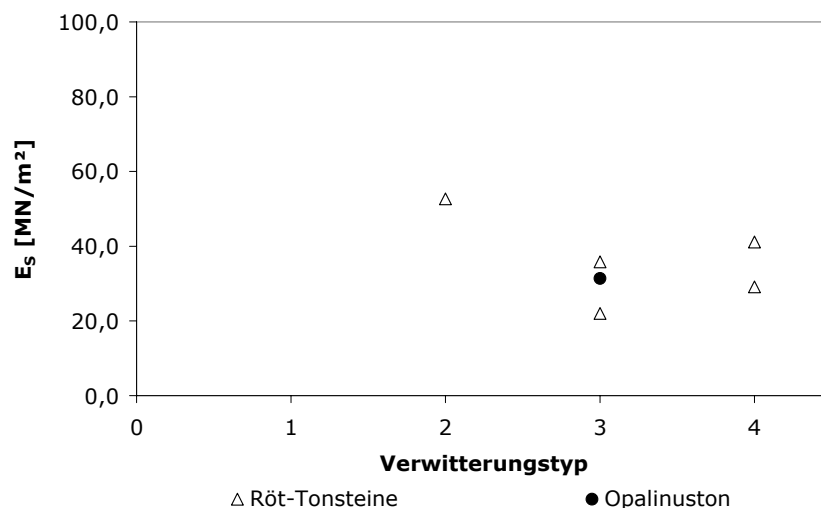
**Abbildung 68** Aggregatgrößenverteilungskurven vor und nach direktem Scherversuch in Abhängigkeit von der Normalspannung: Verkleinerung der Aggregate durch Scherprozess.

## 7.8 Kriechversuch

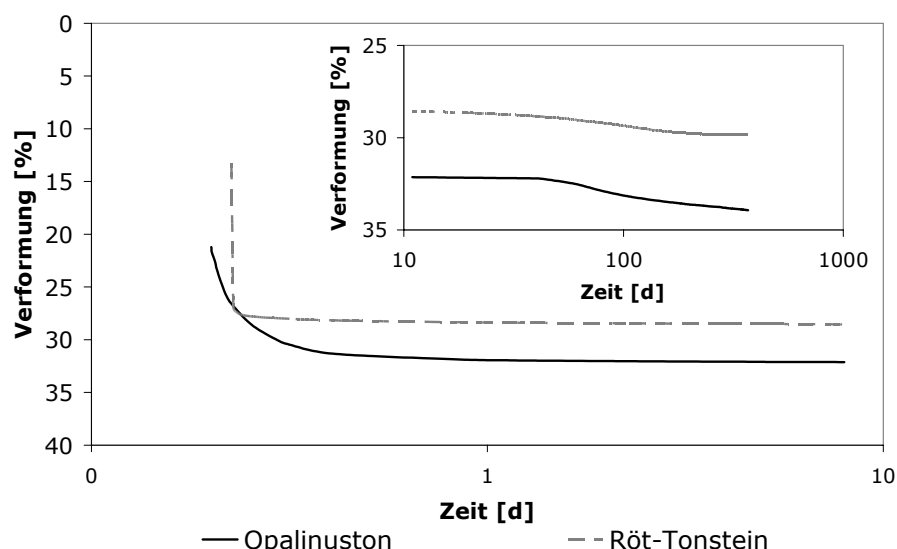
Die Proben wurden zwischen 80 und 300 Tagen mit einer gleich bleibenden Vertikalspannung von etwa  $10,7 \text{ MN/m}^2$  beaufschlagt, bis die Höhenänderung innerhalb von 7 Tagen weniger als  $0,001 \text{ mm}$  betrug. Die erwünschte Temperaturkonstanz von  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  konnte leider aus technischen Gründen bei einigen Proben nicht realisiert werden, so dass die Temperatur zwischen  $19$  und  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  schwankte. Solange noch deutliche Setzungen stattfinden, wirkt eine Temperaturerhöhung beschleunigend auf das Setzungsverhalten. Bei ausklingender Deformation zeigten sich teilweise gegensätzliche Höhenänderungen, welche jedoch auf dem unterschiedlichen Temperatur-Dehnungsverhalten von Stahlteilen der Versuchseinrichtung und den Proben beruhen. Versuche mit Temperaturschwankungen von  $5 \text{ K}$  bei konstanter relativer Luftfeuchte und ohne vertikale Belastung im Klimaschrank, zeigten nach Einstellen des Gleichgewichtswassergehaltes keine messbare Volumenänderung von Probe und Versuchseinrichtung.

Die ermittelten Steifeziffern der Röt-Tonsteine nehmen mit der Verwitterung ab (siehe Abbildung 69). Für die Probe des Typs 2 ergab sich  $E_s = 52,7 \text{ MN/m}^2$ . Die beiden untersuchten Proben des Typs 3 erreichten  $35,8$  bzw.  $22,0 \text{ MN/m}^2$  und die Probe des Verwitterungstyps 4  $41,1 \text{ MN/m}^2$  bzw.  $29,1 \text{ MN/m}^2$ . Aus Zeitgründen konnte nur eine Probe des Verwitterungstyps 3 aus dem Opalinuston untersucht werden. Hier ergab sich ein Steifemodul von  $31,4 \text{ MN/m}^2$ . Die Setzungen dauerten bei den vollständig replastifizierten Tonen  $< 100 \text{ d}$ , bei den Tonsteinen mit Aggregaten jedoch  $> 200 \text{ d}$  an. Es konnte keine einheitliche Probenhöhe gewählt werden, da aus den im Stechzylinder genommenen Proben nur unter Schwierigkeiten Probekörper mit planen Endflächen zu gewinnen waren. Das Verhältnis Probenhöhe zu Probendurchmesser betrug zwischen  $0,7$  und  $1,3$ .

Alle Zeit-Setzungslinien der Röt-Tonsteine waren durch einen sehr steilen Kurvenverlauf zu Beginn, d.h. eine rasche Primärsetzung in wenigen Minuten gekennzeichnet. Der Übergang zur Sekundärsetzung erfolgt durch einen deutlichen Knick mit folgendem sehr flachen Kurvenverlauf. Die Zeit-Setzungslinie des untersuchten Opalinustons ist durch einen harmonischeren Kurvenverlauf und einer länger andauernden Primärsetzung gekennzeichnet (Abbildung 70). Die Sofortsetzung betrug jeweils mehrere Millimeter.



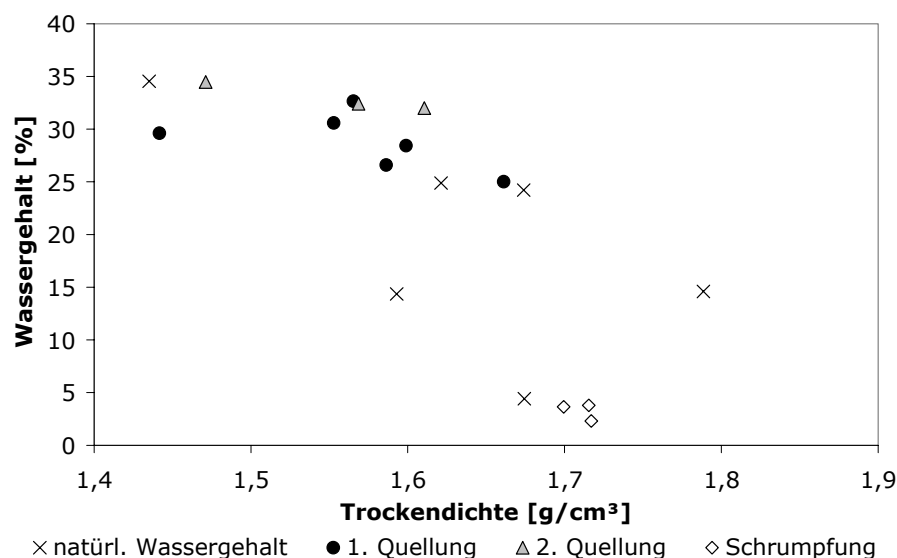
**Abbildung 69** Steifeziffern unterschiedlich verwitterter Tonsteine aus Kriechversuchen bei ca.  $10,7 \text{ MN/m}^2$  Vertikalspannung.



**Abbildung 70** Zeit-Verformungslinien zweier Tonsteinproben des Typs 3.

### 7.9 Quell- und Schrumpfverhalten

Durch die Trocknung bei unterschiedlichen Temperaturen bzw. der Verwendung des Materials mit natürlichem Wassergehalt vor Beginn der Quellungs-Schrumpfungs-Zyklen wurden unterschiedliche maximale Saugspannungen im Porenraum simuliert.

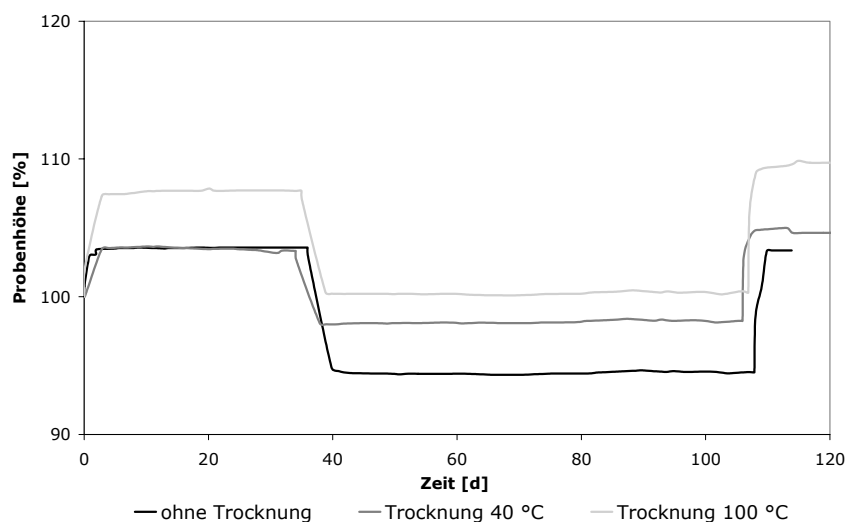


**Abbildung 71** Zusammenhang zwischen Trockendichte und Wassergehalt – Röt-Tonsteine.

Es wird deutlich, dass mit der Änderung des Wassergehaltes auch eine Änderung des Porenvolumens und damit der Trockendichte einhergeht (Abbildung 71). Mit zunehmendem Wassergehalt verringert sich die Trockendichte, d.h. vergrößert sich das Gesamtporenvolumen. Die Streuung der Trockendichte erscheint vor allem bei natürlichem Wassergehalt sehr hoch, was auf die relativ ungenaue Volumenbestimmung zurückzuführen ist. Das nach Messung von Durchmesser und Höhe des Probenzylinders errechnete Volumen gibt nur einen Näherungswert wieder, sofern die Probenendflächen nicht vollkommen plan sind und die Probe nicht gleichmäßig an der Wandung des Ausstechringes anliegt.

Die Ergebnisse der Schrumpfversuche zeigen trotz sehr ähnlicher Wassergehalte beim Erreichen der Volumenkonstanz unterschiedliche Trockendichten und damit Porenvolumina. Die Wassergehalte nach Beenden des Schrumpfvorganges repräsentieren nicht die Schrumpfgrenze im eigentlichen Sinn, da die Versuche erst beendet wurden, nachdem über mehrere Tage keine Volumenänderungen mehr beobachtet werden konnten. Die Proben

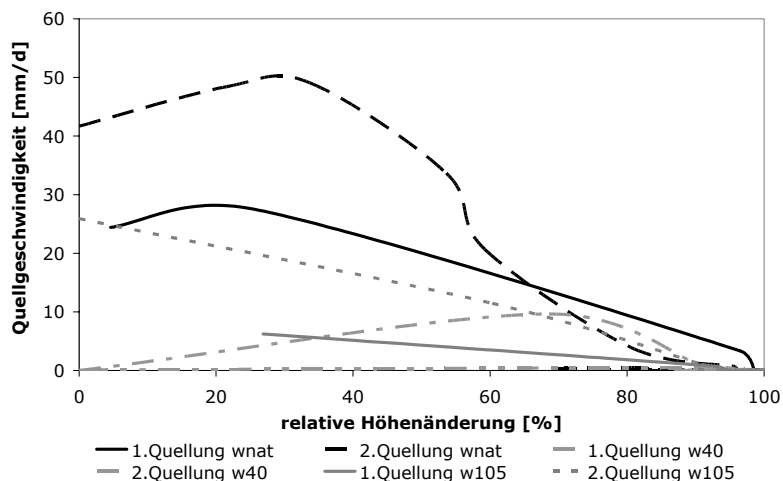
hatten somit Zeit, über die Schrumpfgrenze hinaus noch weiter auszutrocknen. Die unterschiedliche Trockendichte bei vergleichbarer Korndichte zeigt jedoch, dass die Proben unterschiedliche Schrumpfgrenzen (Wassergehalt unterhalb dessen keine Volumenänderung mehr stattfindet) haben. Die Daten der Schrumpfversuche stammen nur von Proben des Typs 3 und 4. Es ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Trockendichte und dem Gefügestand erkennbar. Weniger stark verwitterte Tonaggregate erreichen aufgrund der Gefügestabilität vermutlich eine geringere Trockendichte beim Schrumpfen. Diese Hypothese wäre an Schrumpfversuchen mit Typ 1 und Typ 2 Proben nochmals zu überprüfen.



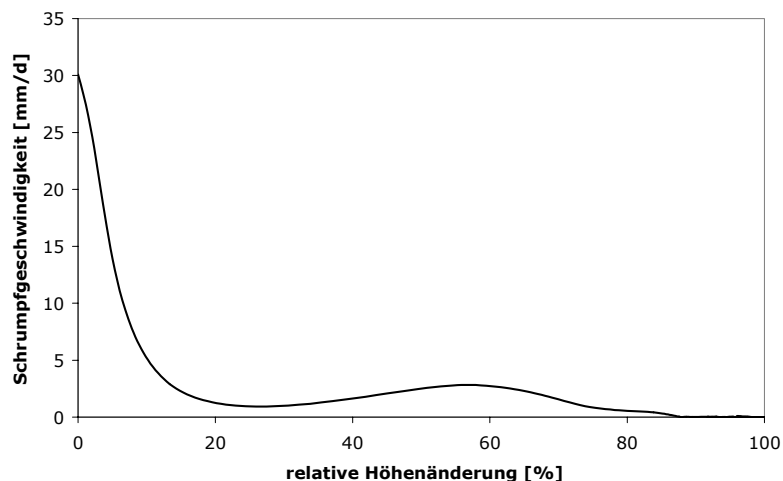
**Abbildung 72** Hebungs- und Setzungsbeträge eine Quell-Schrumpf-Zyklusses.

Abbildung 72 zeigt die Höhenänderung von seitendehnungsbehinderten Proben des Typs 4 mit unterschiedlichen Einbaubedingungen. Es fällt auf, dass bei der 2. Quellung bei den vor Einbau ofengetrockneten Proben eine noch größere Volumenzunahme als bei der 1. Quellung erreicht wird. Dagegen pegelt sich das Probenvolumen bei der ursprünglich mit natürlichem Wassergehalt eingebauten Probe auch bei wiederholter Quellung im selben Niveau ein. Leider sind die Proben nach dem 2. Quellversuch nicht mehr in einem Zustand, der es möglich macht, den Quell-Schrumpf-Zyklus fortzusetzen. Die Quellung bzw. Schrumpfung ist vergleichsweise schnell in wenigen Tagen abgeschlossen. Die Quellraten (Abbildung 73) unterscheiden sich deutlich. Die Quellrate ist die Höhenänderung pro Zeiteinheit in mm/d. Die relative Höhenänderung auf der Abszisse ist die gemessene Höhenänderung eines Intervalls bezogen auf die Gesamthöhenänderung des Versuches.

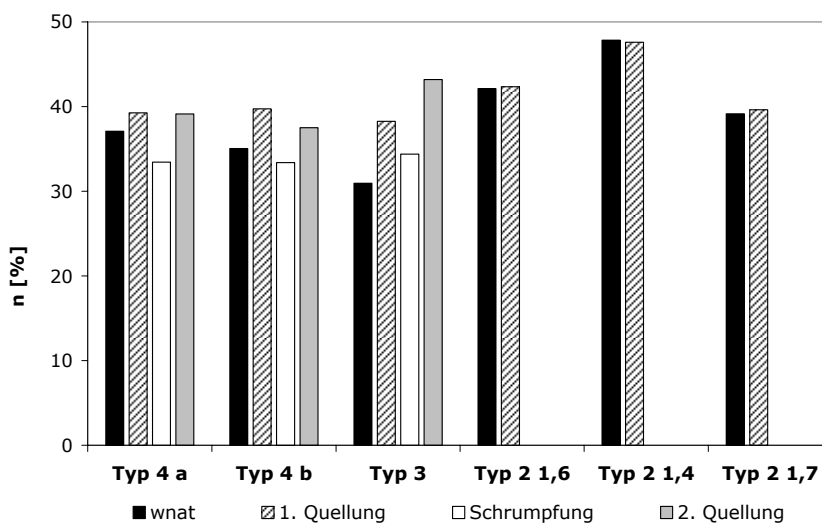
Die Schrumpfrate ist die Höhenänderung pro Zeiteinheit in mm/d. Die relative Höhenänderung auf der Abszisse ist die gemessene Höhenänderung eines Intervalls bezogen auf die Gesamthöhenänderung des Versuches. Die Probe, die ursprünglich mit natürlichem Wassergehalt eingebaut wurde, beginnt mit einer hohen Schrumpfrate von 30 mm/d, die rasch auf ein Niveau von ca. 1 mm/d abfällt, bis etwa 20 % der Schrumpfung abgeschlossen ist. Bis 60 % erfolgt noch einmal ein leichter Anstieg der Schrumpfrate auf ca. 3 mm/d. Zwischen 60 und 90 % der Schrumpfung verringert sich die Geschwindigkeit, bis sie sich 0 mm/d nähert.



**Abbildung 73** Quellgeschwindigkeit eines Röt-Tonsteins des Typ 4 bei unterschiedlichen Trocknungsbedingungen vor Versuchsbeginn (wnat = natürlicher Wassergehalt, w40 = Ofentrocknung bei 40 °C vor Quellversuch, w105 = Ofentrocknung bei 105 °C vor Quellversuch).



**Abbildung 74** Schrumpfgeschwindigkeit eines Röt-Tonsteins des Typs 4.



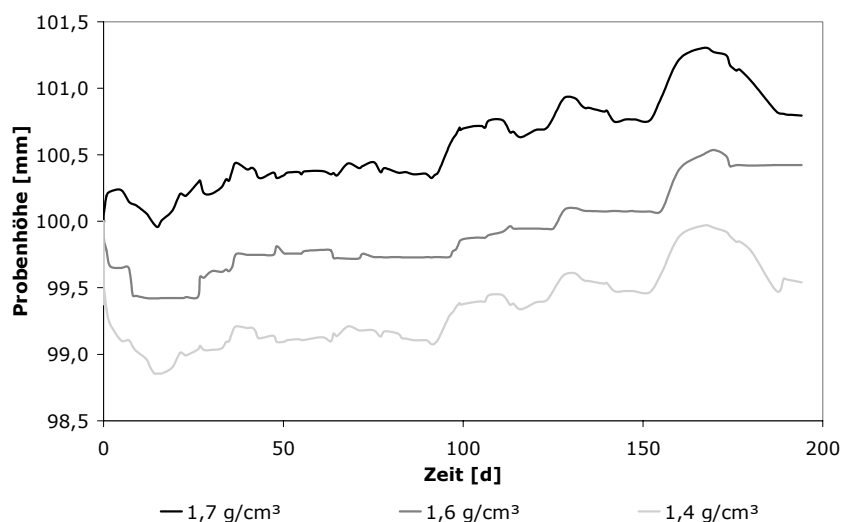
**Abbildung 75** Porenanteile verschiedener Röt-Tonsteine bei natürlichem Wassergehalt und nach Quellen und Schrumpfen (Die Zahl hinter Typ 2 gibt jeweils die Trockendichte bei natürlichem Wassergehalt an).

Die Porenanteile mit natürlichem Wassergehalt der untersuchten Typ 4 Proben schwanken zwischen 32 und 38 %. Der vorhandene Porenraum ist auch nach dem Quellen nicht vollständig mit Wasser gefüllt. Nach dem 1. Quellversuch steigt der Porenanteil auf 37 bis 40 % an, der dazugehörige Wassergehalt ist jedoch etwas niedriger.

Unterschiedliches Quellverhalten, das aus den vorangegangenen Lagerungsbedingungen resultiert, ist im ersten Zyklus nicht zu erkennen. Auch nach dem Quellen ist noch ein Luftporenanteil enthalten, da der Porenanteil größer als der Wassergehalt ist. Die Proben wurden nach dem Quellen durch Trocknung an der Luft bei quasi-konstanter Temperatur und relativer Luftfeuchte schrumpfen gelassen. Nach dem Schrumpfversuch wird ein Einfluss der Ofentrocknung vor Zyklusbeginn deutlich. Die vor dem Quellversuch bei 105 °C getrocknete Probe hat nach Abschluss des Schrumpfversuches ein größeres Porenvolumen als im natürlichen Zustand, das heißt, die im Quellversuch erfolgte Aufweitung des Porenraumes ist bei Austrocknung nicht vollständig reversibel. Je intensiver die Austrocknung (höhere Temperatur) umso deutlicher wird die Schädigung des Gefüges (Abbildung 75).

Die bei 40 °C getrockneten und die mit natürlichem Wassergehalt eingebauten Proben des Typs 4 erfahren durch die Austrocknung eine Verringerung des Porenvolumens, die deutlich unterhalb des Porenanteils im natürlichen Zustand bei 33 bis 36 % liegt. Im zweiten Quellversuch erreichen die ofengetrockneten Proben einen noch größeren Porenanteil als im ersten Quellversuch, die beiden unbehandelten Proben jedoch einen etwas geringeren. Leider waren die Probekörper nach dem zweiten Quellversuch in einem so schlechten Zustand, dass eine Fortsetzung des Zyklusses auf Grund von starken Materialverlusten nicht mehr möglich war.

Die Probe des Typs 3 hatte einen natürlichen Porenanteil von 30 %, der sich bei der ersten Quellung auf ca. 39 % erhöhte, bei der Schrumpfung jedoch nur auf 35 % zurückging. Bei der zweiten Quellung erfolgte eine Zunahme des Porenanteils auf etwa 44 %. Es ist zu überlegen, inwiefern der Salzgehalt im Porenraum einen Einfluss auf diesen Befund hat.



**Abbildung 76** Quellversuche an Röt-Tonstein des Typs 2 in unterschiedlich dicht gelagertem Material.

Die Proben des Typs 2 wurden mit unterschiedlichen Trockendichten (zwischen 1,4 und 1,7 g/cm<sup>3</sup>) in den Quellversuch eingebaut. Dabei kam es bei der Wasseraufnahme zunächst zu einer Verdichtung des Materials auf Grund von Sackungen, eine Quellung setzte erst zeitverzögert ein. Bei der dichtesten Probe war der Setzungsbetrag am geringsten, bei der lockersten Probe am größten. Nach etwa 30 Tagen kommt es zum relativen Stillstand der Quellung, jedoch setzt nach weiteren 60 Tagen eine erneute deutliche Volumenzunahme ein. Der Kurvenverlauf ist sehr unruhig, wahrscheinlich kam es zu Umlagerungen in der Probe, da ein allmählicher Aggregatzerfall durch die Wasserlagerung induziert wurde (Abbildung 76). Der Porenanteil nach dem Quellen ist nur geringfügig höher als mit



natürlichem Wassergehalt, im Falle der Probe mit nur  $1,4 \text{ g/cm}^3$  Trockendichte zu Versuchsbeginn sogar geringer. Die Volumenänderung ist mit einer Veränderung der Porenradienverteilung verbunden, durch die anfängliche Setzung wird der Anteil an Makroporen, das heißt der Zwischenräume zwischen den Aggregaten, reduziert, die eigentliche Quellung findet dann innerhalb der Aggregate statt und wird durch deren teilweisen Zerfall gestört.

Die Quellung erfolgte ausschließlich mechanisch und osmotisch, da quellfähige Minerale nicht enthalten waren.

## 7.10 Wasserrückhaltevermögen

Die Versuche zum Wasserrückhaltevermögen liefern eine Saugspannungskurve der Tonsteine, deren Verlauf das Wasserabgabeverhalten bei Austrocknung charakterisiert. Die Saugspannungskurve ist im Wesentlichen von der Porenradienverteilung beeinflusst, da so hohe Saugspannungen, wie sie für die Mobilisierung adsorptiv gebundenen Wassers notwendig sind, weder in der Natur in Oberflächennähe zu erwarten sind, noch im Versuch in der Druckmebranzelle erreicht werden können. Die so berechnete Saugspannung entspricht der Matrixspannung  $\Psi_m$ , die sich aus der Differenz von Porenluftdruck  $u_a$  und Porenwasserdruck  $u_w$  ergibt. Zugspannungen im Porenwasser wirken als allseitiger Druck auf das Korngerüst (SCHICK 2000).

### 7.10.1 MESSERGEBNISSE

#### 7.10.1.1 Röt-Tonsteine

Auf den ersten Blick lässt sich zunächst kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Verlauf der gemessenen Saugspannungskurve und dem Verwitterungsgrad herstellen. Die Kurven stärker verwitterten Materials verlaufen in der Regel etwas flacher, wie besonders gut am Opalinuston zu sehen (Abbildung 77 und Abbildung 81), da durch den Aggregatzerfall der Anteil kleiner Porenradien zu- und der Anteil an Makroporen abnimmt.

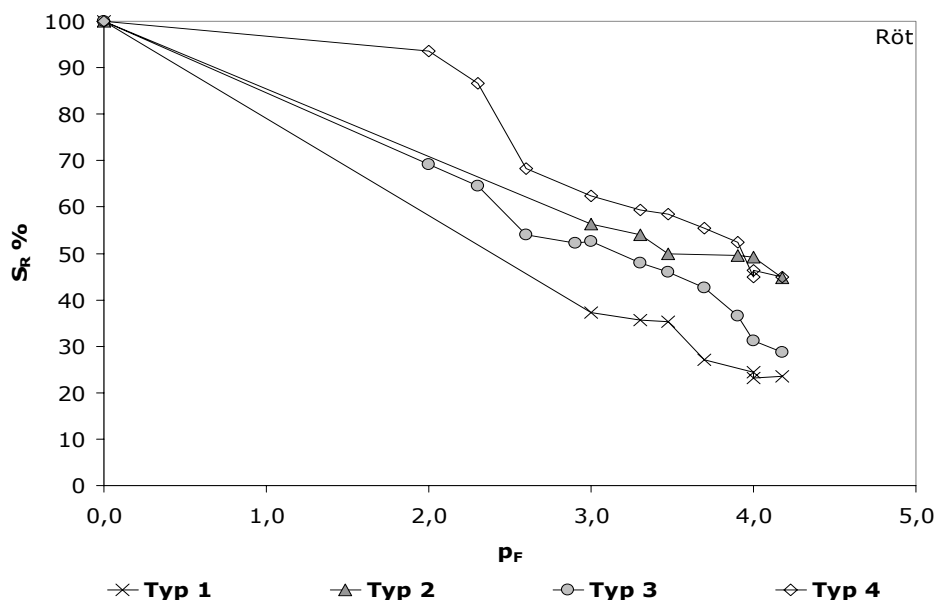
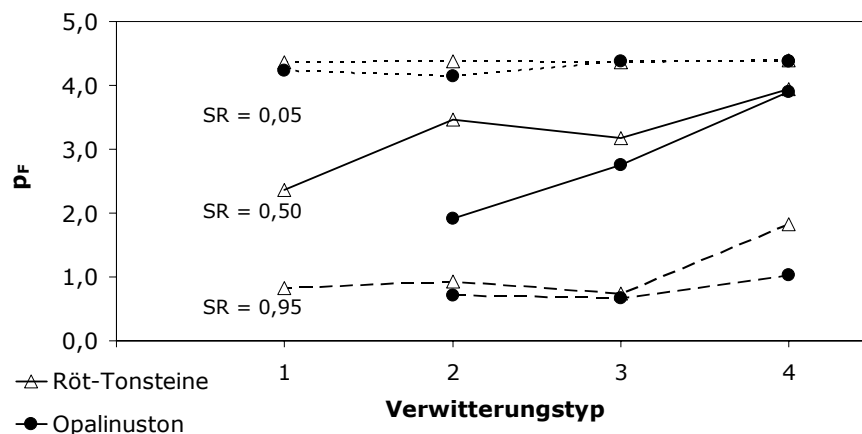


Abbildung 77 Saugspannungskurven der Röt-Tonsteine bei Entwässerung.

Die Wirkung der Saugspannung kann demnach mit der Verformbarkeit des Gerüsts aus feinkörnigen und überwiegend blättchenförmigen Körnern in Verbindung gebracht werden. So steigen die Saugspannungen bei gleichem Sättigungsgrad von  $S_R = 0,5$  mit zunehmendem Verwitterungsgrad von  $p_F < 2,4$  in unverwitterten (W0 / W1) auf  $p_F = 4,0$  in verwitterten (W4 / W5) Röt-Tonsteinen. Bei einem Sättigungsgrad  $S_R = 0,95$  erhöht sich die Saugspannung von  $p_F = 0,8$  im unverwitterten (W0 / W1) auf  $p_F = 1,8$  in verwitterten (W4 / W5) Zustand (Abbildung 78).



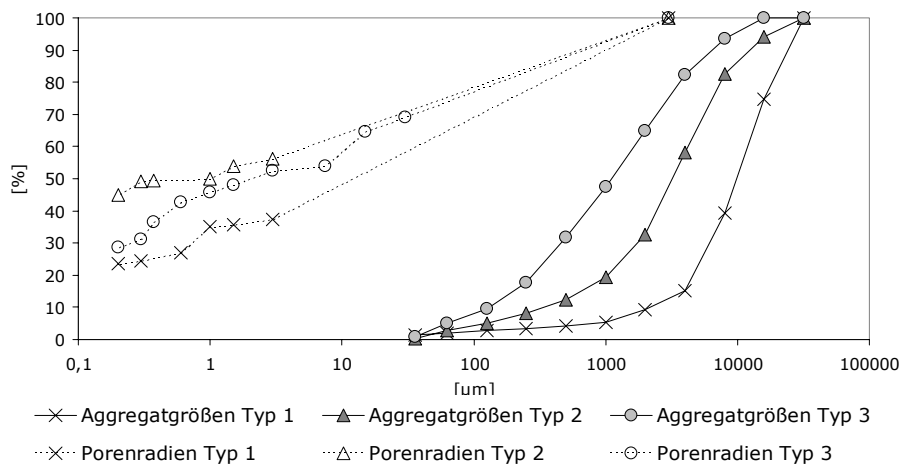
**Abbildung 78** Saugspannung bei unterschiedlichen Sättigungsgraden der Röt-Tonsteine und des Opalinustons bezogen auf den Verwitterungstyp.

Bei sehr niedrigen Sättigungsgraden sind die herrschenden Saugspannungen in den untersuchten Röt-Tonsteinen und im Opalinuston weitestgehend unabhängig vom Verwitterungsgrad (Bei  $S_R = 0,05$  ca.  $p_F = 4,4$  bei Röt-Tonsteinen und zwischen  $p_F = 4,1$  und  $4,4$  beim Opalinuston). Der Verwitterungsgrad bzw. die damit verbundenen Unterschiede in Art und Festigkeit der Kornbindung, Tonmineralogie etc. beeinflussen die Saugspannung bei bestimmten Sättigungsniveaus in unterschiedlichem Maß.

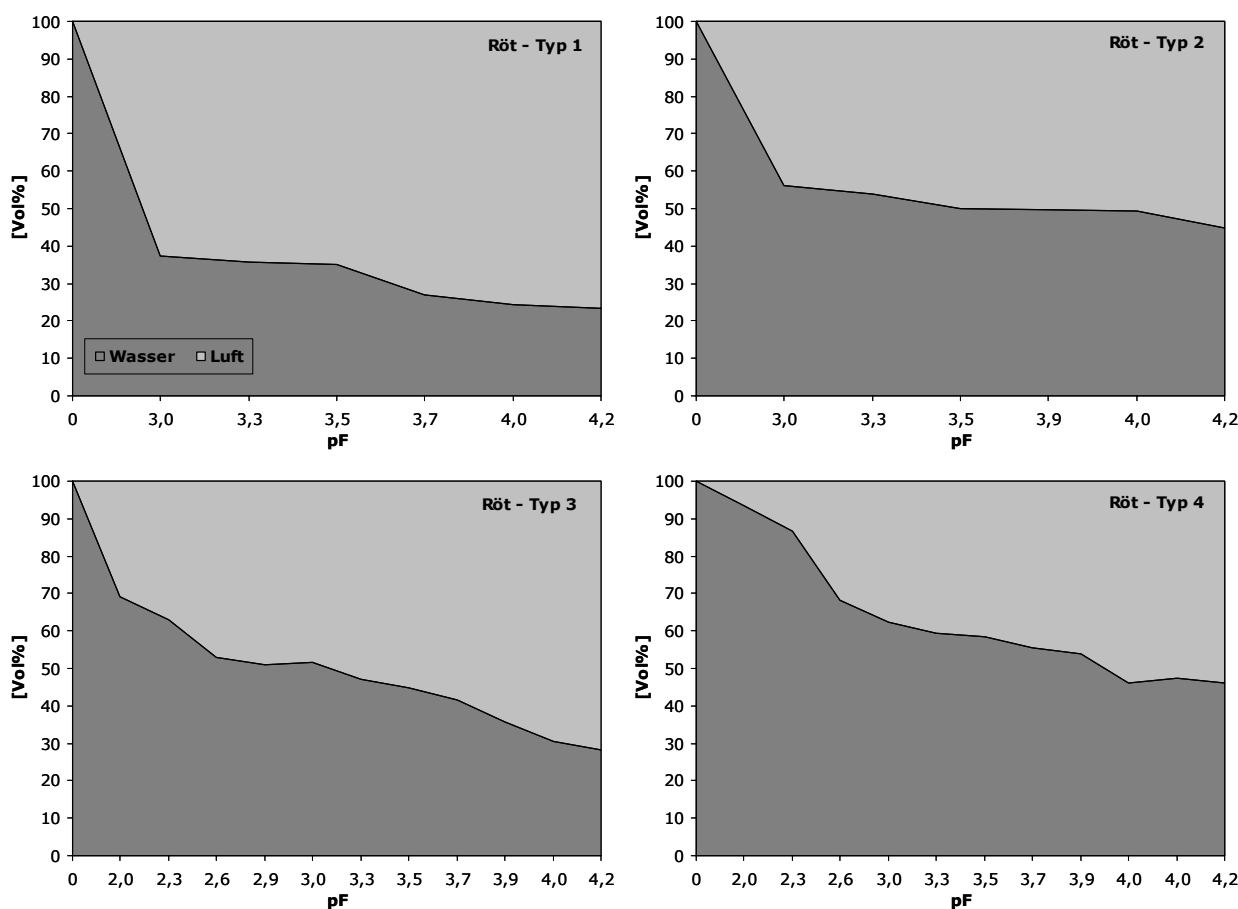
Dass die Saugspannung bei sehr geringen Sättigungsgraden nahezu unabhängig vom Verwitterungsgrad ist, könnte durch eine Dominanz des Adsorptionswasseranteils über dem Kapillarwasseranteil hervorgerufen werden. Auf Grund der geringen mineralogischen Unterschiede und ähnlichen spezifischen Oberflächen unterscheiden sich die Saugspannungen kaum. Aufgrund der Unterschiede in der spezifischen Oberfläche und damit dem Adsorptionsanteil der Saugspannung steigt die Saugspannung in den Röt-Tonsteinen mit zunehmender Verwitterung geringfügig an. Bei höheren Sättigungsgraden steigt die entsprechende Wasserspannung mit dem Verwitterungsgrad, bei Wassergehalten nahe der vollständigen Sättigung wird dieser Effekt wieder abgeschwächt.

Die Ergebnisse unterliegen möglicherweise einem systematischen Fehler, da das Messprinzip mittels Druckmembranzelle von einem durchgängig planen Kontakt zwischen Probe und Membran ausgeht, der jedoch bei groben Aggregaten nicht gewährleistet werden kann. Dennoch stellt sich nach entsprechend längerer Versuchszeit ein Gleichgewichtswassergehalt ein, der dem angelegten Spannungsniveau entspricht.

Für die Wasseraufnahme- und -abgabefähigkeit, die den Trocknungs-Befeuchtungszерfall maßgeblich beeinflussen, ist die Porenradienverteilung von Interesse. Entsprechend der herrschenden Spannung kann eine Kapillare eines bestimmten Durchmessers kein Wasser mehr zurückhalten. In der DIN 19683-5 ergibt sich aus  $d = 0,3 / p$  der Äquivalentporendurchmesser  $d$  [cm], dessen Porenanteil bei der Wasserspannung  $p$  [mbar] gerade entwässert wird. Die Ergebnisse im Vergleich zu den Aggregatgrößenverteilungen sind in Abbildung 79 und Abbildung 82 dargestellt. Die Kurven von Korngrößen- und Porenradienverteilung verlaufen nicht parallel, wie bereits verschiedentlich (z.B. bei SCHICK 2004) für Böden beschrieben, da außer der Aggregat- und Partikelgrößenverteilung auch die Anordnung der anisotropen Tonteilchen und die Art der Kornkontakte, Zemente etc. eine Rolle spielen. Die räumliche Anordnung der Tonplättchen zueinander und damit die Porenraumgeometrie innerhalb einzelner Tonsteinaggregate verändern sich im Laufe der Verwitterung (BÖNSCH & LEMPP 2003), so dass die Veränderung des mikroskaligen Porenraumes nicht unbedingt gleichzeitig mit der Änderung der Makroporenverteilung durch Aggregatzerfall erfolgen muss.



**Abbildung 79** Porenradienverteilung (Summenkurven) der Röt-Tonsteine im Vergleich zu den Aggregatgrößenverteilungen.



**Abbildung 80** Entwicklung des Anteils an luft- und wassergefülltem Porenraum mit zunehmender Saugspannung (Röt-Tonsteine) Aus dem Wassergehalt kann man näherungsweise die Anteile an luft- und wassergefülltem Porenraum berechnen, wenn man die Schrumpfung der Proben während des Versuches berücksichtigt. Bei wenig verwitterten Tonsteine (Typ 1 und Typ 2) nimmt der Luftporenanteil bei niedrigen Saugspannungen zunächst rasch zu und zeigt bei  $pF > 3$  nur noch relativ geringe Veränderungen. Die stärker verwitterten Proben (Typ 3 und 4) zeigen eine deutliche Volumenverringerung während der Wasserabgabe, so dass der Luftporenanteil gleichmäßig - im Bereich niedriger Saugspannungen jedoch deutlich langsamer - zunimmt.

### 7.10.1.2 Opalinuston

Im Falle der untersuchten Opalinuston-Proben steigt die Saugspannung bei einem Sättigungsgrad  $S_R = 0,5$  von  $p_F = 1,9$  im wenig verwitterten (W1 / W2) auf  $p_F = 3,9$  in verwitterten (W4 / W5) Zustand an. Bei einem Sättigungsgrad  $S_R = 0,95$  erfolgt der Anstieg von  $p_F = 0,7$  im wenig verwitterten (W1 / W2) auf  $p_F = 1,0$  in verwitterten (W4 / W5) Zustand (Abbildung 78). Die Entwicklung der Verteilung von Porenluft und Porenwasser mit zunehmender Saugspannung verläuft analog zu den Röt-Tonsteinen (Abbildung 84).

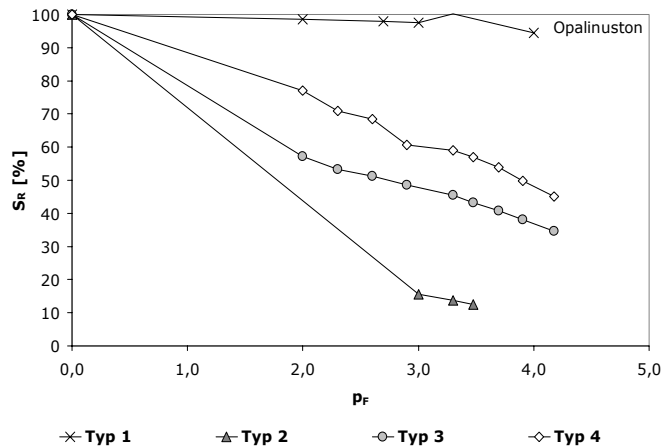


Abbildung 81 Saugspannungskurven des Opalinustons.

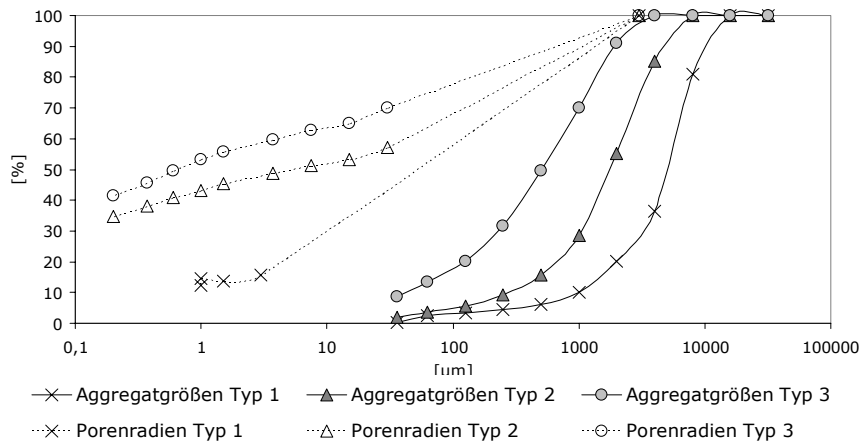


Abbildung 82 Porenradien- und Aggregatgrößenverteilung (Summenkurven) des Opalinustons.

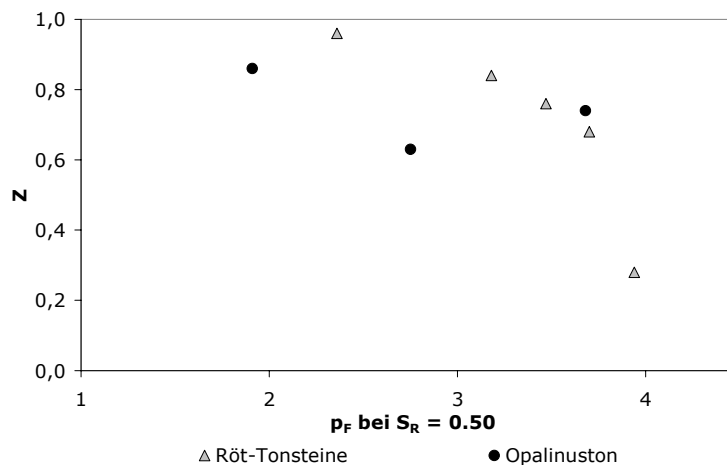
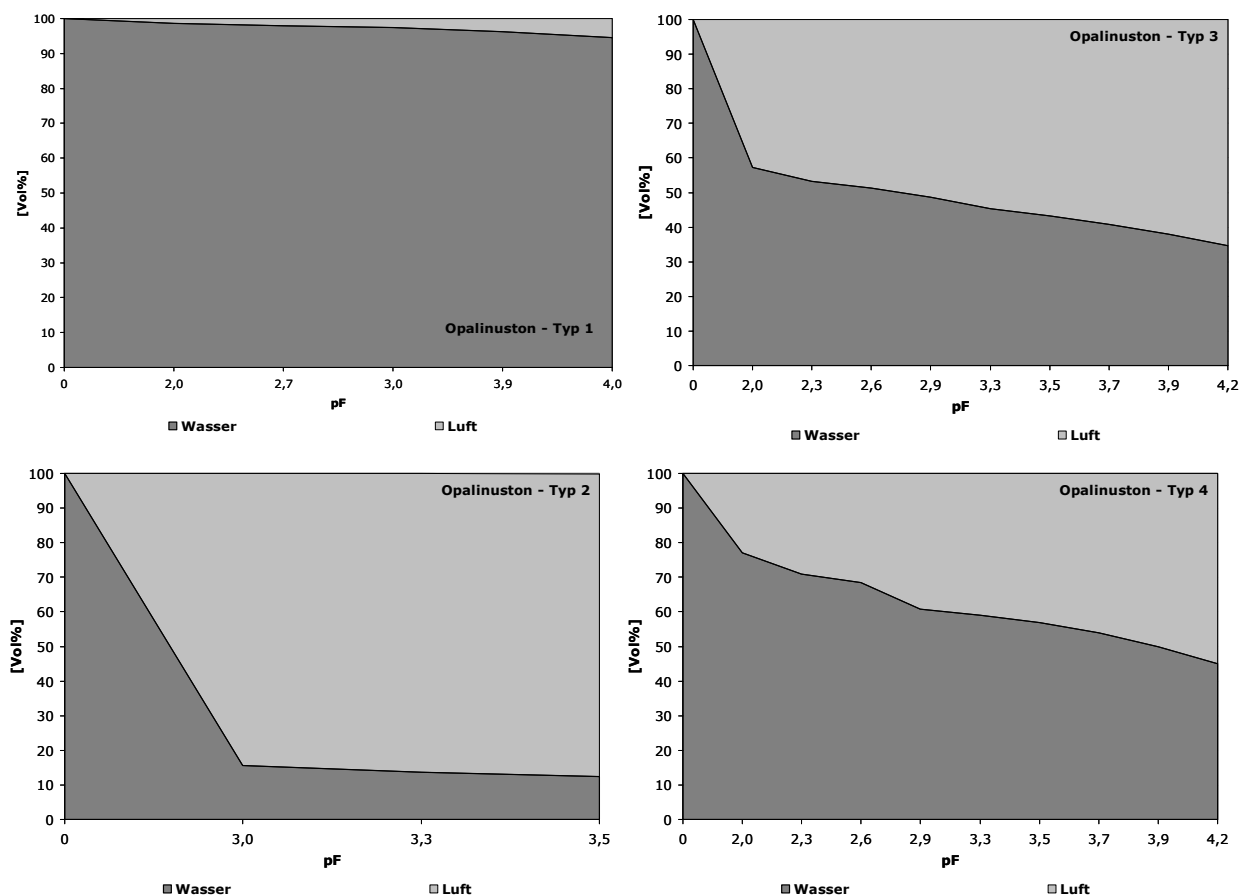


Abbildung 83 Zerfallsneigung in Abhängigkeit von der Saugspannung (bezogen auf eine 50-prozentige Sättigung des Porenraumes).

Die Zerfallsneigung  $Z$  wird von der Saugspannung stark beeinflusst. Herrschen größere Saugspannungen im Porenraum, die als allseitiger Druck auf das Korngerüst wirken, wird die Zerfallsneigung herabgesetzt. Dieser Zusammenhang ist in den Röt-Tonsteinen deutlicher ausgeprägt als im Opalinuston (Abbildung 83).

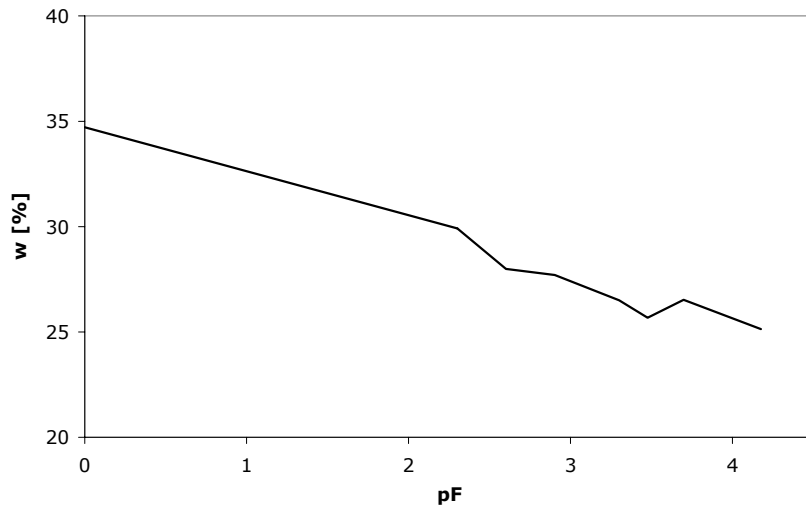


**Abbildung 84** Entwicklung des Anteils an luft- und wassergefülltem Porenraum mit zunehmender Saugspannung (Opalinuston).

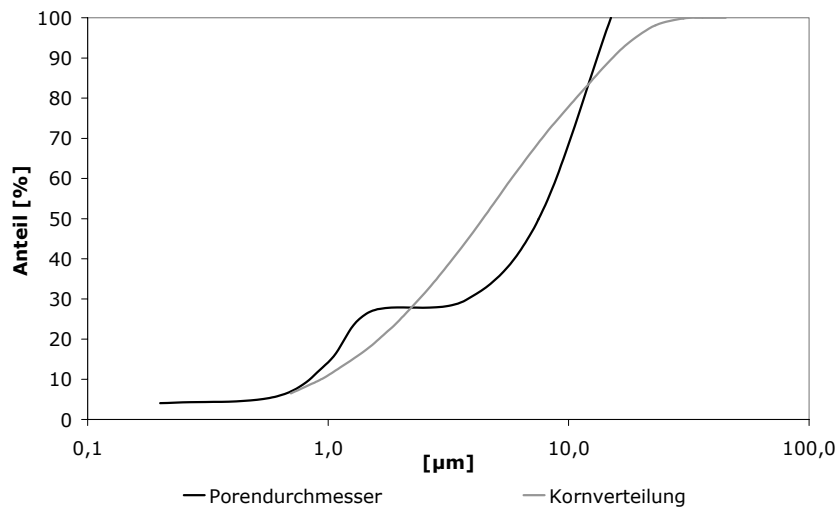
### 7.10.1.3 Tertiärton

Der Tertiärton hat eine flache Saugspannungskurve. Der Sättigungswassergehalt beträgt 34,7 %. Mit zunehmender Saugspannung kommt es zu einer gleichmäßigen Wassergehaltsabnahme (Abbildung 85). Bei einer Wasserspannung von 1500 kN/m<sup>2</sup> im Porenraum sind immer noch 25,1 % Wasser im Porenraum enthalten. Die Porenradienverteilung ist bimodal. Poren mit Durchmessern > 10 µm dominieren. Ein zweites Maximum liegt bei Porendurchmessern um 1 µm. Es fällt auf, dass die Porensummenkurve und die Kornsummenkurve in der gleichen Größenordnung verlaufen (Abbildung 86). Die Kornverteilung des Tertiärtons ist jedoch nicht bimodal.

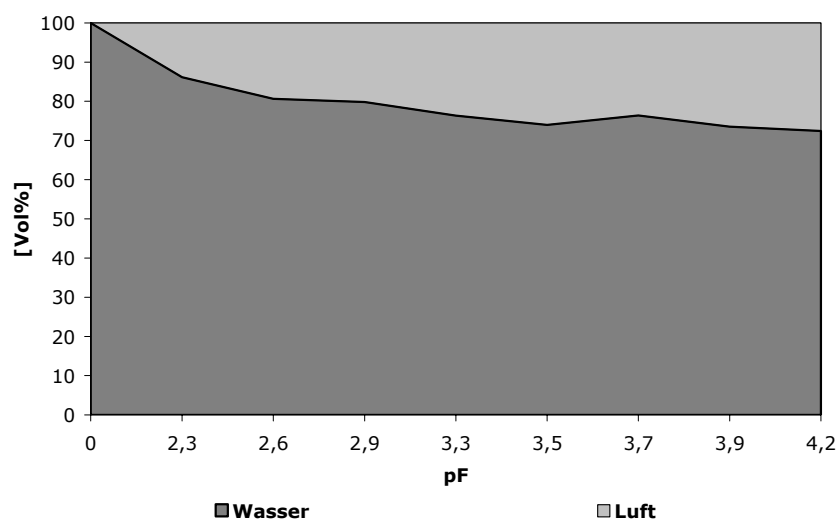
In Abbildung 87 ist die Verteilung von wasser- und luftgefülltem Porenraum dargestellt. Der Anteil an Porenluft an der Gesamtporenfüllung nimmt relativ gleichmäßig langsam mit zunehmender Saugspannung zu, so dass der Sättigungsgrad bei 1500 kN/m<sup>2</sup> noch 72,4 % beträgt.



**Abbildung 85** Saugspannungskurve des Tertiärtons bei Entwässerung.



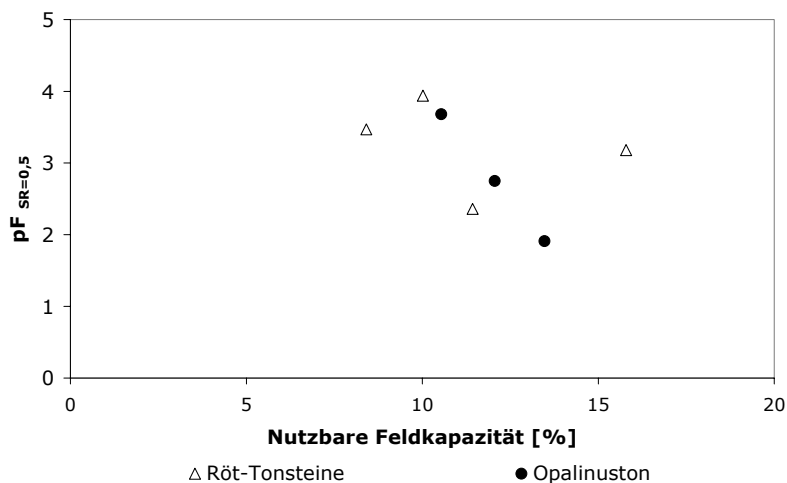
**Abbildung 86** Porenradien- und Korngrößenverteilung des Tertiärtons im Vergleich.



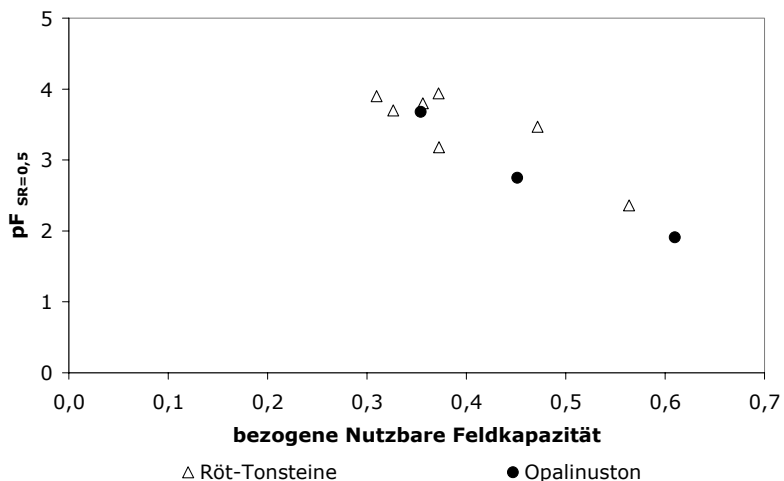
**Abbildung 87** Entwicklung des Anteils an luft- und wassergefülltem Porenraum mit zunehmender Saugspannung beim Tertiärton.

### 7.10.1.4 Abgeleitete Größen: Nutzbare Feldkapazität und mittlerer Sättigungsgrad

Als Maß für den absoluten Betrag der Saugspannung kann der einer 50%igen Sättigung entsprechende  $p_F$ -Wert angenommen werden. Dieser steigt mit zunehmendem Verwitterungsgrad (siehe Tabelle 21) von 2,36 auf 3,94 in Röt-Tonsteinen und von 1,91 auf 3,68 im Opalinuston. Vom Tertiärton könnte dieser Wert nur aus der Regressionsgleichung der Saugspannung (siehe 7.9.2) extrapoliert werden, da ein Sättigungsgrad von 70 % innerhalb des Messbereichs der Druckmembranzelle nicht unterschritten wurde. Vorausgesetzt, die Regressionsgleichung würde auch bei höheren Saugspannungen noch uneingeschränkt gelten, würde dies einem  $p_F$ -Wert von 14,3 entsprechen, was weit im Bereich der adsorptiven Saugspannung liegt.



**Abbildung 88** Nutzbare Feldkapazität und  $p_F$ -Wert bei einem Sättigungsgrad von 50 % (Daten aus je einem Verwitterungsprofil).



**Abbildung 89** Bezogene Nutzbare Feldkapazität und  $p_F$ -Wert bei einem Sättigungsgrad von 50 %.

Die nutzbare Feldkapazität (NFK, siehe 4.6.2) sinkt mit zunehmendem Verwitterungsgrad. Daraus ergibt sich, dass eine kleinere nutzbare Feldkapazität mit einer höheren Saugspannung verbunden ist (Abbildung 88). Die NFK beschreibt als relative Größe die Effektivität des Wassertransports. Im gleichen Spannungsbereich kann in weniger verwitterten Tonsteinen wegen der größeren NFK eine größere Menge Wasser transportiert werden. Für eine bessere Vergleichbarkeit von Proben mit unterschiedlichem Gesamtporenanteil kann die nutzbare Feldkapazität auf den Sättigungswassergehalt bezogen werden. Setzt man diese bezogene Nutzbare Feldkapazität mit dem  $p_F$ -Wert bei 50-iger Sättigung ins Verhältnis (Abbildung 89), wird der Zusammenhang zwischen NFK und der Saugspannung noch deutlicher.

Die Änderung der NFK im Verwitterungsprozess könnte man mit folgendem Modell erklären: Beim Übergang von Verwitterungstyp 1 zu Typ 2 nimmt die NFK zu. Auf Grund von Entspannung und Verwitterung werden Klüfte und Risse gebildet und die Porosität nimmt zu. Die zunehmende NFK ist ein sekundärer Effekt des größeren Makroporenanteils. Die darauf im Opalinuston folgende Verringerung der NFK, ist plausibel, da mit der Veränderung der Aggregatgrößenverteilung die Änderung der Porengrößenverteilung einhergeht (siehe Kapitel 7.6), die Aggregat-interne Porosität sich aber nicht wesentlich ändert. Im Falle der zwiebelschalenartigen Verwitterung der Röt-Tonsteine ändert sich nicht nur die Größe der Aggregate. Die Porosität einzelner Aggregate bleibt während des Verwitterungsprozesses nicht konstant, das heißt zwei Aggregate mit gleichem Durchmesser können eine sehr unterschiedliche Porosität haben. Damit hängt die nutzbare Feldkapazität nicht nur vom Verhältnis Matrix / Aggregate sondern auch vom Zustand eines jeden einzelnen Aggregats ab. Das Material ist sehr inhomogen. Mit jedem Zerfall eines größeren in Matrix eingebetteten Aggregats kann die NFK analog zum ersten Verwitterungsschritt wieder zunehmen.

Der Mittlere Sättigungsgrad ist der Sättigungsgrad bei einem  $p_F$  von 3,0 (Halbierende der NFK, das entspricht  $100 \text{ kN/m}^2$ ). Steigt mit zunehmendem Verwitterungsgrad der mittlere Sättigungsgrad (Tabelle 21), so bedeutet das, dass in stärker verwittertem Material tendenziell höhere Saugspannungen wirken.

Eine weitere übliche Methode, die Saugspannungskurve zu charakterisieren, ist die Zwei-Punkt-Methode mit Lufteintrittswert und Residualwassergehalt (VANAPILLI et al. 1998). Diese Methode entbehrt einer wirklichen physikalischen Grundlage, da es für den residualen Wassergehalt bisher keine einheitliche Definition gibt. Zum einen wird er als der Punkt der Saugspannungskurve verstanden, an dem der Übergang von hauptsächlich kapillaren zu hauptsächlich adsorptiven Wasserbindungskräften erfolgt (SILLERS 1997). Somit ist für die Bestimmung eine graphische Konstruktion analog zum Lufteintrittswert durch Tangenten an die einzelnen Abschnitte der Saugspannungskurve im Bereich zwischen 0 und  $1000000 \text{ kPa}$  notwendig (VANAPILLI et al. 1998). Nach thermodynamischen Prinzipien konnte gezeigt werden, dass bei einer Saugspannung von  $1000000 \text{ kPa}$  der Wassergehalt null sein muss (WILSON et al. 1994) Üblicherweise liegen jedoch Messwerte nur im Bereich 0 bis  $1500 \text{ kPa}$  vor, weshalb andere Autoren (VAN GENUCHTEN 1980) den residualen Wassergehalt bei einer Saugspannung von  $1500 \text{ kPa}$  definiert haben. Dieser Ansatz ist in den untersuchten Tonsteinen kaum anwendbar, da die Wassergehalte bei  $1500 \text{ kPa}$  zum Teil noch sehr hoch sind. LUCKNER et al. (1989) beschreiben den Residualwassergehalt als den maximalen Anteil von Wasser im Porenraum, bei dem kein Fließen mehr möglich ist, weil die Adsorptionskräfte zu groß werden, das heißt die ungesättigte Permeabilität gleich null ist. Durch Evaporisation (bzw. durch Ofentrocknung unter Laborbedingungen) kann ein Boden zudem über den Residualwassergehalt hinaus austrocknen. Da die für einen Boden charakteristische Saugspannungskurve eine kontinuierlich verlaufende Funktion ist, gibt ein solcher willkürlich gewählter Punkt keinen brauchbaren Wert, um die Wirkung der Saugspannung auf Festigkeitseigenschaften zufrieden stellend wiederzugeben. Deshalb wird im Folgenden versucht, die charakteristische Saugspannungskurve durch eine logarithmische Funktion zu beschreiben.

**Tabelle 21** Saugspannung bei einem Sättigungsgrad von 50 %, Nutzbare Feldkapazität und mittlerer Sättigungsgrad unterschiedlich verwitterter Tonsteine. (Im Fall des Opalinuston Typ 1 wurde im Messbereich ein Sättigungsgrad von 0,9 nicht unterschritten).

Verwitterungstyp	Röt-Tonsteine				Opalinuston				Tertiärton
	1	2	3	4	1	2	3	4	-
$P_{F \text{ SR}=0,50}$	2,36	3,18	3,47	3,94	-	1,91	2,75	3,68	-
<b>nutzbare Feldkapazität</b>	11,43	15,79	8,41	10,02	(0,3)	13,47	12,06	10,54	5,28
<b>Mittl. Sättigungsgrad</b>	0,43	0,59	0,50	0,69	(0,98)	0,37	0,48	0,62	0,79



### 7.10.2 REGRESSION DER SAUGSPANNUNGSKURVEN

Die Regression der Saugspannungskurven erfolgte unter Verwendung einer mathematischen Software (MatheAss 8.0). Als x-Werte wurden die Spannungen [kN/m<sup>2</sup>] und als y-Werte die dazugehörigen Wassergehalte verwendet. Dabei wurde zur besseren Vergleichbarkeit für alle Proben einheitlich ein logarithmisches Anpassungsverfahren der Form  $y = a + b \cdot \ln(x)$  gewählt (Tabelle 22). Die Variable a kennzeichnet den Sättigungswassergehalt und der Term  $b \cdot \ln(x)$  den Verlauf der Saugspannungskurve. Für die Variable b gilt:  $-3 < b < 0$ . Die Kurven verlaufen umso flacher, je kleiner  $b \cdot \ln(x)$  ist. Bis auf wenige Ausnahmen konnte so ein Bestimmtheitsmaß  $> 0,95$  erreicht werden.

**Tabelle 22** Regression der Saugspannungskurven,  $B$  = Bestimmtheitsmaß,  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $S$  = Standardabweichung, (mit \* gekennzeichnet Proben stammen von verschiedenen Lokalitäten, die nicht besonders gekennzeichneten entsprechen der Verwitterungsreihe eines Aufschlusses).

	Regressionsgleichung	Statistische Parameter
<b>Opalinuston</b>		
Typ 1	$y = 8,345 - 0,039 \ln(x)$	$B = 0,896, r = 0,946, S = 0,051$
Typ 2	$y = 22,090 - 2,439 \ln(x)$	$B = 0,990, r = 0,995, S = 1,031$
Typ 3	$y = 26,725 - 2,185 \ln(x)$	$B = 0,947, r = 0,973, S = 1,540$
Typ 4	$y = 29,769 - 1,909 \ln(x)$	$B = 0,991, r = 0,996, S = 0,527$
<b>Röt-Tonsteine</b>		
Typ 1	$y = 20,278 - 2,070 \ln(x)$	$B = 0,989, r = 0,995, S = 0,782$
Typ 2	$y = 42,402 - 2,860 \ln(x)$	$B = 0,986, r = 0,993, S = 1,233$
Typ 3	$y = 17,829 - 1,523 \ln(x)$	$B = 0,985, r = 0,993, S = 0,519$
Typ 4	$y = 26,930 - 1,814 \ln(x)$	$B = 0,876, r = 0,936, S = 2,001$
Typ 2*	$y = 18,736 - 1,216 \ln(x)$	$B = 0,967, r = 0,984, S = 0,707$
Typ 3*	$y = 18,147 - 1,254 \ln(x)$	$B = 0,986, r = 0,993, S = 0,543$
Typ 4*	$y = 40,229 - 2,872 \ln(x)$	$B = 0,968, r = 0,984, S = 1,570$
<b>Tertiärton</b>		
	$y = 32,300 - 1,045 \ln(x)$	$B = 0,980, r = 0,990, S = 0,490$

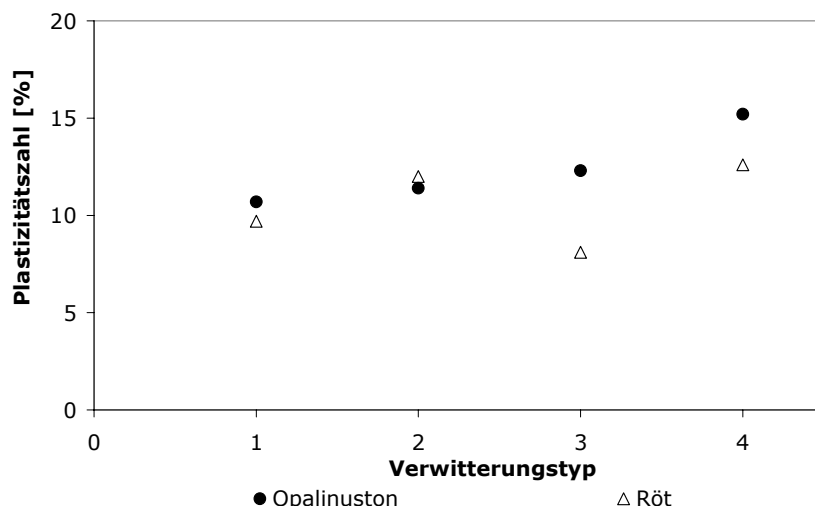
Die Standardabweichungen des Wassergehaltes betragen zwischen 0,05 und 2,00 % und liegen aufgrund der starken Inhomogenität der Tonsteine durchaus im Bereich der Reproduzierbarkeit von Wassergehaltsbestimmungen. Die Umkehrfunktionen der Regressionsfunktionen wurden im Folgenden zur Berechnung der einem bestimmten Wassergehalt entsprechenden Saugspannung verwendet.

### 7.11 Konsistenzgrenzen

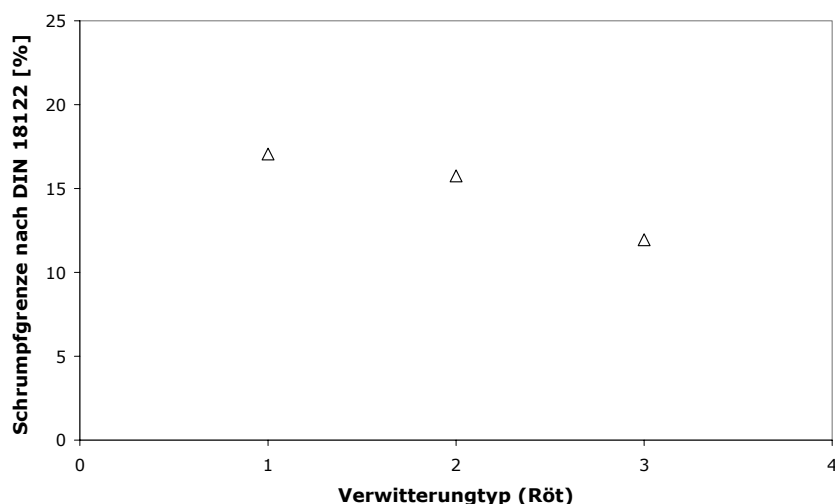
Die Bestimmung der Konsistenzgrenzen erfolgte jeweils an Proben der verschiedenen Verwitterungstypen aus einem Verwitterungsprofil im Opalinuston (Essingen) und Röt (Deuna). Die Plastizitätszahlen sind relativ niedrig, im Falle des Opalinustons zwischen 10,7 % bei Typ 1 und 15,2 % bei Typ 4 und im Falle des Röts zwischen 8,1 und 12,6 %. Im Allgemeinen steigt die Plastizität mit zunehmendem Verwitterungsgrad, wie in Abbildung 90 dargestellt.

Die Schrumpfgrenze nimmt mit zunehmendem Verwitterungsgrad ab, d.h. je weniger verwittert ein Ton ist, umso höher ist sein Wassergehalt, wenn die Schrumpfgrenze erreicht ist. Auf Grund des stabilen Korngerüsts ist der Zeitpunkt der Volumenkonstanz eher erreicht. Da die Kapillarität der stabilen Poren nicht mehr ausreicht, um Wasser vom Inneren nach außen zu transportieren, stellt sich der Farbumschlag eher ein.

Die Fließgrenze des Opalinustons liegt für den Typ 1 bei 28,6 %, für den Typ 3 bei 33,6 % und für den Typ 4 bei 37,6 %. Ebenso steigt der Wassergehalt an der Ausrollgrenze von 18,0 % bei Typ 1, auf 21,3 % bei Typ 3 und 22,7 % bei Typ 4. Der natürliche Wassergehalt steigt deutlich von 7,9 % bei Typ 1, auf 12,9 % bei Typ 3, auf 19,2 % bei Typ 4. Die sich daraus ergebenden Plastizitäts- und Konsistenzzahlen sowie Bodenklassen sind in Tabelle 23 und Tabelle 24 aufgeführt.



**Abbildung 90** Plastizität von Opalinuston und Röt-Tonen in Abhängigkeit vom Verwitterungsgrad.



**Abbildung 91** Abhängigkeit der Schrumpfgrenze von Röt-Tonen vom Verwitterungsgrad.

Der natürliche Wassergehalt der Röt-Tonsteine steigt mit dem Verwitterungsgrad von 8,8 % bei Typ 1 auf 27,7 % bei Typ 4. Während beim Opalinuston die Wassergehalte der Fließ- und Ausrollgrenze kontinuierlich mit dem Verwitterungsgrad zunehmen, streuen diese Werte bei den Röt-Tonsteinen stärker (siehe Tabelle 23 und Tabelle 24). Die Plastizitätszahlen steigen im allgemeinen Trend jedoch ebenso wie beim Opalinuston mit dem Verwitterungsgrad, wobei der Wert für den Typ 3 vermutlich als Ausreißer zu werten ist, da wie schon in Kap. 6.9 angedeutet, die notwendige Aufbereitung der Proben zu großen Fehlern führen kann.

**Tabelle 23** Konsistenzgrenzen von verwittertem Opalinuston.

Probe	$w_{nat}$ [%]	$w_L$ [%]	$w_p$ [%]	$i_p$ [%]	$i_c$	Bodenklasse
TYP 1	7,9	28,6	18,0	10,7	1,94	ST
TYP 2	8,0	33,4	22,0	11,4	2,23	TL
TYP 3	12,9	33,6	21,3	12,3	1,68	TL
TYP 4	19,2	37,6	22,7	15,2	1,20	TM

**Tabelle 24** Konsistenzgrenzen von verwitterten Röt-Tonsteinen.

Probe	$W_{nat}$ [%]	$W_L$ [%]	$W_P$ [%]	$I_P$ [%]	$I_C$	Bodenklasse
<b>TYP 1</b>	8,8	31,2	21,5	9,2	2,32	ST-TL
<b>TYP 2</b>	11,0	28,8	16,7	12,0	1,48	ST-TL
<b>TYP 3</b>	15,6	23,6	15,6	8,1	1,00	ST
<b>TYP 4</b>	27,7	32,7	20,1	12,6	0,39	TL

XIANG 1997 beschrieb durch die Kationenbelegung der Tonminerale hervorgerufene Veränderungen des Mikrogefüges auch bei nicht quellfähigen Mineralen (Chlorit, Illit). Bei zweiwertigen Kationen bilden sich bevorzugt Kanten-Fläche-Kontakte aus, was zu einer Flockung und entsprechend großem Porenraum führt. Dadurch kann mehr Wasser aufgenommen werden, was eine höhere Plastizität zu Folge hat. Bei Belegung mit einwertigen Kationen neigen die Tonminerale zu Dispersion und werden bei einer Verfestigung stärker eingeregelt. Es entsteht ein dichteres Gefüge mit niedrigerer Plastizität. Möglicherweise könnte die Streuung der Ergebnisse bei den Röt-Proben damit erklärt werden, dass die Proben vor dem Versuch natürlich bedingt nicht mit einem bestimmten Kation belegt waren.

### 7.12 Mineralcharakterisierung

Die quantitative Tonmineralanalyse mittels Röntgendiffraktometrie sollte Aufschluss über tonmineralogische Veränderungen im Verwitterungsprozess geben.

In den Röt-Tonsteinen wird der Tonmineralanteil von Illit dominiert. Zusätzlich treten Kaolinit und in sehr geringen Anteilen ein nicht näher spezifizierbares Wechsellagerungsmineral auf. Die Intensitäten dieses Minerals im Röntgendiffraktogramm sind im Vergleich zu den Kaolinit- und Illit-Peaks so gering, dass die Bestandteile der Wechsellagerung nicht näher bestimmt werden konnten. Quellfähige Tonminerale oder Chlorit konnten nicht nachgewiesen werden. Auch nach Glykolisierung der Proben kam es zu keinen Peakverschiebungen im Röntgendiffraktogramm. Der Grobanteil besteht hauptsächlich aus albitreichen Plagioklasen und Quarz, daneben treten Glimmer (Muskovit / Illit) und untergeordnet etwas Orthoklas auf.

**Tabelle 25** Tonmineralzusammensetzung und Anteil der Fraktionen < 2 µm bzw. 2 - 63 µm der Röt-Tonsteine

	Mixed Layer	Illit	Kaolinit	Anteil an Gesamtprobe
<b>Tonfraktion (&lt; 2µm)</b>				
Typ 1(DEU5)	3	87	10	15
Typ 2 (DEU7)	2	89	9	31
Typ 3 (DEU10)	2	87	11	21
<b>Schluffkornfraktion (2 - 63 m)</b>				
Typ 1(DEU5)	4	83	13	75
Typ 2 (DEU7)	3	83	14	68
Typ 3 (DEU10)	3	81	17	79

**Tabelle 26** Tonmineralzusammensetzung und Anteil der Fraktion < 2 µm bzw. < 63 µm des Opalinustons

	Illit	Kaolinit	Anteil
<b>Tonfraktion (&lt; 2µm)</b>			
Typ 1(ESS2)	75	25	35
Typ 2 (ESS1)	70	30	33
Typ 3 (ESS3)	73	27	34
Typ 4 (ESS5)	79	21	28
<b>Schluffkornfraktion (2 - 63 µm)</b>			
Typ 1(ESS2)	72	28	65
Typ 2 (ESS1)	69	31	67
Typ 3 (ESS3)	70	30	66
Typ 4 (ESS5)	75	25	62

Im Opalinuston bestehen die Tonminerale aus Illit und Kaolinit. Illit kommt in geringerer Menge als in den Röt-Tonsteinen vor. Im Grobanteil können keine wesentlichen Anteile von Feldspäten nachgewiesen werden. In erster Linie tritt hier Quarz auf.

Es können keine signifikanten Unterschiede der mineralischen Zusammensetzung in Proben der gleichen Lokalität mit unterschiedlichen Verwitterungsgraden festgestellt werden (Tabelle 25 und Tabelle 26). Im betrachteten Zeitraum der Verwitterung findet ein rein mechanischer Zerfall der Tonsteine statt. Chemische Umwandlungen beschränken sich höchstens auf Porenfüllungen und Zemente, welche nicht Gegenstand dieser Arbeit waren. Die tonmineralogische Zusammensetzung wird durch die Verwitterung nicht verändert. Die Röntgendiffraktogramme der Tonmineralanalysen sind im Anhang (A.9) beigefügt.

Der tertiäre Ton wurde qualitativ röntgenographisch untersucht und die quantitative Tonmineralzusammensetzung aus einer chemischen Analyse errechnet. Der Grobanteil besteht im Wesentlichen aus Quarz. Die Tonminerale werden zu 83 % von Kaolinit dominiert, daneben kommen 8 % Clinochlor, 5 % Illit und 4 % Muskovit vor.

**Tabelle 27** Mineralzusammensetzung des Tertiärtons.

Messung:	1	2	3	Mittelwert	Tonmineralzusammensetzung
<b>Quarz</b>	75	75	73	<b>74</b>	-
<b>Kaolinit</b>	21	20	23	<b>21</b>	<b>83</b>
<b>Clinochlor</b>	2	2	2	<b>2</b>	<b>8</b>
<b>Muskovit</b>	1	1	1	<b>1</b>	<b>4</b>
<b>Illit</b>	1	1	1	<b>1</b>	<b>5</b>

### 7.13 REM

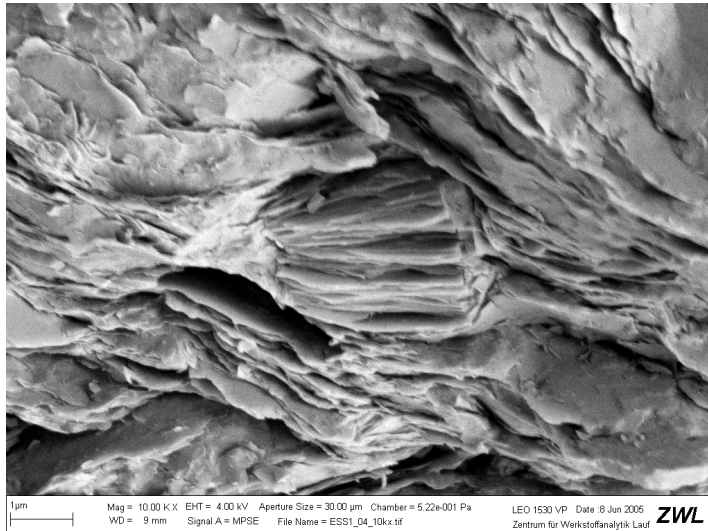
Wie die oben beschriebenen Ergebnisse zeigen, sind die unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften der schnell verwitternden Tonsteine nicht ohne weiteres auf mineralogische Unterschiede zurückzuführen. Vielmehr gibt es strukturelle Veränderungen, die zu einer Veränderung des Porenraumes und der damit verbundenen kapillaren Kräfte führen. Diese strukturellen Veränderungen sowie die räumliche Anordnung des Kapillarwassers wurden in REM-Aufnahmen sichtbar zu machen versucht.

Besonders beim Opalinuston gestalteten sich hohe Vergrößerungen der gefrorenen Proben im Rasterelektronenmikroskop schwierig. Aufgrund der hohen Porositäten konnte kein ausreichender Kontakt zum Probenträger hergestellt werden, auch längere Bedampfungszeiten erbrachten keine Verbesserung der Aufnahmen, so dass bei höheren Vergrößerungen keine scharfen Bilder mehr zu erzielen waren.

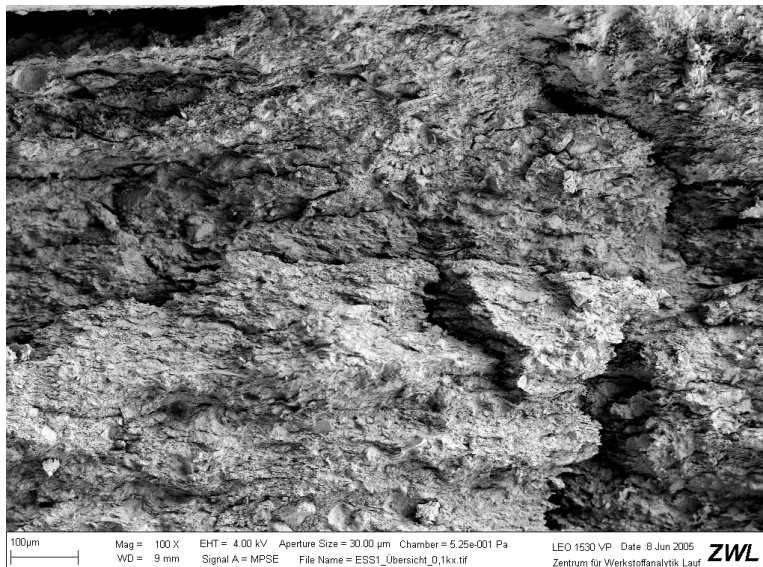
Bei den wenig verwitterten Tonsteinen ist eine Vorzugrichtung der Tonplättchen in Form einer welligen Parallellagerung erkennbar. Es gibt Mikroaggregate mit strenger paralleler Lagerung der Tonminerale, die vor allem im Opalinuston wegen des höheren Kaolinit-Gehaltes häufiger als in den Röt-Tonsteinen auftreten (Abbildung 92). Die Illit-Plättchen zeigen die typische mehr oder weniger chaotische Anordnung. Es sind feine Risse erkennbar, die Strukturen erinnern an ein mikroskaliges Bild der typischen Aufschlussverhältnisse (Abbildung 93). Mit zunehmender Verwitterung kommt es zur Vergrößerung der Abstände zwischen den Tonplättchen, was eine Auflockerung des Gefüges widerspiegelt. Erst bei fortschreitender Verwitterung geht die Partikelorientierung bereichsweise in eine Kartenhausstruktur über.

Wasser füllt den Porenraum sowohl als Zwickelfüllung als auch als dünne Zwischenlagen innerhalb der Tonaggregate. Bei unvollständiger Sättigung haftet das Wasser in größeren Poren als Film an, während es kleinere Poren noch vollständig füllt. Die Verteilung des Wassers ist im teilgesättigten Porenraum irregulär. Es ist scheinbar dem Zufall überlassen,

welche Pore wasserführend ist und welche nicht (Abbildung 94). Es ist nicht zu erwarten, dass bei den kurzen Sublimationszeiten das Wasser aus dem Porenraum verdampft wurde, da sich teilweise noch Wasser auf der Probenoberfläche befand.



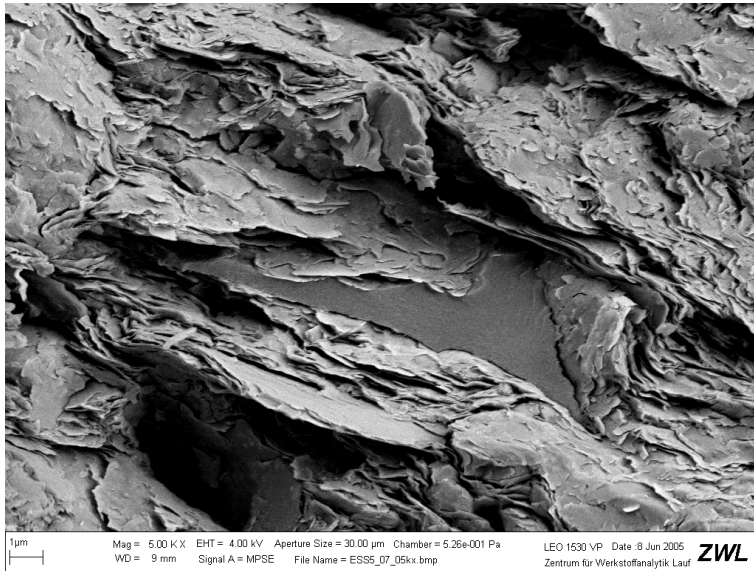
**Abbildung 92** Tonstein (Opalinuston) des Typs 2: parallel gelagertes Aggregat von Kaolinit-Blättchen innerhalb der welligen Struktur.



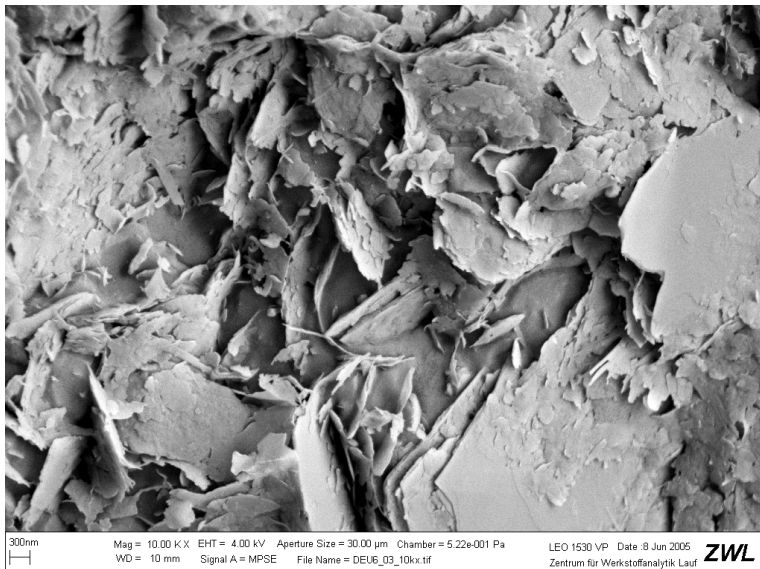
**Abbildung 93** Opalinuston des Typs 2: Mikrostruktur.

Per digitale Bildanalyse (Diana 2.0) wurde die Einregelung (Anordnung der Vorzugsrichtungen) der Tonminerale in den Aufnahmen mit 10000-facher Vergrößerung bestimmt. Beim Opalinuston (Abbildung 98) sind die Tonminerale mehr oder weniger parallel orientiert. Die wellige Lagerung spiegelt sich in der etwas breiten Verteilung in der Richtungsrose wieder. Die Kartenhausstruktur des am stärksten verwitterten Typs 4 zeigt sich in der rhombischen Ausbildung der Richtungsrose. Die zweite Vorzugsrichtung hat einen Winkel von etwa 80 ° zur ersten.

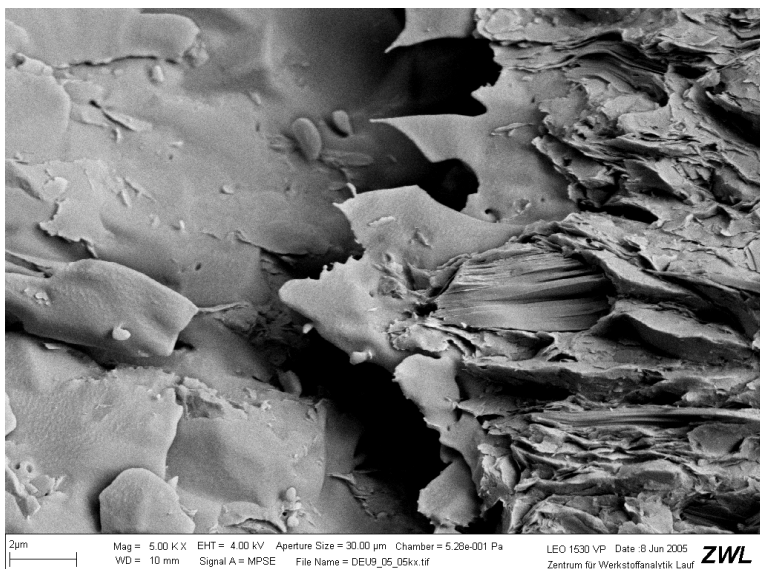
Bei den Röt-Tonsteinen ist die Parallellagerung von vornherein weniger deutlich ausgeprägt (Abbildung 97). Mit zunehmender Verwitterung gibt es zwei Vorzugsrichtungen in einer Kartenhausstruktur, die jedoch mit etwa 70 ° zwischen den beiden Achsen etwas flacher aufeinander stehen als im Opalinuston.



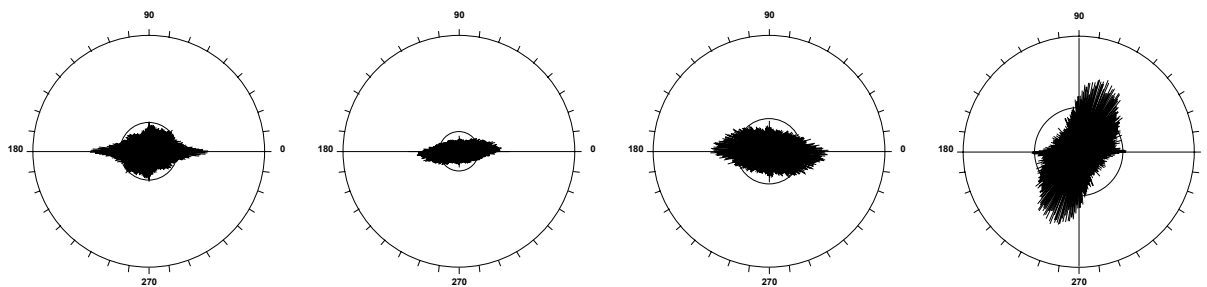
**Abbildung 94** Opalinuston des Typs 4: Wassergefüllte Pore, benachbarte Poren sind wasserfrei.



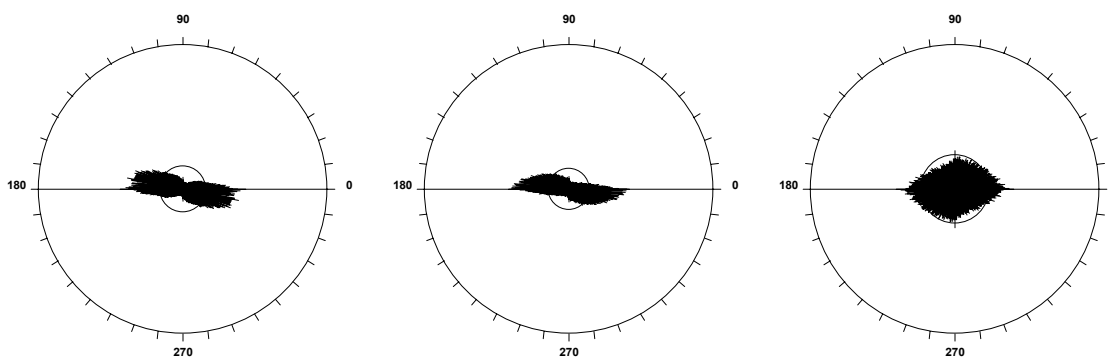
**Abbildung 95** Röt-Tonstein des Typs 4: Kartenhausstruktur mit Wasser im Porenraum.



**Abbildung 96** Röt-Tonstein des Typs 3: anhaftende Eisschicht. Porenoberfläche ist mit Wasser bedeckt.

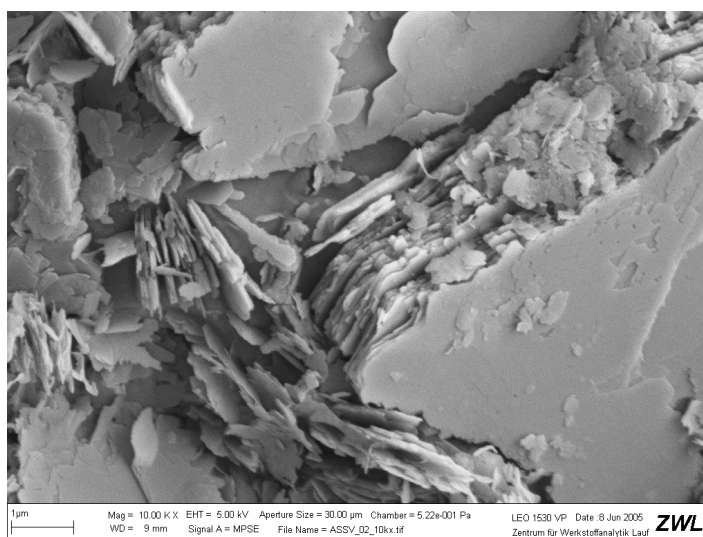
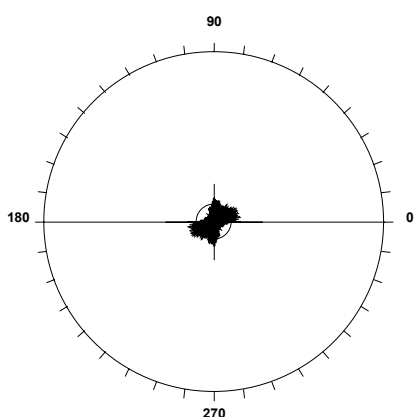


**Abbildung 97** Richtungsrosen der Tonpartikelorientierung in Röt-Tonsteinen (digitale Bildanalyse der Rasteraufnahmen bei 10000-facher Vergrößerung) A) Typ 1, B) Typ 2, C) Typ 3, D) Typ 4.



**Abbildung 98** Richtungsrosen der Tonpartikelorientierung im Opalinuston (digitale Bildanalyse der Rasteraufnahmen bei 10000-facher Vergrößerung) A) Typ2, B) Typ3 und C) Typ4.

Die Tonminerale des schwach überkonsolidierten Tertiärtons sind zu einem großen Teil in parallel gelagerten Schichtstapeln angeordnet. Das heißt, die Tonpartikelorientierung im Tertiärton wird von den für Kaolinit typischen streng parallel gelagerten Schichtstapeln dominiert. Diese Schichtpakete bilden eine übergeordnete Kartenhausstruktur. Die geringen Anteile von Muskovit und Illit haben auf die Sedimentstruktur offenbar keinen bedeutenden Einfluss. In der Richtungsrose zeigen sich die zwei Vorzugsrichtungen mit einem Winkel von etwa 70 ° zueinander sehr deutlich.



**Abbildung 99** Richtungsrose der Tonpartikelorientierung (digitale Bildanalyse bei 10000-facher Vergrößerung) und REM-Aufnahme des tertiären Tons. Parallele Schichtstapel bilden eine übergeordnete Kartenhausstruktur.

## **8 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse**

Um die wechselnden mechanischen Eigenschaften der halbfesten Gesteine zu verstehen, ist es zunächst erforderlich, Kenntnisse über die Wasserbindung bzw. den Wassertransport und die damit verbundenen Kraftwirkungen im teilgesättigten Porenraum zu haben. Damit verbunden ist auch die Kenntnis der strukturellen Anordnung der Feststoffpartikel. Hierfür waren unterschiedlichste Versuche notwendig, deren Ergebnisse sich in unterschiedlichem Maß für die eigentliche Fragestellung als aussagekräftig erwiesen.

Die Wasseraufnahmekapazität charakterisiert den Porenraum durch maximal aufnehmbare Wassermenge. Dabei werden aufgrund der vorangehenden Probenrocknung kapillarer und adsorptiver Anteil des gebundenen Wassers gemeinsam erfasst. Die Versuche zur Messung von Wasserdampfadsorption und spezifischer Oberfläche charakterisieren mit unterschiedlichen Ansätzen den adsorptiven Anteil der Saugspannung.

Mit Hilfe der Wasserdampfadsorption erhält man die Wassermenge, die dem Adsorptionswasser entspricht, direkt. Die Messung der spezifischen Oberfläche gibt Aufschluss darüber, welche Fläche für die Interaktion zwischen Feststoff und Porenfluid überhaupt zur Verfügung steht. Durch Quell- und Schrumpfversuche wurde versucht, die Ergebnisse dieser oben genannten Index-Versuche mit dem Materialverhalten, d. h. dem durch wechselnde Wassergehalte in Gang gesetzten Entfestigungsprozess, in Verbindung zu bringen.

Die Versuche zum Verwitterungszерfall liefern mit der daraus berechenbaren Zerfallsneigung  $Z$  ein Maß für die Veränderlichkeit des Gesteins. Um die Festigkeit der unterschiedlich verwitterten Gesteine zu bestimmen, wurden direkte Scherversuche und Kriechversuche herangezogen.

Für ein besseres Verständnis der Zusammenhänge zwischen Saugspannung und Festigkeit wurden parallel zu der Vielzahl an Versuchen mit Tonsteinen, Untersuchungen an einem wenig überkonsolidierten homogenen Tonboden durchgeführt. Die Untersuchungen konzentrieren sich im Wesentlichen auf die Bestimmung der charakteristischen Saugspannungskurve und die wassergehaltsabhängige Scherfestigkeit.

### **8.1 Verwitterungsabhängiges Verhalten der überkonsolidierten Tonsteine**

Das Wasseraufnahmevermögen der einzelnen Aggregatgrößenfraktionen aus dem Enslin-Versuch stellt einen Anhaltspunkt für das Wasseraufnahmeverhalten der verwitterten Tonsteine dar. Jedoch ist die Methode fehlerbehaftet, da das Gerät ursprünglich lediglich für den Feinanteil eines Bodens konzipiert ist. Wie sich in der enormen Streuung der Ergebnisse zeigt, ist durch die Wirkung der Porosität innerhalb der Aggregate, das heißt auch aufgrund des unterschiedlichen Verwitterungszustandes eines jeden einzelnen Aggregates auf der Filterplatte, das Zusammenspiel beeinflussender Faktoren so komplex, dass eine allgemeingültige Aussage zu Veränderungen des Wasseraufnahmeverhaltens mit fortschreitender Verwitterung höchstens qualitativ getroffen werden kann. Ein weiterer Faktor sind die Unterschiede im Wasseraufnahmevermögen bei unterschiedlicher Kationenbelegung (XIANG 1997). Eine einheitliche Belegung war nicht möglich, da die hierfür notwendigen Aufbereitungsschritte die Probenstruktur zerstört hätten.

Das Wasseraufnahmevermögen der separierten Tonfraktion korreliert weder eindeutig mit dem Verwitterungsgrad noch mit der tonmineralogischen Zusammensetzung. Offenbar spielt angesichts der sehr ähnlichen mineralogischen Zusammensetzung die Korngrößenverteilung in der Feinstfraktion die entscheidende Rolle für die Wasseraufnahmefähigkeit. Eine mit der Verwitterung zunehmende Aktivität der Tone kann demnach nicht festgestellt werden, was wiederum den von HENKE & HILLER (1985) gemachten Beobachtungen zur Kationenaustauschkapazität widerspricht. Um dieser Frage nachzugehen, müsste man die separierte Tonfraktion vor dem Versuch nach Enslin-Neff noch mit definierten Kationen belegen, um daraus resultierende Streuungen ausschließen zu können. Die spezifische



Oberfläche und damit die maximal mögliche Adsorptionswassermenge nehmen mit zunehmender Verwitterung ab. Bezüglich der Aggregatfraktionen sind deutliche Unterschiede zwischen Röt-Tonsteinen und Opalinuston festzustellen. Im Röt nimmt die spezifische Oberfläche mit zunehmender Aggregatgröße zwischen 63 und 500  $\mu\text{m}$  zu. Im Verwitterungsprofil in Deuna und einigen Einzelproben anderer Lokalitäten auch noch darüber hinaus bis zu einer Aggregatgröße bis max. 4 mm. Größere Aggregate konnten in der verwendeten BET-Apparatur nicht untersucht werden, sind aber quantitativ von untergeordneter Bedeutung. Bei den anderen Röt-Tonsteinen, bleibt die spezifische Oberfläche der gröbereren Aggregate gleich oder nimmt schwach ab. Diesen Effekt könnte man erklären, wenn man das Verwitterungsschema von EINSELE & WALLRAUCH (1964) auf den Maßstab der Tonsteinbröckchen überträgt (BÖNSCH & LEMPP 2004), wobei eine Auflockerung der einzelnen Aggregate durch allmähliche Verwitterung von außen nach innen stattfindet. Dadurch wird die äußere, stärker aufgelockerte Schicht mit erhöhter Porosität gebildet, während sich zum Inneren hin der Auflockerungsgrad verringert. GRONEMEYER et al. (1985) zogen dieses Zwiebelschalenprinzip zur Klassifikation des Verwitterungszustandes von überkonsolidierten Peliten heran. Sie konnten in REM-Bildern zeigen, dass die Teilentspannung, die bei beginnender Verwitterung zunächst noch nicht sichtbar ist, bei Fortschreiten der Verwitterung allmählich vom Rande her die Parallellagerung der diagenetisch verfestigten Tonminerale auflöst. Um den inneren stark überkonsolidierten Teil von Tonstein-Aggregaten bleibt zunächst eine konzentrisch angelagerte aufgelockerte Schicht. Mit zunehmender Verwitterung wird diese dispergiert und damit der Anteil plastischer Matrix erhöht. In-situ liegt folglich ein Gemisch aus den verschiedenen Aggregat-Größen und nicht mehr aggregierter Matrix vor. Das Gesamtverhalten des überkonsolidierten Tonsteines ist deshalb vom Anteil der einzelnen Fraktionen abhängig.

Im Opalinuston bleibt die spezifische Oberfläche in allen Aggregatfraktionen gleich. Das bedeutet, dass sich während des Zerfallsprozesses keine wesentlichen Veränderungen in der Porenraumstruktur einstellen können. Es ist also davon auszugehen, dass dieser in anderer Art und Weise zerfällt als die Röt-Tonsteine. Die Richtungsrosen der Tonpartikelorientierung aus den REM-Aufnahmen sind bei den Verwitterungstypen 1 bis 3 sehr ähnlich. Erst bei dem stark verwitterten Typ 4 ändert sich die Parallellagerung in eine Kartenhausstruktur. Ursache hierfür ist die Tonmineralzusammensetzung. Die geringen Anteile von 1 bis 3 % Wechsellagerungstonminerale in den Röt-Tonen reichen offensichtlich aus, den Zerfallsmechanismus zu beeinflussen. Im Opalinuston handelt es sich lediglich um ein physikalisches Zerschneiden der Aggregate entlang von Partikelgrenzen (siehe Abbildung 53, Kapitel 7.6). Dies belegen auch die Richtungsrosen der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen. Wenn im Zuge der einsetzenden Verwitterung Wasser in die Röt-Tonsteine eindringt, ist die osmotische Quellung der Wechsellagerungsminerale stärker als in reinem Illit oder Kaolinit. Bei der Glykolisierung zeigen die Röntgendiffraktogramme der Röt-Tonsteine keine Veränderung. Es kann sich folglich bei den Wechsellagerungsmineralen nicht um im eigentlichen Sinne quellfähige Tonminerale handeln. Trotz des geringen Anteils reicht ihre Volumenvergrößerung aus, um das geordnete Tongerüst zu zerstören, so dass die Partikelorientierung mit fortschreitender Verwitterung sukzessive schlechter wird. Möglicherweise wird die mechanische und osmotische Quellung auch durch den Gehalt an organischem Kohlenstoff begünstigt.

Die Entwicklung der Zerfallsneigung von Röt-Tonsteinen und Opalinuston unterstreicht den unterschiedlichen Zerfallsmechanismus. Die kaum bis wenig verwitterten Röt-Tonsteine zeigen eine stärkere Zunahme des Feinanteils, was zu einem größeren Unterschied der Medianwerte der Korngrößenverteilung und damit dem Wert der Zerfallsneigung führt. Durch das Ablösen der äußeren Schale entstehen kleinere Partikel als beim Zerschneiden der Opalinuston-Aggregate. Auch bei dem am stärksten verwitterten Typ 4 wird der Unterschied deutlich. Der stark verwitterte Opalinuston hat eine wesentlich größere Zerfallsneigung als augenscheinlich gleich stark verwitterte Röt-Tonsteine. Während letztere als tatsächlich plastifizierte tonige Sedimente vorliegen, dominieren im Opalinuston kleinste Aggregate von Schluffkorngröße. In

den Festigkeitseigenschaften spiegelt sich dieser strukturelle Unterschied nicht wieder. Die kleinen Aggregate des Opalinuston wirken letztlich wie ein bindiger Boden.

In den REM-Untersuchungen der Röt-Tonsteine wurde deutlich, dass die Kaolin-Blättchen parallele Schichtstapel innerhalb der welligen Struktur der Illit-Plättchen bilden. Die Ablagerung des Illits erfolgte chaotisch. Durch die Diagenese kam es zur Rotation, so dass sich die für das Gestein typische wellige Parallellagerung bildete. Durch die Verwitterung wird diese Parallellagerung zunehmend aufgelöst. Es bilden sich im wesentlichen Fläche-Kanten-Kontakte heraus, so dass der replastifizierte Röt-Ton eine Kartenhausstruktur aufweist.

Die Tonsteine haben aufgrund ihrer Versenkungstiefe eine so hohe Überlagerungsspannung erreicht, dass nur noch milieu-unabhängige elektrostatische Kraftwirkungen zwischen den Partikeln auf das Kompaktionsverhalten Einfluss hatten. Beim Vergleich von Röt-Tonsteinen und Opalinuston kann man folglich das unterschiedliche Ablagerungsmilieu vernachlässigen.

Die Tonmineralzusammensetzung bestimmt also aufgrund ihres Quellverhaltens den Zerfallsmechanismus. Dafür sind wie oben gezeigt nicht unbedingt quellfähige Minerale im eigentlichen Sinn notwendig. Ein Unterschied im osmotischen Quellverhalten kann entscheiden, ob ein Tonstein wie der Opalinuston einfach zerfällt oder wie bei den Röt-Tonsteinen die Aggregate zwiebelschalenartig verwittern. Die Unterschiede in der quantitativen Zusammensetzung einer wenig verwitterten und einer stark verwitterten Probe äquivalenter stratigraphischer Position sind jedoch nicht messbar, weshalb man die Tonmineralzusammensetzung nicht für das unterschiedliche mechanische Verhalten unterschiedlich stark verwitterter Tonsteine verantwortlich machen kann. Für weiterführende Arbeiten wäre von Interesse, inwiefern chemische Umwandlungen an Porenfüllungen und Zementen während des Zerfallsprozesses eine Rolle spielen.

Der Verlauf der  $p_F$ -Kurven konnte innerhalb des Messbereichs durch logarithmische Regression näherungsweise nachvollzogen werden. In der Regel verlaufen die Saugspannungskurven stärker verwitterter Tonsteine flacher, da es durch den Aggregatzerfall zu einer Abnahme der Grobporen kommt. Die Saugspannungskurven der vollständig replastifizierten triassischen und jurassischen Tonsteine und die des leicht überkonsolidierten tertiären Tons haben einen ähnlichen Verlauf. Lediglich der Sättigungswassergehalt ist bei den stark verwitterten mesozoischen Sedimenten etwas niedriger. Dies dürfte aber weniger von der Konsolidation als vielmehr von der mineralogischen Zusammensetzung abhängen. Die Kaolinit-Blättchen des Tertiärtons haben naturgemäß eine größere Kristallitgröße, weshalb die etwas weniger sperrigen Illit-Plättchen, die die Röt-Tonsteine und den Opalinuston dominieren, eine etwas dichte Packung und damit geringe Porosität ermöglichen.

Mit steigender Saugspannung sinkt die Zerfallsneigung der Tonsteine (siehe Abbildung 83). Hohe Saugspannungen im Porenraum wirken dem Aggregatzerfall der veränderlich festen Tonsteine entgegen. Dabei ist nicht nur das absolute Saugspannungsniveau entscheidend. Ebenso deutlich ist der Einfluss des Betrages der Saugspannungsänderung, die während eines Austrocknungs- bzw. Wiederbefeuchtungsprozesses durchlaufen wird. Diesen Betrag kann man mit Hilfe der NFK beschreiben. Beim Übergang von Verwitterungstyp 1 zu Typ 2 werden auf Grund von Entspannung und Verwitterung Klüfte und Risse gebildet, und die Porosität nimmt zu. Die zunehmende NFK ist ein sekundärer Effekt des größeren Makroporenanteils. Die darauf folgende Verringerung der NFK im Opalinuston wird durch die Veränderung der Aggregatgrößenverteilung, mit der eine Änderung der Porengrößenverteilung einhergeht, verursacht. Dabei ändert sich die Aggregat-interne Porosität nicht wesentlich.

Im Falle der zwiebelschalenartigen Verwitterung der Röt-Tonsteine verringert sich nicht nur die Größe der Aggregate. Die Porosität einzelner Aggregate bleibt während des Verwitterungsprozesses nicht konstant. Damit hängt die nutzbare Feldkapazität nicht nur vom Verhältnis Matrix / Aggregate sondern auch vom Zustand eines jeden einzelnen Aggregats ab. Mit jedem Zerfall eines größeren in Matrix eingebetteten Aggregats kann die NFK analog zum ersten Verwitterungsschritt wieder zunehmen.

Die unterschiedlichen Beträge der nutzbaren Feldkapazität kann man als Maß für die Effektivität des Wassertransports im Porenraum verstehen. Bei gleicher

Wasserspannungsänderung wird in den stärker verwitterten Tonsteinen letztlich eine kleinere Menge Wasser transportiert. In den weniger verwitterten Tonsteinen kann mit Hilfe derselben Energie mehr Wasser transportiert werden, da das Korngerüst stabiler ist. Mit Wassergehaltsänderung verbundene Volumenänderungen sind dann geringer, das heißt es geht keine Transportenergie in Volumenarbeit „verloren“. Ist die NFK groß, so sind genug Poren vorhanden, um bei der Wasseraufnahme des ausgetrockneten Tonsteins schnell genug Wasser nach innen zu transportieren. Die Saugspannung baut sich so relativ gleichmäßig ab. Ist die nutzbare Feldkapazität hingegen niedrig, so ist in der Regel auch die Wasserdurchlässigkeit niedriger und der Wassertransport erfolgt langsamer. Die Wasseraufnahme in die Aggregate hinein erfolgt unregelmäßig. Dies führt zu Spannungsunterschieden, wenn in benachbarten Porenräumen teilweise durch Sättigung die Saugspannung abgebaut wurde und teilweise noch vorhanden ist. Diese Spannungsdifferenz kann Größenordnungen erreichen, die die Gesteinsfestigkeit übersteigt. Es kommt so zur internen Deformation des Gefüges, die zur „Sprengung“ der Aggregate führt.

Diese Beobachtung wird durch die Ergebnisse der Quell-Schrumpf-Versuche untermauert. Wassergehaltsänderungen sind mit einer Veränderung der Trockendichte verbunden. Das heißt mechanische und osmotische Quellvorgänge lockern das Gefüge auf, sobald Wasser von den Tonsteinen aufgenommen wird. Bei Austrocknung kommt es wieder zu einer Verringerung des Gesamtporenvolumens. Werden dabei die Saugspannungen im Porenraum so groß, dass der Adsorptionswasseranteil mobilisiert wird (zum Beispiel durch Ofentrocknung), führt dies unabhängig vom Verwitterungsgrad zu einem deutlichen Rückgang der Gefügestabilität, d.h. zu einer stärkeren Volumenzunahme bei einer erneuten Befeuchtung.

Die spezifische Oberfläche und damit die maximal mögliche Adsorptionswassermenge nehmen mit zunehmender Verwitterung ab. Es ist zu erwarten, dass die Gefügezerstörung deshalb bei weniger verwitterten Tonsteinen stärker ausgeprägt ist. Unter natürlichen Bedingungen im oberflächennahen Bereich ist temperaturbedingt mit einer so starken Austrocknung des Materials nicht zu rechnen, dass der Adsorptionswasseranteil der Saugspannung frei beweglich wird. Bezüglich der Wirkung des Adsorptionswassers besteht über diese Arbeit hinaus gehender Forschungsbedarf, da sich der Zusammenhang zwischen Saugspannung und z.B. Festigkeitseigenschaften offenbar ändert, wenn eine so hohe Austrocknung erreicht wird, dass der Adsorptionswasseranteil aktiviert wird.

Die Durchführung der Konsistenzgrenzenbestimmung ist sehr fragwürdig, da durch die notwendige Aufbereitung das Gefüge so stark beeinflusst wird, dass das Ergebnis kaum repräsentativ für das ungestörte Material sein kann. Dennoch lässt sich eine Zunahme der Plastizität mit fortschreitender Verwitterung systematisch nachweisen. SOMMER et al. (1989) beschrieben die Plastizität von nordhessischen bzw. südniedersächsischen Röt-Tonsteinen in einer ähnlichen Größenordnung, wie sie hier für Thüringer Röt-Tonsteine bestimmt wurde (Tabelle 19). Schlüsse auf die Festigkeit sollten aus diesen Ergebnissen jedoch nicht gezogen werden. Die von den Bodenklassen entsprechend der Konsistenzgrenzen aus DIN 1055 abzuleitenden Scherparameter lassen sich im Scherversuch am ungestörten Material wie erwartet nicht nachvollziehen (BÖNSCH & LEMPP 2004).

Bei vergleichbarem Sättigungsgrad bzw. Saugspannungsniveau haben unterschiedlich verwitterte Tonsteine aus einem Verwitterungsprofil ähnliche Festigkeitseigenschaften. Mit zunehmendem Wassergehalt nehmen im direkten Scherversuch sowohl die Bruchspannungen als auch die abgeleiteten Scherparameter ab. Das heißt, eine hohe Saugspannung im Porenraum erhöht die Scherfestigkeit der Tonsteine. Auch die messbare Zerreibung von Aggregaten an der Scherfuge ist bei niedrigeren Wassergehalten geringer. Die für ungesättigte Böden häufig verwendete Vanapilli-Methode (JUNGE et al. 2000) zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen Saugspannung und Festigkeit ist für die verwitterten Tonsteine nicht geeignet. Das komplexe Gefüge aus Aggregaten und Matrix sowie Kriechvorgänge bei langsamer Scherung oder Sprödbbruch der „Festgesteins“-Aggregate werden nicht ausreichend berücksichtigt.

Ein höherer Sättigungsgrad setzt die Scherfestigkeit herab. Unabhängig vom Verwitterungsgrad haben trockene Proben eine größere Scherfestigkeit als mit natürlichem Wassergehalt oder wassergesättigte Proben. Eine systematische Veränderung der Scherfestigkeit von Tonsteinen aus einem Verwitterungsprofil mit fortschreitender Verwitterung lässt sich anhand der wenigen untersuchten Proben nicht feststellen. Die am stärksten verwitterten Proben haben im trockenen Zustand meist eine höhere Scherfestigkeit, da die Trockenfestigkeit der replastifizierten Matrix, deren hoher Anteil die Eigenschaften des Tonsteins dominieren, die Trockenfestigkeit der weniger verwitterten Aggregate übersteigt. Der Einfluss der Saugspannung auf die Bruchspannungen wird deutlich. Je höher die dem gleichen Wassergehalt entsprechende Saugspannung umso höher ist auch die Scherspannung bei gleicher Vertikalspannung. Die überkonsolidierten Tonsteine reagieren unterschiedlich stark auf Wassergehaltsänderungen, je nachdem ob das Material von Aggregaten oder von replastifizierter Matrix dominiert wird. In den von Aggregaten dominierten Tonsteinen spielt die Wirkung der Saugspannung auf die Scherfestigkeit eher eine untergeordnete Rolle. Die Scherfestigkeit der Röt-Tonsteine unterliegt demnach einem deutlichen Struktureinfluss.

Wegen der Monate andauernden Versuchszeit gibt es wenige Untersuchungen zum zeitabhängigen Setzungsverhalten der unterschiedlich verwitterten Tonsteine. Die Steifemodule nehmen mit zunehmender Verwitterung von etwa 50 MN/m<sup>2</sup> beim Verwitterungstyp 2 auf etwa 20 MN/m<sup>2</sup> beim Verwitterungstyp 4 ab. Die Steifemodule von Röt-Tonstein und Opalinuston des gleichen Verwitterungsgrades haben eine ähnliche Größenordnung. Vom Opalinuston liegen allerdings nur Ergebnisse des Verwitterungstyps 3 vor. Unterschiede bestehen im Setzungsverhalten. Die Primärsetzung der Röt-Tonsteine ist rasch abgeschlossen und die Bewegung geht in einen Kriechvorgang über. Beim Opalinuston führt die Primärsetzung zu einer stärkeren Verformung und nimmt eine deutlich längere Zeitspanne in Anspruch. Die Kriechverformung erfolgt dann mit einer zu den Röt-Tonsteinen analogen Verformungsgeschwindigkeit, setzt aber wesentlich später ein. Ursache für den Unterschied im Setzungsverhalten könnte die unterschiedliche Überlagerungsgeschichte der Tonsteine sein. Die gewählte Spannung von 10 MN/m<sup>2</sup> liegt in der Größenordnung von bzw. leicht über der maximalen Überlagerung des Opalinustons. Die Röt-Tonsteine hatten größere Versenkungstiefen und damit auch größere Vertikalspannungen erlebt. Die Primärsetzung kommt durch die Konsolidierung der aufgelockerten „Schalen“ der Tonsteinaggregate zustande. Die noch festen Anteile haben ein Korngerüst im metastabilen Zustand, das durch die im Vergleich zur maximalen Überlagerungsspannung niedrigere Auflast nicht wesentlich verformt wird. Beim Opalinuston kommt es zu einer erneuten Konsolidation, wenn die Vorbelastung überschritten ist.

## **8.2 Wirkung der Saugspannung auf die Scherfestigkeit im überkonsolidierten Tertiärton**

Die Ergebnisse von direkten Scherversuchen sind einerseits von den Wasserverhältnissen, und damit den Saugspannungen im Porenraum, andererseits aber auch von den Versuchsrandbedingungen insbesondere der Vorschubgeschwindigkeit abhängig.

Die Tonpartikelorientierung im Tertiärton wird von den für Kaolinit typischen streng parallel gelagerten Schichtstapeln dominiert. Diese Schichtpakete bilden eine übergeordnete Kartenhausstruktur. Die geringen Anteile von Muskovit und Illit haben auf die Sedimentstruktur offenbar keinen Einfluss. Diese Partikelorientierung hat zur Folge, dass die Korngrößen und die Porendurchmesser in einer ähnlichen Dimension liegen, wobei die Porendurchmesser bimodal mit Maxima um 1 µm und > 10 µm verteilt sind, während die Korngrößenverteilung gleichmäßig gestuft ist.

Die Bruchspannung in direkten Scherversuchen ist umso niedriger, je langsamer der Versuch durchgeführt wurde. Dieser Effekt wirkt sich jedoch nicht gleichermaßen bei allen Vertikalspannungen aus. Besonders bei niedrigen Vertikalspannungen (< 100 kN/m<sup>2</sup>) ist die Bruchspannung von der Vorschubgeschwindigkeit abhängig. Grund hierfür ist das Zusammenwirken der Spannungskomponenten Vertikalspannung, Scherspannung und

Saugspannung. Im Bereich niedriger Saugspannungen ist das Verhältnis  $\tau/\sigma$  im Scherversuch relativ groß. Niedrige Saugspannungen treten vor allem bei großen Vertikalspannungen auf, wenn durch die Verringerung des Porenanteils der Sättigungsgrad erhöht wird. Das Verhältnis  $\tau/\sigma$  nimmt mit zunehmender Saugspannung bis 50 kN/m<sup>2</sup> rasch ab und nähert sich einem Wert von 0,5 asymptotisch an. Im Bereich niedriger Vertikalspannungen stellt die Saugspannung die größte Spannungskomponente dar. In diesen Fall ist die Scherspannung immer die zweitgrößte Spannung. Für den Fall, dass die Vertikalspannung größer als die Saugspannung ist, haben Wasserspannung und Schubspannung die gleiche Größenordnung. Demzufolge ist bei gleichem gravimetrischem Wassergehalt der Einfluss der Saugspannung von der Höhe der Vertikalspannung abhängig. Der Endwassergehalt und das Volumenänderungsverhalten sind von der Schergeschwindigkeit unabhängig.

Die Saugspannung vor dem Scherversuch ist umso größer, je geringer der initiale Porenanteil ist. Eine Wassergehaltsänderung ohne zusätzliche mechanische Beanspruchung ist mit einem Quell- bzw. Schrumpfvorgang des Tons verbunden. Wegen der unterschiedlichen Porengrößenverteilung gilt die der Berechnung zugrunde gelegte Saugspannungskurve nur näherungsweise. Außerdem geben die ermittelten Saugspannungswerte nur einen Mittelwert über die gesamte Probe wieder. Die Wasserspannungen können in Nähe der Scherfuge deutlich niedriger sein. Ferner gilt es zu bedenken, dass es sich im Scherversuch unter Wasserbedeckung um eine Wasseraufnahme handelt – auf Grund von Hysterisis-Erscheinungen können die Saugspannungskurven bei Wasserabgabe und Wasseraufnahme voneinander abweichen. Durch die Reduzierung des Porenanteils (kontraktantes Verhalten) kommt es zu einer Erhöhung des Sättigungsgrades im Verlauf des Schervorgangs, der mit einer Verringerung der Saugspannung einhergeht.

Bezüglich der Saugspannungsentwicklung während des Schervorgangs besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. Die theoretischen Zusammenhänge zwischen Saugspannung und Scherfestigkeit (siehe Anhang A.5) entsprechen vor allem im Bereich hoher Sättigungsgrade nicht der Realität. Wegen der Veränderungen des Porenanteils im Scherversuch gilt die am ungestörten Ton bestimmte Saugspannungskurve nicht für den Ton am Ende des Scherversuchs. Es ist unklar, ob die mit Hilfe des Sättigungsgrades errechnete Näherung der Saugspannung zu Versuchsende, den tatsächlichen Verhältnissen entspricht. Möglicherweise könnten Messungen des Porenwasserdrucks in triaxialen Versuchen dazu weitere Erkenntnisse bringen. Möglicherweise spielt auch die Überkonsolidation des Materials hierbei eine Rolle. Es ist denkbar, dass durch die Überkonsolidation eine Art diagenetischer Bindung der Feststoffpartikel besteht, so dass die Ton-Cluster eine höhere Stabilität haben, als dem jeweiligen Sättigungsgrad entsprechen würde. Erst durch ausreichend Zeit (Kriechen) bzw. höhere Vertikalspannungen, kommt es zu Umlagerungen im Tongerüst. Die sperrige Kartenhausstruktur wird zunehmend parallel gelagert, so dass ein Gleiten zwischen den Partikeln möglich wird. Dabei tritt wenig Reibung auf, da an den Oberflächen zweier benachbarter Partikel repulsive Kräfte wirken. Die Scherfestigkeit ist dann niedriger als man entsprechend der Saugspannung erwarten würde.

## 9 Verwendete Literatur

- ALTEMÜLLER, H.J.; 1972; Mikroskopische Merkmale der Bodenstabilisierung mit Kalkhydrat; Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges. 15; 57-63.
- BACKHAUS, E.; 1981; Der marin-brackische Einfluß im Oberen Röt Süddeutschlands; Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Band 132. p. 361-382.
- BAUCH, E.; 1998; Kapillarität bindiger Erdstoffe und Festgesteine; unveröffentl. Projektarbeit; Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- BEYER, I.; 2002; Verbreitung und Eigenschaften von Massenverlagerungsgebieten an der Wellenkalk-Schichtstufe im Thüringer Becken unter besonderer Berücksichtigung geomorphologischer und klimatologischer Steuerungsfaktoren; Dissertation Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- BISHOP, A.W.; 1959; The principle of effective stress; Teknisk Ukeblad, Vol.106/39; 859-863.
- BJERRUM, L.; 1967; Engineering Geology Of Norwegian Normally-Consolidated Marine Clays As Related To Settlements Of Buildings; Geotechnique 17.
- BLUMENSTENGEL, H. & KRIEBEL, U.; 1995; in KRIEBEL, U. & MARTIKLOS, G.: Erläuterungen zur Geologischen Karte Halle und Umgebung 1:50000; Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt.
- BÖNSCH, C. & LEMPP, CH.; 2003; Interaktion zwischen Wasser und Tonen - wo liegen die Grenzen zwischen dem Modell der diagenetischen Bindungen und der reversiblen Konsolidierung?; Bull. Angew. Geologie, Vol. 8/1, 27-42, Juli 2003, Zürich/Schweiz.
- BÖNSCH, C. & LEMPP, CH.; 2004; Wechselwirkungen zwischen festen und flüssigen Phasen beim Entfestigungsprozess überkonsolidierter Tonsteine; Geotechnik 27, Nr. 1, 32-40, Verlag Glückauf GmbH Essen.
- BÖNSCH, C. & LEMPP, CH.; 2005; Saugspannungseffekte in unterschiedlich verwitterten Tonsteinen; Tagungsband 15. Tagung für Ingenieurgeologie 6. bis 9. April 2005 Erlangen. Hrsg.: M. Moser Universität Erlangen. 343-347.
- BRANDENBURG, U. & LAGALY, G.; 1988; Rheological properties of sodian montmorillonite dispersions; Appl. Clay Sci. 3; pp. 263-279.
- BRUNAUER S., EMMETT, P.H. & TELLER, E.; 1938; Adsorption of gases in multimolecular layers; J. Am. Chem. Soc. 62; 309a.
- BRUNHOFF, W.; 1983; Geomechanische Eigenschaften Halbfester Tonsteine Der Oberen Rötfolge In Der Westlichen Kuppenrhön; Diss.; Univ. Kiel.
- BÜHMANN, D. & RAMBOW, D. (1979): Der Obere Buntsandstein (Röt) bei Borken/Hessen, Stratigraphie und Tonmineralogie.- Geol. Jb. Hessen, 107, 125 - 138.
- BUTENUTH, C., HAMM, T. & FREITAS, M.H.; The kinetic response of rock to water vapour; Bull. Eng. Geol. Env. (2004) 63; pp.179-189.
- Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.); 2002; Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2002.
- DGEG; 1986; Empfehlung Nr.11 des Arbeitskreises 19 - Versuchstechnik Fels - der DGEG: Quellversuche an Gesteinsproben - Bearb. Paul, A.; Bautechnik 3, S. 100-104.
- DIN 18122-2, Ausgabe:2000-09 Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) - Teil 2: Bestimmung der Schrumpfgrenze
- DIN 18123; Ausgabe:1996-11 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung
- DIN 18132; Ausgabe:1995-12 Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte - Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens
- DIN 18137-3; Ausgabe:2002-09 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Scherfestigkeit - Teil 3: Direkter Scherversuch

- DIN 19683-5; Ausgabe:1973-04 Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau – Physikalische Laboruntersuchungen – Bestimmung der Saugspannung des Bodenwassers.
- DIN 66131; Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Gasadsorption nach Brunauer, Emmet und Teller (BET)
- DIN 18122-1; Ausgabe:1997-07 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) - Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze
- DIN 18124; Ausgabe:1997-07 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korndichte - Kapillarpyknometer, Weithalspyknometer
- DIN ISO 8130-13; Ausgabe:2005-03 Pulverlacke - Teil 13: Teilchengrößenanalyse durch Laserbeugung (ISO 8130-13:2001)
- DIN-ISO 11274; Ausgabe:2001-01 Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens - Laborverfahren
- EINSELE, G. & WALLRAUCH, E.; 1964; Verwitterungsgrade bei mesozoischen Schiefertönen und Tonsteinen und ihr Einfluß bei Standsicherheitsproblemen; Baugrundtagung; Dt.Ges. Erd-u.Grundbau; pp.59-89.
- EINSELE, G., HEITFELD, K.-H., LEMPP, CH. & SCHEDELIG, K.; 1985; Auflockerung und Verwitterung in der Ingenieurgeologie: Übersicht, Feldansprache, Klassifikation (Verwitterungsprofile) – einleitender Beitrag; in: Heitfeld, K.H. (Ed.); Ingenieurgeologische Probleme Im Grenzbereich Zwischen Locker- Und Festgestein; Springer Berlin; S.2-23.
- EINSELE, G.; 1983; Mechanismus und Tiefgang der Verwitterung bei Mesozoischen Ton- und Mergelsteinen; Z.Dt.Geol.Ges.134; pp.289-315.
- ENDELL, K., LOOS, W. & BRETH, H.; 1939; Zusammenhang zwischen Kolloidchemischen sowie bodenphysikalischen Kennziffern bindiger Böden und Frostwirkung; Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen Bd.16; Volk & Reich Verlag Berlin.
- ENSLIN; 1933; Über einen Apparat zur Messung der Flüssigkeitsaufnahme an quellbaren und porösen Stoffen; Chem. Fabr. 6; S.147.
- FEESER, V.; 1986; Geomechanisches Konzept zur Gefügeentwicklung und Spannungsgeschichte glazialtektonisch überprägter Tone; Braunschweiger Geologisch-Palaeontologische Dissertationen ; 4; 127 S.
- FOOKES, P.G. & PARISH, D.G.; 1969; Observations on small-scale structural discontinuities in the London clay and their relationship to regional geology; Quart. J. Eng. Geol. 1; 217-240.
- FREDLUND, D.G. & RAHAROJO, H.; 1993; Soil mechanics for unsaturated soils, Wiley New York.
- FREY, R.W. & BASAN, P.B.; 1978; Costal salt marshes; in: Davis R.A. (ed.); Costal Sedimentary Environments; Springer New York; 101-169.
- FÜCHTBAUER, H. & MÜLLER, G.; 1970; Sediment-Petrographie in: Sedimente und Sedimentgesteine; Schweizerbart Stuttgart.
- FUKUSHIMA; Y.; 1984; X-Ray diffraction study of aqueous Montmorillonite emulsions; Clays and clay minerals Vol.32 No. 4; pp. 320-326.
- GOLDSCHIEDER, M.; 2003; Vergleichende Versuche mit einem konventionellen und einem parallel geführten Rahmenschergerät als Grundlage für DIN 18137-3; Schlussbericht Deutsches Institut für Bautechnik; Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart 36 S.
- GROB, H.; 1972; Schwelldruck im Belchentunnel; Proc. Int. Symp. F. Untertagebau; Luzern; S.99-119.
- GRONEMEIER, K.; MATTHESS, G., BRUNHOF, W., OHSE, W., PEKDEGER, A., SCHENK, D. & WINKLER, A.; 1985; Verwitterungsabhängige geochemische, mikrostrukturelle und geomechanische Eigenschaften halbfester Tonsteine der oberen Röt-Folge (Rhön); In: Heitfeld, K.H.

- (Ed.); Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgestein; Springer Berlin; S. 143-155.
- GUDEHUS, G.; 1981; Bodenmechanik; Enke Verlag Stuttgart; 268 S.
- HARTGE, K.H. & HORN, R.; 1999; Einführung in die Bodenphysik; Enke Verlag Stuttgart; 303 S.
- HENKE, K.F. & HILLER, M.; 1985; Veränderung bodenmechanischer Parameter bei überkonsolidierten Peliten durch die Verwitterung – Versuch einer Deutung anhand des Opalinutons; In: Heitfeld, K.H. (Ed.); Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgestein; Springer Berlin; S. 83-96.
- HOPPE, W. & G. SEIDEL (1974): Geologie von Thüringen.- Leipzig/ Gotha.
- HVORSLEV, M.J.; 1960; Physical components of the shear strength of saturated clays; Asce Research Conf. on shear strength of cohesive soils; Boulder, Colorado; Usa.
- INGLES, O.G.; 1968; Soil chemistry relevant to the engineering behaviour of soils; in: Lee, I.K. (ed.) Soil mechanics – selected topics; Butterworth London; 1-57.
- IROUSCHEK, T.; 1985; Einfluß organischer Substanzen auf die verwitterungsbedingte Entfestigung von Peliten am Beispiel der Posidonienschiefer; In: Heitfeld, K.H. (Ed.); Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgestein; Springer Berlin; S. 75-82.
- ISO 13317-3; Ausgabe:2001-03 Bestimmung der Partikelgrößenverteilung durch Verfahren der Schwerkraftsedimentation in Flüssigkeiten - Teil 3: Röntgenverfahren im Schwerfeld
- ISRM; 1994; Comments and recommendations on design and analysis procedures for structures in argillaceous swelling Rock; Int.Soc.Rock Mech.Min.Sci. & Geomech. Abstr.; Vol.31 Nr.5; Pp. 535-546.
- JACKSON, J.O. & FOOKES, P.G.; 1974; The relationship of the estimated former burial depth of the lower Oxford Clay to some soil properties. Q.J. eng. Geol. 7, 137-79.
- JESSBERGER, H.L.; 1971; Zusammenstellung und Auswertung des neueren Schrifttums über die Wirkung des Frostes auf den Boden; Forschungsbericht – Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 125; BM für Verkehr, Abt. Straßenbau Bonn.
- JUNGE, T., GRÄSLE, W., BENDEL, G. & HORN, R.; 2000; Einfluss des Porenwasserdrucks auf die Zugfestigkeit von Bodenproben; J. of Plant Nutrition and Soil Science; Vol.163/1; 21-26.
- KIRKHAM, D. & POWERS, W.L.; 1972: Advanced soil physics; Wiley London.
- KRIEBEL, U. & MARTIKLOS, G.: Erläuterungen zur Geologischen Karte Halle und Umgebung 1:50000; Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt.
- LAL, G., SCHULZ, O. & ZIMEHL, R.; 1997; Dispersionen und Emulsionen – Eine Einführung in die Kolloidik feinverteilter Stoffe einschließlich der Tonminerale; Steinkopff Verlag; Darmstadt; 560 S.
- LIPPMANN, F.; 1956; Clay minerals from the Röt member of the Triassic near Göttingen, Germany; J. Sed. Petrol. 26/2; 125-139.
- LUCKNER, L., VAN GENUCHTEN M. TH., AND NEILSEN, D. R; 1989; A consistent set of parameteric models for the flow of water and air as immiscible fluids in the subsurface; Water Resour. Res. 25:2187-2189.
- MARTIN; 1962; Adsorbed water in clays; 9<sup>th</sup> Nat. Conf. on Clays and Clay Minerals; Vol.9; Pergamon Press.
- MC KYES, E., SETHI, A. & YONG R.N.; 1974; Amorphous coatings on particles of sensitive clay soils; Clays and Clay Min. 22; 427-433.
- MEADE, R.G.; 1966; Factors influencing the early stages of the compaction of clays and sands – review; J. Sediment. Petrol. 36; 1085-1101.



- MEADE, R.G.; 1968; Compaction of sediments underlying areas of land subsidence in Central California; US Geol. Surv. Profess. Pap. 497-D.
- MERKLEIN-LEMPPE, I.; 1985; Ursachen und Mechanismen des Trocknungs-Befeuchtungs-Zerfalls Überkonsolidierter Pelite; In: Heitfeld, K.H. (Ed.); Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgestein; Springer Berlin; S. 59-74.
- MESRI, G., ULLRICH, C.R. & CHOI, Y.K.; 1978; The rate of swelling of overconsolidated clays subjected to unloading; Geotechnique; Vol.28 Nr.3; Pp. 281-307.
- MIE, G.; 1948; Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus : Eine Experimentalphysik des Weltäthers für Physiker, Chemiker, Elektrotechniker; 3. Auflage Enke Verlag Stuttgart, 666 S.
- MITCHELL; 1964; Shearing resistance of soils as a rate process; ASCE Vol.90.
- MORGENEYER, W. (1963): Die Gliederung des Röts westlich des Saaletal.- Dipl. Arb. Univ. Halle, (unveröff.)
- MOURCHID, A.; DELVILLE, A., LAMBARD, J., LÉCOLIER, E. & LEVITZ, P. ; 1995 ; Phase diagram of colloidal dispersions of anisotropic charged particles, equilibrium properties, structure and rheology of laponite suspensions, Langmuir 11; pp. 1942-1950.
- MURAYAMA, S. & SHIBATA, T.; 1961; Rheological properties of clays; Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech. and Fund.; Pp. 269-273.
- MURAYAMA, S.; 1969; Stress-strain-time behaviour of soils subjected to deviatoric stress.
- NEFF, H.K.; 1959; Über die Messung der Wasseraufnahme ungleichförmiger bindiger anorganischer Bodenarten in einer neuen Ausführung des Enslingerätes; Bautechnik 39 Heft 11; S.415-421.
- NEUMANN, R.; 1957; Der Einfluss Der Kornfraktion 2µm auf die Plastizität der Tone und Kaoline und ihre Beziehung zum Enslin-Wert; Berichte Deutsche Keramische Gesellschaft 34; S.274-281.
- NICKMANN M., Spaun, G. & Thuro, K.; 2005; Untersuchungen zur Klassifizierung fester Gesteine unter ingenieurgeologischen Aspekten; Tagungsband 15. Tagung für Ingenieurgeologie 6. bis 9. April 2005 Erlangen. Hrsg.: M. Moser Universität Erlangen; 157-163.
- OSIPOV, V.J.; 1975; Structural bonds and the properties of clays; Bull. Int. Assoc. Eng. Geol. 12; 13-20.
- PIMENTEL, E.; 1996; Quellverhalten von diagenetisch verfestigtem Tonstein; Veröff. Inst. Bodenmech. u. Felsmech. Universität Fridericiana; Karlsruhe; 139; 184 S.
- PIMENTEL, E.; 2003; Swelling behaviour of sedimentary rocks under consideration of micromechanical aspects and its consequences on structure design; Geotechnical Measurements an Modelling; Swets & Zeitlinger Lisse; pp. 367-374.
- PUFF, P. (1963): Erläuterungen zur geologischen Spezialkarte der Deutschen Demokratischen Republik Blatt 5234 Rudolstadt.- Berlin.
- PUSCH, R.; 1973; Influence of salinity and organic matter on the formation of clay microstructure; Proc. Int. Symp. Soil Structure; Gothenburg; 161-174.
- QUIRK, J.P.; 1986; Soil permeability in relation to sodicity and salinity; Phil. Trans. Roy. Soc. London; A 316; pp. 297-317.
- REHBINDER, P.A. & MICHAJLOW, N.W.; 1961; Strukturbildung in dispersen und hochmolekularen Systemen, Strukturtypen und ihre rheologischen Eigenschaften; Rheologica Acta 1, Nr.4-6.
- REHBINDER, P.A.; 1965; Zur physikalisch-chemischen Mechanik disperser Systeme in der Aufbereitung und in anderen technischen Gebieten; Montanwissenschaftliche Festtage in Freiberg; VEB-Verlag Grundstoffindustrie.

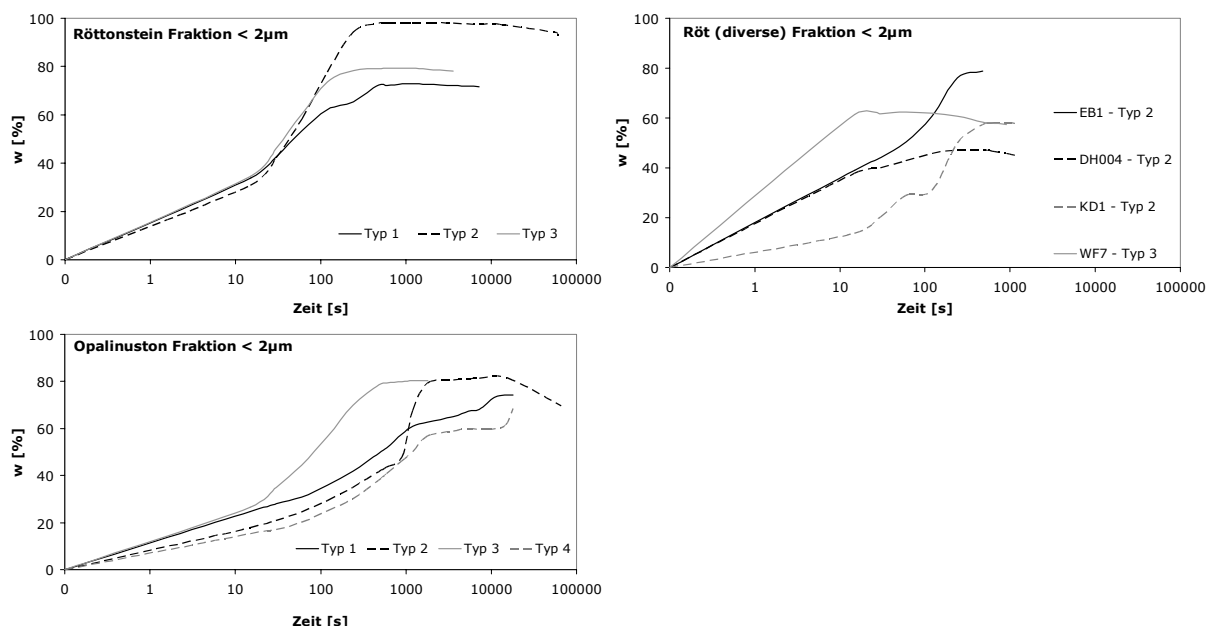
- RIEKE, H.H. & CHILINGARIN, G.V.; (1974); *Compaction of argillaceous sediments; Developments in sedimentology* 16. Elsevier; Amsterdam.
- SCHANZ, T., AGUS, S.S. & TSCHESCHLOK, G.; 2004; *Hydraulischmechanische Eigenschaften einer polymerverbesserten Sand-Bentonit-Mischung beim Einsatz im Deponiebau; Geotechnik* 27(4); 344-355.
- SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHNABEL, R.; 1984; *Lehrbuch der Bodenkunde*; Enke Verlag Stuttgart; 442 S.
- SCHETELIG, K. & BECKER, C.; 2001; *Tone und Tongesteine – Nach wie vor die Problemgesteine in der Ingenieurgeologie*, Abstract 13. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie Karlsruhe; S.157-162.
- SCHICK, P.; 1996; *Bodenmechanische und bautechnische Eigenschaften gemischtkörniger mineralischer Deponiebasisdichtungen aus Bentokies mit besonderer Berücksichtigung der zeitabhängigen Rissicherheit und Verformbarkeit unter Auflast*; Mitt. Inst. Bodenmechanik und Grundbau, UniBw München, H. 11.
- SCHICK, P.; 2000; *Zum Einfluss negativer Porenwasserspannungen auf die Standsicherheit von Einschnittböschungen in überkonsolidierten Böden*; Mitteilungen d. Inst. f. Bodenmechanik und Grundbau Univ. der Bundeswehr München Heft 14.
- SCHICK, P.; 2004; *Scherfestigkeit durch Kapillarität in unzementierten ungesättigten bindigen Böden*. Bautechnik 81, Heft 1
- SCHILLER, H.J.; 1980; *Röntgenographische Texturuntersuchungen an feinkörnigen Sedimenten unterschiedlicher Kompaktion*; Bochumer Geol. u. Geotechn. Arb 4.
- SCHLICHTING, E., BLUME, H.P. & STAHR, K.; 1995; *Bodenkundliches Praktikum – Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte und Geowissenschaftler*; Blackwell Wissenschaftsverlag Berlin; 296 S.
- SCHOFIELD, R.K.; 1935; *The pF of the water in soil*; 3<sup>rd</sup> International Congress of Soil sciences 2; p.37 – 48.
- SCHULTZE, E. & MUHS, H.; 1967; *Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten*; 2. Auflage; Springer Verlag Berlin; 722 S.
- SEIDEL, G. (1965): *Zur geologischen Entwicklungsgeschichte des Thüringer Beckens.*- Geol. Jg. 14, Nr. 50, 1 - 115.
- SEIDEL, G. (1992): *Thüringer Becken.*- Sammlung Geologischer Führer, 85, 1 - 204.
- SETZER, J.; 2005; *Chemische Reaktionen*; Vorlesungsskript des Instituts für Bauphysik und Materialwissenschaften; Universität Duisburg – Essen.
- SILLERS, W. S.; 1997; *The mathematical representation of the soil-water characteristic curve*; M Sc Thesis University of Saskatchewan.
- SKEMPTON A. W. & Hutchinson, J.; 1969; *Stability of natural slope and embankment foundation*; Proc. 7th ICSMFE, 4, Mexico City.
- SKEMPTON, A.W.; 1970; *The consolidation of clays by gravitational compaction*; J.Geol.Soc.London; Vol.125: pp.373-411.
- SOMMER, H, MEYER-KRAUL, N & PRINZ, H. 1989. *Großversuche zur Prüfung des Festigkeitsverhaltens von Röt-Tonsteinen*. Ber. 7. Nat. Tag. Ing.-Geol. Bensheim 1989. 77-84.
- STOEWAHSE, C & BLÜMEL, W.; 2001; *Einfluss der Rahmenlagerung auf die Messwerte der Scherfestigkeit im Rahmenscherversuch*; 1. Siegener Symposium „Messtechnik im Erd- und Grundbau“, 24.09. – 25.09.2001
- SZÁNTÓ, F., GILDE, F. & SIPOS, E.; 1972; *Sedimentation organophiler Bentonite*; Koll.Z.Z.Polym. 250; pp. 683-688.
- TAYLOR, R.K. & SPEARS, D.A.; 1981; *Laboratory investigation of mudrocks*; Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology; v. 14; no. 4; p. 291-309.

- TERZHAGI, K. & PECK, R.B.; 1956; Soil Mechanics In Engineering Practice; 566 S.
- THERMANN, K., GAU, C. & TIEDEMANN, J.; 2005; Neuere Untersuchungen zum Einfluss der Rahmenlagerung von Schergeräten auf die Werte der Scherfestigkeit; Tagungsband 15. Tagung für Ingenieurgeologie 6. bis 9. April 2005 Erlangen. Hrsg.: M. Moser Universität Erlangen; 467-472.
- TUCKER, M.E.; 1985; Einführung In Die Sedimentpetrologie; Enke Verlag; Stuttgart; 266 S.
- VAN GENUCHTEN, M. Th.; 1980; A closed form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils; Soil Sci. Soc. Am. J, 44: 892-898.
- VAN OLPHEN, H.; 1977; An Introduction To Clay Colloid Chemistry; Wiley New York.
- VANAPILLI, S.K., SILLERS, W.S. & FREDLUND, M.D.; 1998; The meaning and relevance of residual state to unsaturated soils; 51st Canadian Geotechnical Conference, Edmonton, Alberta, October 4-7, 1998
- VANAPILLI, S.K., FREDLUND, D.G, PUF AHL, D.E. & CLIFTON, A.W.; 1996; A model for prediction of shear strength with respect to soil suction; Canadian Geotechnical Journal 33; 379-392.
- VON WOLFFERSDORFF, P.-A. & FRITZSCHE, S.; 2003; Laboratory swell tests on overconsolidated clay and diagenetic solidified clay rocks; Geotechnical Measurements an Modelling; Swets & Zeitlinger Lisse; pp. 407-412.
- WALLRAUCH, E.; 1969; Verwitterung und Entspannung bei überkonsolidierten tonig-schluffigen Gesteinen Südwestdeutschlands; Dissertation Universität Tübingen.
- WALZENBACH, J.; 1991; Mineralöle in Locker- und Festgestein – Untersuchungen zur Durchlässigkeit, Saugspannung und Kapillarität, Schriftenreihe zur Angewandten Geologie Karlsruhe 12; Universität Karlsruhe.
- WEISS, A. & FRANK, R.; 1961 c); Über den Bau der Gerüste in thixotropen Gelen; Z. Naturforsch. 166; pp. 141-142.
- WENZEL, B. (1991): Zur Lithostratigraphie und Sedimentologie des Röt und zu den Massenverlagerungen an der Röt-/Muschelkalkgrenze in Nordhessen.- Giessener Geol. Schr., 53, 1 - 229.
- WICHTER, L., HECHT, T. & HOLLINGER, J.; 2004; Vernagelung einer großen und tiefreichenden Rutschung im Zuge der BAB A71; Geotechnik 27 Nr.2; S. 155-160.
- WILSON, G.W., FREDLUND, D.G., AND BARBOUR, S.L.; 1994; Coupled soil-atmosphere modeling for soil evaporation; Canadian Geotechnical Journal, 31: 151-161.
- WOLFF, R.; 1957; Über die Geschwindigkeit der Sedimentation von Pulvern in Flüssigkeiten; Kolloid-Zeitschr. 150; pp. 71-80.
- XIANG, W.; 1997; Der Einfluss der Kationenbelegung auf die Bodenmechanischen und rheologischen Eigenschaften von Tonen am Beispiel einer Ostalpinen Großhangbewegung; Schriftenreihe Angew. Geol. Karlsruhe; 48; 190 S.

## **Anhang**

## Anhang A – Versuchsergebnisse – Diagramme und Tabellen

### A.1 Korrigierte Wasseraufnahmekurven



**Abbildung I** Aufgenommene Wassermenge über die Zeit für Fraktion < 2µm nach Verdunstungskorrektur.

### A.2 Wasseraufnahmevermögen, Wasserdampfadsorption, Spezifische Oberfläche und natürlicher Wassergehalt im Vergleich

	Typ	Lithologie	Korngröße	$w_B$ kor.	Zeit $w_B$	$S_{des}$	Korndichte	Wasserdampfadsorption	Kappillarwasser	Adsorptionswasser (errechnet)
			µm	%	s	m <sup>2</sup> /g	g/cm <sup>3</sup>	%	%	%
AH2	3	Röt	0	117,07	480	18,92	2,29			0,31
DEU U1 <2µm	3	Röt	0	80,93	480	30,39	2,63			0,50
DEU10 1.Sieb <63	3	Röt	2	49,62	480	8,19	2,66			0,14
DEU10 1.Sieb >1000	3	Röt	1000	7,93	1200	14,62	2,66	2,70	5,23	0,24
DEU10 1.Sieb >125	3	Röt	125	37,15	480	6,22	2,66	1,51	35,64	0,10
DEU10 1.Sieb >2000	3	Röt	2000	5,90	1200	13,55	2,66	2,98	2,92	0,23
DEU10 1.Sieb >250	3	Röt	250	27,12	480	6,31	2,66	1,25	25,87	0,10
DEU10 1.Sieb >500	3	Röt	500	15,73	480	8,61	2,66	1,81	13,92	0,14
DEU10 1.Sieb >63	3	Röt	63	39,83	480	6,09	2,66	1,47	38,36	0,10
DEU10 2.Sieb <63	3	Röt	2	51,85	480	13,78	2,66	3,07	48,78	0,23
DEU10 2.Sieb >1000	3	Röt	1000	9,89	1200	7,30	2,66	2,98	6,91	0,12
DEU10 2.Sieb >125	3	Röt	125	38,73	480	7,74	2,66	1,62	37,11	0,13
DEU10 2.Sieb >2000	3	Röt	2000	12,81	4200	17,45	2,66	2,90	9,91	0,29
DEU10 2.Sieb >250	3	Röt	250	32,72	480	8,60	2,66	1,38	31,34	0,14
DEU10 2.Sieb >500	3	Röt	500	19,45	10800	13,49	2,66	2,34	17,11	0,22
DEU10 2.Sieb >63	3	Röt	63	41,08	480	8,90	2,66	1,80	39,28	0,15
DEU10 3.Sieb <63	3	Röt	2	48,70	480	13,21	2,66	2,75	45,95	0,22
DEU10 3.Sieb >1000	3	Röt	1000	18,44	3600	6,88	2,66	2,91	15,53	0,11
DEU10 3.Sieb >125	3	Röt	125	37,57	480	7,41	2,66	1,18	36,39	0,12
DEU10 3.Sieb >2000	3	Röt	2000	9,86	8160	13,77	2,66	2,89	6,97	0,23
DEU10 3.Sieb >250	3	Röt	250	31,41	480	9,61	2,66	1,27	30,14	0,16
DEU10 3.Sieb >500	3	Röt	500	19,05	900	16,16	2,66	2,44	16,61	0,27
DEU10 3.Sieb >63	3	Röt	63	47,72	480	9,34	2,66	1,48	46,25	0,16
DEU10 4.Sieb <63	3	Röt	2	49,65	900	12,84	2,66	2,77	46,87	0,21
DEU10 4.Sieb <63	3	Röt	2	50,69	480	12,84	2,66	2,77	47,92	0,21
DEU10 4.Sieb >1000	3	Röt	1000	46,81	89340	18,62	2,66	3,19	43,62	0,31
DEU10 4.Sieb >125	3	Röt	125	40,56	480	10,40	2,66	1,57	38,99	0,17

Anhang A – Versuchsergebnisse – Diagramme und Tabellen

	Typ	Lithologie	Korngröße	w <sub>B</sub> kor.	Zeit w <sub>B</sub>	s <sub>des</sub>	Korndichte	Wasserdampfadsorption	Kappillarwasser	Adsorptionswasser (errechnet)
			µm	%	s	m <sup>2</sup> /g	g/cm <sup>3</sup>	%	%	%
DEU10 4.Sieb >2000	3	Röt	2000	40,12	86400	10,92	2,66	2,80	37,31	0,18
DEU10 4.Sieb >250	3	Röt	250	26,83	480	8,00	2,66	1,40	25,43	0,13
DEU10 4.Sieb >500	3	Röt	500	12,17	10800	16,00	2,66	2,98	9,19	0,27
DEU10 4.Sieb >63	3	Röt	63	44,16	480	10,25	2,66	1,64	42,52	0,17
DEU10 5.Sieb <63	3	Röt	2	48,99	600	14,20	2,66	2,93	46,06	0,24
DEU10 5.Sieb >1000	3	Röt	1000	16,59	3600	18,67	2,66	3,43	13,15	0,31
DEU10 5.Sieb >125	3	Röt	125	43,26	480	10,33	2,66	1,29	41,98	0,17
DEU10 5.Sieb >2000	3	Röt	2000	17,45	7200	16,48	2,66	3,60	13,86	0,27
DEU10 5.Sieb >250	3	Röt	250	53,99	600	9,46	2,66	1,18	52,82	0,16
DEU10 5.Sieb >250 wdh	3	Röt	250	32,61	480	9,46	2,66	1,18	31,43	0,16
DEU10 5.Sieb >500	3	Röt	500	17,08	10800	14,18	2,66	2,34	14,74	0,24
DEU10 5.Sieb >63	3	Röt	63	44,41	480	9,45	2,66	1,64	42,77	0,16
DEU10 T/A	3	Röt	0	79,47	3600	34,57	2,66	9,31	70,16	0,57
DEU10 U/A	3	Röt		48,97	900					
DEU5 1.Sieb <63	1	Röt	2	59,71	480	14,91	2,70	1,87	57,84	0,25
DEU5 1.Sieb >1000	1	Röt	1000	3,89	4680	13,15	2,70	2,51	1,39	0,22
DEU5 1.Sieb >125	1	Röt	125	48,34	480	10,74	2,70	0,40	47,94	0,18
DEU5 1.Sieb >2000	1	Röt	2000	3,90	1800	13,91	2,70	2,08	1,82	0,23
DEU5 1.Sieb >250	1	Röt	250	35,24	480	13,21	2,70	1,36	33,88	0,22
DEU5 1.Sieb >500	1	Röt	500	2,90	1500	12,05	2,70	2,06	0,84	0,20
DEU5 1.Sieb >63	1	Röt	63	52,41	480	10,12	2,70	0,63	51,78	0,17
DEU5 2.Sieb <63	1	Röt	2	58,80	480	17,03	2,70	2,75	56,05	0,28
DEU5 2.Sieb >1000	1	Röt	1000	17,37	91740	18,94	2,70	3,37	14,00	0,31
DEU5 2.Sieb >125	1	Röt	125	67,39	480	20,33	2,70	3,17	64,23	0,34
DEU5 2.Sieb >2000	1	Röt	2000	7,04	65040	21,67	2,70	3,51	3,53	0,36
DEU5 2.Sieb >250	1	Röt	250	50,07	480	22,97	2,70	3,49	46,58	0,38
DEU5 2.Sieb >500	1	Röt	500	35,54	480	16,17	2,70	3,44	32,09	0,27
DEU5 2.Sieb >63	1	Röt	63	63,38	480	17,42	2,70	2,64	60,74	0,29
DEU5 3.Sieb <63	1	Röt	2	57,42	480	17,22	2,70	2,78	54,64	0,29
DEU5 3.Sieb >1000	1	Röt	1000	12,97	3600	20,14	2,70	3,19	9,78	0,33
DEU5 3.Sieb >125	1	Röt	125	62,00	480	17,28	2,70	2,94	59,06	0,29
DEU5 3.Sieb >2000	1	Röt	2000	12,47	19920	20,58	2,70	3,22	9,25	0,34
DEU5 3.Sieb >250	1	Röt	250	57,58	480	19,77	2,70	3,10	54,47	0,33
DEU5 3.Sieb >500	1	Röt	500	7,04	900	20,25	2,70	2,73	4,31	0,34
DEU5 3.Sieb >63	1	Röt	63	64,91	480	17,59	2,70	2,69	62,22	0,29
DEU5 4.Sieb <63	1	Röt	2	54,08	480	17,27	2,70	2,63	51,46	0,29
DEU5 4.Sieb >1000	1	Röt	1000	11,44	10800	14,31	2,70	3,40	8,04	0,24
DEU5 4.Sieb >125	1	Röt	125	65,51	480	20,87	2,70	3,08	62,43	0,35
DEU5 4.Sieb >2000	1	Röt	2000	59,91	165360	15,17	2,70	3,42	56,48	0,25
DEU5 4.Sieb >250	1	Röt	250	52,45	1200	13,90	2,70	3,12	49,34	0,23
DEU5 4.Sieb >500	1	Röt	500	21,78	1200	20,35	2,70	3,30	18,49	0,34
DEU5 4.Sieb >63	1	Röt	63	65,33	480	15,93	2,70	2,77	62,56	0,26
DEU5 5.Sieb <63	1	Röt	2	52,91	480	17,22	2,70	2,83	50,07	0,29
DEU5 5.Sieb >1000	1	Röt	1000	30,77	86040	18,83	2,70	3,27	27,50	0,31
DEU5 5.Sieb >125	1	Röt	125	64,13	480	18,65	2,70	3,01	61,11	0,31
DEU5 5.Sieb >125 wdh	1	Röt	125	64,64	480	18,65	2,70	3,01	61,62	0,31
DEU5 5.Sieb >2000	1	Röt	2000	21,73	19800	16,02	2,70	3,22	18,51	0,27
DEU5 5.Sieb >250	1	Röt	250	54,70	480	14,47	2,70	3,21	51,49	0,24
DEU5 5.Sieb >500	1	Röt	500	11,19	3180	20,98	2,70	3,34	7,85	0,35
DEU5 5.Sieb >63	1	Röt	63	60,27	480	16,27	2,70	2,72	57,55	0,27
DEU5 5.Sieb >63 wdh	1	Röt	63	61,70	480	16,27	2,70	2,72	58,98	0,27
DEU5 T/A	1	Röt	0	72,93	7200	26,30	2,70	5,92	67,01	0,44
DEU6	4	Röt	0							
DEU7 1.Sieb <63	2	Röt	2	46,77	480	12,36	2,72			0,21
DEU7 1.Sieb >1000	2	Röt	1000	8,69	600	16,26	2,72	2,84	5,85	0,27
DEU7 1.Sieb >125	2	Röt	125	44,08	480	7,74	2,72	1,60	42,48	0,13

Anhang A – Versuchsergebnisse – Diagramme und Tabellen

	Typ	Lithologie	Korngröße	w <sub>B</sub> kor.	Zeit w <sub>B</sub>	s <sub>des</sub>	Korndichte	Wasserdampfadsorption	Kappillarwasser	Adsorptionswasser (errechnet)
			µm	%	s	m <sup>2</sup> /g	g/cm <sup>3</sup>	%	%	%
DEU7 1.Sieb >2000	2	Röt	2000	5,89	1800	13,76	2,72	2,62	3,27	0,23
DEU7 1.Sieb >250	2	Röt	250	33,22	6540	8,18	2,72	1,81	31,41	0,14
DEU7 1.Sieb >500	2	Röt	500	10,71	900	13,80	2,72	2,41	8,30	0,23
DEU7 1.Sieb >63	2	Röt	63	46,98	480	7,67	2,72	0,69	46,29	0,13
DEU7 2.Sieb <63	2	Röt	2	55,02	480	18,00	2,72	3,35	51,67	0,30
DEU7 2.Sieb >1000	2	Röt	1000	14,31	2700	17,28	2,72	2,92	11,39	0,29
DEU7 2.Sieb >125	2	Röt	125	46,00	480	12,43	2,72	1,73	44,27	0,21
DEU7 2.Sieb >2000	2	Röt	2000	2,43	3600	14,15	2,72	2,86	-0,43	0,24
DEU7 2.Sieb >250	2	Röt	250	40,65	480	14,09	2,72	2,25	38,40	0,23
DEU7 2.Sieb >500	2	Röt	500	15,67	480	15,01	2,72	2,80	12,87	0,25
DEU7 2.Sieb >63	2	Röt	63	44,06	480	11,96	2,72	1,68	42,38	0,20
DEU7 3.Sieb <63	2	Röt	2	51,11	480	15,76	2,72	2,61	48,50	0,26
DEU7 3.Sieb >1000	2	Röt	1000	13,43	1800	19,73	2,72	2,91	10,52	0,33
DEU7 3.Sieb >125	2	Röt	125	44,59	480	12,86	2,72	1,70	42,89	0,21
DEU7 3.Sieb >2000	2	Röt	2000	10,56	3600	22,45	2,72	2,97	7,59	0,37
DEU7 3.Sieb >250	2	Röt	250	44,30	480	12,85	2,72	2,18	42,12	0,21
DEU7 3.Sieb >500	2	Röt	500	14,04	900	16,97	2,72	2,66	11,38	0,28
DEU7 3.Sieb >63	2	Röt	63	50,92	480	12,66	2,72	1,75	49,17	0,21
DEU7 4.Sieb <63	2	Röt	2	52,98	480	11,21	2,72	2,54	50,44	0,19
DEU7 4.Sieb >1000	2	Röt	1000	40,26	87660	20,53	2,72	2,99	37,27	0,34
DEU7 4.Sieb >125	2	Röt	125	52,55	480	11,75	2,72	2,00	50,55	0,20
DEU7 4.Sieb >2000	2	Röt	2000	51,27	80460	14,48	2,72	2,83	48,44	0,24
DEU7 4.Sieb >250	2	Röt	250	29,82	480	13,12	2,72	2,27	27,55	0,22
DEU7 4.Sieb >500	2	Röt	500	23,76	480	15,25	2,72	2,73	21,03	0,25
DEU7 4.Sieb >63	2	Röt	63	53,02	480	10,12	2,72	1,79	51,23	0,17
DEU7 5.Sieb <63	2	Röt	2	48,32	480	14,06	2,72	2,56	45,76	0,23
DEU7 5.Sieb <63 wdh	2	Röt	2	48,73	480	14,06	2,72	2,56	46,17	0,23
DEU7 5.Sieb >1000	2	Röt	1000	16,17	7200	18,50	2,72	3,37	12,80	0,31
DEU7 5.Sieb >125	2	Röt	125	48,50	480	15,17	2,72	2,24	46,26	0,25
DEU7 5.Sieb >2000	2	Röt	2000	34,97	68400	15,45	2,72	2,89	32,08	0,26
DEU7 5.Sieb >250	2	Röt	250	42,63	480	13,06	2,72	2,47	40,15	0,22
DEU7 5.Sieb >500	2	Röt	500	13,10	3600	16,80	2,72	3,03	10,06	0,28
DEU7 5.Sieb >63	2	Röt	63	51,57	480	11,74	2,72	1,87	49,70	0,20
DEU7 5.Sieb >63 wdh	2	Röt	63	52,15	480	11,74	2,72	1,87	50,28	0,20
DEU7 T/A	2	Röt	0	98,33	59880	46,04	2,72	10,34	87,99	0,77
DEU7 U/A	2	Röt		49,63	480		2,72			
DH004	2	Röt	0	47,27	1200	47,48	2,61			0,79
DH004 1.Sieb <63	2	Röt	2	41,34	480	36,48	2,66	6,64	34,70	0,61
DH004 1.Sieb >63	2	Röt	63	42,18	480	21,23	2,66	2,78	39,40	0,35
DH004 1.Sieb >125	2	Röt	125	46,21	480	30,82	2,66	3,24	42,98	0,51
DH004 1.Sieb >250	2	Röt	250	41,67	480	33,90	2,66	3,80	37,86	0,56
DH004 1.Sieb >500	2	Röt	500	21,75	480	42,08	2,66	4,40	17,35	0,70
DH004 1.Sieb >1000	2	Röt	1000	7,24	480	34,03	2,66	3,96	3,28	0,57
DH004 1.Sieb >2000	2	Röt	2000	1,62	480	28,51	2,66	2,31	-0,69	0,47
DH004 2.Sieb <63	2	Röt	2	59,73	480	24,88	2,66	7,17	52,56	0,41
DH004 2.Sieb >1000	2	Röt	1000	15,57	480	45,68	2,66	4,72	10,86	0,76
DH004 2.Sieb >125	2	Röt	125	44,11	480	28,03	2,66	3,42	40,69	0,47
DH004 2.Sieb >2000	2	Röt	2000	3,72	480	29,80	2,66	4,05	-0,33	0,50
DH004 2.Sieb >250	2	Röt	250	37,90	480	32,77	2,66	3,85	34,06	0,54
DH004 2.Sieb >500	2	Röt	500	21,18	480	29,88	2,66	3,94	17,23	0,50
DH004 2.Sieb >63	2	Röt	63	38,29	480	12,65	2,66	1,41	36,87	0,21
DH004 3.Sieb <63	2	Röt	2	47,59	480	28,04	2,66	6,05	41,55	0,47
DH004 3.Sieb >1000	2	Röt	1000	12,22	480	30,18	2,66	4,45	7,77	0,50
DH004 3.Sieb >125	2	Röt	125	47,78	480	22,12	2,66	3,01	44,77	0,37
DH004 3.Sieb >2000	2	Röt	2000	2,31	480	28,37	2,66	3,06	-0,75	0,47
DH004 3.Sieb >250	2	Röt	250	38,29	480	28,22	2,66	4,75	33,55	0,47

Anhang A – Versuchsergebnisse – Diagramme und Tabellen

	Typ	Lithologie	Korngröße	w <sub>B</sub> kor.	Zeit w <sub>B</sub>	s <sub>des</sub>	Korndichte	Wasserdampfadsorption	Kappillarwasser	Adsorptionswasser (errechnet)
			µm	%	s	m <sup>2</sup> /g	g/cm <sup>3</sup>	%	%	%
DH004 3.Sieb >500	2	Röt	500	13,18	480	30,46	2,66	4,29	8,89	0,51
DH004 3.Sieb >63	2	Röt	63	37,12	480	13,20	2,66	1,84	35,28	0,22
DH004 4.Sieb <63	2	Röt	2	61,26	480	29,94	2,66	12,32	48,93	0,50
DH004 4.Sieb >1000	2	Röt	1000	11,28	480	29,95	2,66	4,35	6,92	0,50
DH004 4.Sieb >125	2	Röt	125	40,64	480	28,80	2,66	4,85	35,79	0,48
DH004 4.Sieb >2000	2	Röt	2000				2,66			0,00
DH004 4.Sieb >250	2	Röt	250	37,97	480	31,53	2,66	5,07	32,91	0,52
DH004 4.Sieb >500	2	Röt	500	22,30	480	31,85	2,66	4,62	17,69	0,53
DH004 4.Sieb >63	2	Röt	63	33,99	480	13,59	2,66	1,95	32,04	0,23
DH004 5.Sieb <63	2	Röt	2	61,51	480	34,79	2,66	7,29	54,22	0,58
DH004 5.Sieb >1000	2	Röt	1000	9,36	480	26,07	2,66	3,48	5,88	0,43
DH004 5.Sieb >125	2	Röt	125	39,14	480	22,69	2,66	3,24	35,91	0,38
DH004 5.Sieb >2000	2	Röt	2000				2,66			0,00
DH004 5.Sieb >250	2	Röt	250	36,90	480	25,84	2,66	3,98	32,93	0,43
DH004 5.Sieb >500	2	Röt	500	17,08	480	25,59	2,66	3,77	13,31	0,43
DH004 5.Sieb >63	2	Röt	63	34,30	480	10,81	2,66	1,75	32,55	0,18
EB1	2	Röt	0	78,84	480	78,44	2,58			1,30
EB1 <63µm	2	Röt	2			31,04	2,58			0,52
EB1 0,063mm	2	Röt	63			15,84	2,58			0,26
EB1 0,125mm	2	Röt	125			25,67	2,58			0,43
EB1 0,25mm	2	Röt	250			25,52	2,58			0,42
EB1 0,5mm	2	Röt	500			31,17	2,58			0,52
EB1 1mm	2	Röt	1000			27,06	2,58			0,45
EB1 2mm	2	Röt	2000			17,87	2,58			0,30
ESS1 1.Sieb <63	2	Opalinuston	2	60,77	480	25,09	2,58	4,89	55,88	0,42
ESS1 1.Sieb >63	2	Opalinuston	63	59,21	480	25,78	2,58	4,29	54,92	0,43
ESS1 1.Sieb >125	2	Opalinuston	125	52,63	480	26,92	2,58	4,50	48,13	0,45
ESS1 1.Sieb >250	2	Opalinuston	250	46,55	480	25,67	2,58	4,39	42,16	0,43
ESS1 1.Sieb >500	2	Opalinuston	500	20,84	480	25,91	2,58	4,60	16,24	0,43
ESS1 1.Sieb >1000	2	Opalinuston	1000	6,75	480	23,26	2,58	4,45	2,30	0,39
ESS1 1.Sieb >2000	2	Opalinuston	2000	3,70	480	26,62	2,58	4,72	-1,02	0,44
ESS1 2.Sieb <63	2	Opalinuston	2	55,63	480	25,42	2,58	4,19	51,44	0,42
ESS1 2.Sieb >1000	2	Opalinuston	1000	11,53	480	25,35	2,58	4,02	7,51	0,42
ESS1 2.Sieb >125	2	Opalinuston	125	52,73	480	27,37	2,58	3,97	48,76	0,45
ESS1 2.Sieb >2000	2	Opalinuston	2000	8,68	480	17,83	2,58	3,91	4,77	0,30
ESS1 2.Sieb >250	2	Opalinuston	250	37,94	480	27,05	2,58	4,16	33,79	0,45
ESS1 2.Sieb >500	2	Opalinuston	500	28,75	480	22,18	2,58	4,17	24,58	0,37
ESS1 2.Sieb >63	2	Opalinuston	63	50,48	480	22,00	2,58	4,11	46,37	0,37
ESS1 3.Sieb <63	2	Opalinuston	2			22,22	2,58			0,37
ESS1 3.Sieb >1000	2	Opalinuston	1000	15,33	7200	22,89	2,58	4,08	11,25	0,38
ESS1 3.Sieb >125	2	Opalinuston	125	51,60	480	24,76	2,58	4,19	47,41	0,41
ESS1 3.Sieb >2000	2	Opalinuston	2000	145,55	163200	21,18	2,58	4,12	141,42	0,35
ESS1 3.Sieb >250	2	Opalinuston	250	45,97	1800	23,00	2,58	4,01	41,96	0,38
ESS1 3.Sieb >500	2	Opalinuston	500	23,41	3600	26,92	2,58	3,96	19,45	0,45
ESS1 3.Sieb >63	2	Opalinuston	63	50,19	480	24,42	2,58	4,22	45,97	0,41
ESS1 4.Sieb <63	2	Opalinuston	2	48,83	480	19,52	2,58	4,29	44,54	0,32
ESS1 4.Sieb >1000	2	Opalinuston	1000	3,68	360	21,66	2,58	4,13	-0,45	0,36
ESS1 4.Sieb >125	2	Opalinuston	125	47,00	480	21,62	2,58	4,21	42,79	0,36
ESS1 4.Sieb >2000	2	Opalinuston	2000	5,81	5400	24,49	2,58	4,13	1,69	0,41
ESS1 4.Sieb >250	2	Opalinuston	250	35,45	480	29,40	2,58	4,18	31,27	0,49
ESS1 4.Sieb >500	2	Opalinuston	500	11,35	7200	26,12	2,58	4,21	7,14	0,43
ESS1 4.Sieb >63	2	Opalinuston	63	48,53	480	22,37	2,58	4,42	44,11	0,37
ESS1 5.Sieb <63	2	Opalinuston	2	47,38	480	19,04	2,58	4,33	43,06	0,32
ESS1 5.Sieb >1000	2	Opalinuston	1000	107,88	339960	21,02	2,58	4,21	103,67	0,35
ESS1 5.Sieb >125	2	Opalinuston	125	43,12	1200	24,24	2,58	4,40	38,73	0,40
ESS1 5.Sieb >2000	2	Opalinuston	2000	124,59	526740	27,43	2,58	3,95	120,65	0,46



Anhang A – Versuchsergebnisse – Diagramme und Tabellen

	Typ	Lithologie	Korngröße	W <sub>B</sub> kor.	Zeit w <sub>B</sub>	S <sub>des</sub>	Korndichte	Wasserdampfadsorption	Kapillarwasser	Adsorptionswasser (errechnet)
			µm	%	s	m <sup>2</sup> /g	g/cm <sup>3</sup>	%	%	%
ESS1 5.Sieb >2000 wdh	2	Opalinuston	2000	51,44	147480	27,43	2,58	3,95	47,49	0,46
ESS1 5.Sieb >250	2	Opalinuston	250	42,01	480	22,93	2,58	4,33	37,68	0,38
ESS1 5.Sieb >500	2	Opalinuston	500	158,68	342300	9,46	2,58	4,34	154,34	0,16
ESS1 5.Sieb >500 wdh	2	Opalinuston	500	100,06	172680	9,46	2,58	4,34	95,72	0,16
ESS1 5.Sieb >63	2	Opalinuston	63	47,38	480	23,44	2,58	4,38	43,00	0,39
ESS1 T/A	2	Opalinuston	0	81,57	65880	48,22	2,58	10,53	71,04	0,80
ESS2 T/A	1	Opalinuston	0	74,32	18000	50,02	2,57	10,81	63,51	0,83
ESS3 T/A	3	Opalinuston	0	80,47	1800	47,44	2,57	11,23	69,24	0,79
ESS3/1 <63	3	Opalinuston	2			20,76	2,57	4,34	-4,34	0,34
ESS3/1 >1000	3	Opalinuston	1000	36,64	75600	22,50	2,57	5,10	31,54	0,37
ESS3/1 >125	3	Opalinuston	125			24,81	2,57	4,95	-4,95	0,41
ESS3/1 >2000	3	Opalinuston	2000	15,25	10800	23,88	2,57	5,03	10,22	0,40
ESS3/1 >250	3	Opalinuston	250	41,59	480	26,23	2,57	4,90	36,70	0,44
ESS3/1 >500	3	Opalinuston	500	22,53	900	25,92	2,57	4,97	17,57	0,43
ESS3/1 >63	3	Opalinuston	63			24,27	2,57	4,47	-4,47	0,40
ESS3/2 <63	3	Opalinuston	2	52,61	480	23,72	2,57	4,28	48,32	0,39
ESS3/2 >1000	3	Opalinuston	1000	19,65	10800	29,28	2,57	4,95	14,70	0,49
ESS3/2 >125	3	Opalinuston	125	56,15	480	27,53	2,57	4,42	51,72	0,46
ESS3/2 >2000	3	Opalinuston	2000	19,15	7200	22,35	2,57	4,62	14,53	0,37
ESS3/2 >250	3	Opalinuston	250	35,00	600	21,24	2,57	4,48	30,52	0,35
ESS3/2 >500	3	Opalinuston	500	17,89	5400	25,54	2,57	4,66	13,22	0,42
ESS3/2 >63	3	Opalinuston	63	55,64	480	24,38	2,57	4,31	51,33	0,41
ESS3/3 <63	3	Opalinuston	2	51,24	480	23,66	2,57	4,40	46,84	0,39
ESS3/3 >1000	3	Opalinuston	1000	43,94	69600	24,51	2,57	4,34	39,60	0,41
ESS3/3 >125	3	Opalinuston	125	56,46	480	25,29	2,57	4,26	52,21	0,42
ESS3/3 >2000	3	Opalinuston	2000	25,30	18000	28,59	2,57	5,37	19,93	0,48
ESS3/3 >250	3	Opalinuston	250	49,65	480	26,90	2,57	4,17	45,48	0,45
ESS3/3 >500	3	Opalinuston	500	67,31	104400	28,84	2,57	4,20	63,12	0,48
ESS3/3 >63	3	Opalinuston	63	60,62	480	29,56	2,57	4,30	56,32	0,49
ESS3/4 <63	3	Opalinuston	2	52,10	480	22,99	2,57	4,25	47,85	0,38
ESS3/4 >1000	3	Opalinuston	1000	7,31	5400	31,38	2,57	4,66	2,64	0,52
ESS3/4 >125	3	Opalinuston	125	59,12	600	23,41	2,57	3,97	55,15	0,39
ESS3/4 >2000	3	Opalinuston	2000	58,48	73200	29,17	2,57	5,53	52,95	0,48
ESS3/4 >250	3	Opalinuston	250	47,28	7200	25,38	2,57	4,41	42,87	0,42
ESS3/4 >500	3	Opalinuston	500	29,26	7200	25,41	2,57	4,67	24,58	0,42
ESS3/4 >63	3	Opalinuston	63	58,40	480	25,17	2,57	3,74	54,66	0,42
ESS3/5 <63	3	Opalinuston	2	52,23	480	22,82	2,57	4,96	47,27	0,38
ESS3/5 >1000	3	Opalinuston	1000	54,44	70200	27,31	2,57	5,49	48,95	0,45
ESS3/5 >125	3	Opalinuston	125	62,23	480	27,65	2,57	5,06	57,17	0,46
ESS3/5 >2000	3	Opalinuston	2000	14,26	5400	28,24	2,57	5,86	8,40	0,47
ESS3/5 >250	3	Opalinuston	250	52,79	480	30,84	2,57	5,11	47,67	0,51
ESS3/5 >500	3	Opalinuston	500	31,67	1800	29,87	2,57	5,21	26,47	0,50
ESS3/5 >63	3	Opalinuston	63	62,87	480	25,05	2,57	5,18	57,68	0,42
ESS5 T/A	4	Opalinuston	0	68,46	18000	41,68	2,58	9,76	58,69	0,69
FW5	4	Röt	0	88,48	480	30,57	2,31			0,51
KD 1 <63	2	Röt	2			39,46	2,67			0,66
KD1	2	Röt	0	58,04	1200	47,55		11,54	46,50	0,79
KD1 0,063mm	2	Röt	63			27,21	2,66			0,45
KD1 0,125mm	2	Röt	125			38,88	2,66			0,65
KD1 0,25mm	2	Röt	250			35,83	2,66			0,60
KD1 0,5mm	2	Röt	500			38,00	2,66			0,63
KD1 1mm	2	Röt	1000			37,15	2,66			0,62
KD1 2mm	2	Röt	2000			38,77	2,66			0,64
SP HS 1.S. <63	2	Röt	2					7,28	-7,28	7,28
SP HS 1.S >63	2	Röt	63	48,06	480	30,12	2,60	3,98	44,09	0,50
SP HS 1.S >125	2	Röt	125	43,84	480	30,82	2,60	4,79	39,06	0,51

Anhang A – Versuchsergebnisse – Diagramme und Tabellen

	Typ	Lithologie	Korngröße	w <sub>B</sub> kor.	Zeit w <sub>B</sub>	s <sub>des</sub>	Korndichte	Wasserdampfadsorption	Kappillarwasser	Adsorptionswasser (errechnet)
			µm	%	s	m <sup>2</sup> /g	g/cm <sup>3</sup>	%	%	%
SP HS 1.S >250 a	2	Röt	250	37,89	480	40,89	2,60	5,04	32,85	0,68
SP HS 1.S >250 b	2	Röt	250	39,19	480	40,89	2,60	5,04	34,15	0,68
SP HS 1.S >500 a	2	Röt	500	37,30	480	45,86	2,60	5,01	32,29	0,76
SP HS 1.S >500 b	2	Röt	500	36,35	480	45,86	2,60	5,01	31,34	0,76
SP HS 1.S >1000	2	Röt	1000	25,49	480	33,72	2,60	5,05	20,44	0,56
SP HS 1.S >2000	2	Röt	2000					6,01	-6,01	6,01
SH HS 2.S <63	2	Röt						7,38	-7,38	
SP HS 2.S >1000 a	2	Röt	1000	0,00	480	34,74	2,60	5,49	-5,49	0,58
SP HS 2.S >1000 b	2	Röt	1000	4,51	480	34,74	2,60	5,49	-0,98	0,58
SP HS 2.S >125	2	Röt	125	41,31	480	28,40	2,60	5,21	36,11	0,47
SP HS 2.S >2000								4,55	-4,55	
SP HS 2.S >250	2	Röt	250	35,13	480	36,73	2,60	6,04	29,09	0,61
SP HS 2.S >500	2	Röt	500	26,22	480	37,23	2,60	6,17	20,06	0,62
SP HS 2.S >63	2	Röt	63	43,79	480	27,30	2,60	4,21	39,58	0,45
SP HS 3.S >1000 a	2	Röt	1000	5,02	480	34,32	2,60	5,00	0,02	0,57
SP HS 3.S >125 a	2	Röt	125	38,33	480	32,58	2,60	4,83	33,51	0,54
SP HS 3.S >125 b	2	Röt	125	41,08	480	32,58	2,60	4,83	36,25	0,54
SP HS 3.S >250 a	2	Röt	250	30,08	480	33,57	2,60	5,92	24,16	0,56
SP HS 3.S >250 b	2	Röt	250	35,38	480	33,57	2,60	5,92	29,46	0,56
SP HS 3.S >500 a	2	Röt	500	28,41	480	34,24	2,60	5,58	22,83	0,57
SP HS 3.S >500 b	2	Röt	500	6,98	480	34,24	2,60	5,58	1,40	0,57
SP HS 3.S >63 a	2	Röt	63	41,27	480	33,43	2,60	4,21	37,05	0,56
SP HS 3.S >63 b	2	Röt	63	39,99	480	33,43	2,60	4,21	35,78	0,56
SP HS 4.S < 63	2	Röt	2				2,60	8,36	-8,36	
SP HS 4.S >1000	2	Röt	1000				2,60	4,17	-4,17	
SP HS 4.S >125 a	2	Röt	125	40,22	480	36,26	2,60	5,70	34,51	0,60
SP HS 4.S >250 a	2	Röt	250	34,55	480	37,29	2,60	6,21	28,34	0,62
SP HS 4.S >500 a	2	Röt	500	7,67	480	34,95	2,60	5,72	1,95	0,58
SP HS 4.S >63 a	2	Röt	63	44,15	480	30,41	2,60	4,82	39,33	0,51
SP HS 5.S < 63	2	Röt	2				2,60	8,94	-8,94	
SP HS 5.S >125 a	2	Röt	125	42,27	480	32,44	2,60	5,68	36,59	0,54
SP HS 5.S >250 a	2	Röt	250	34,80	480	47,78	2,60	6,15	28,64	0,79
SP HS 5.S >500 a	2	Röt	500	0,04	480	31,43	2,60	5,03	-4,99	0,52
SP HS 5.S >63 a	2	Röt	63	43,79	480	27,39	2,60	4,70	39,09	0,46
SP HS 6.S >125 a	2	Röt	125	44,22	480	43,23	2,60			0,72
SP HS 6.S >250 a	2	Röt	250	36,26	480	33,61	2,60			0,56
SP HS 6.S >500 a	2	Röt	500	0,05	480	33,61	2,60			0,56
SP HS 6.S >63 a	2	Röt	63	43,74	480	29,53	2,60			0,49
SP7	2	Röt	0	40,62	480	41,15	2,35			0,68
WF7	3	Röt	0	62,40	900	20,41	2,31			0,34
WF7 1.Sieb <63	3	Röt	2	47,44	480	20,17	2,71			0,34
WF7 1.Sieb >1000	3	Röt	1000	3,73	480	22,54	2,71			0,37
WF7 1.Sieb >125	3	Röt	125	39,45	480	20,85	2,71			0,35
WF7 1.Sieb >2000	3	Röt	2000	4,83	480	20,47	2,71			0,34
WF7 1.Sieb >250	3	Röt	250	35,78	480	21,14	2,71			0,35
WF7 1.Sieb >500	3	Röt	500	10,55	480	17,02	2,71			0,28
WF7 1.Sieb >63	3	Röt	63	40,90	480	17,70	2,71			0,29
WF7 2.Sieb <63	3	Röt	2	43,90	480	19,03	2,71			0,32
WF7 2.Sieb >1000	3	Röt	1000	9,08	480	19,85	2,71			0,33
WF7 2.Sieb >125	3	Röt	125	47,43	480	20,78	2,71			0,35
WF7 2.Sieb >2000	3	Röt	2000	9,36	480	17,73	2,71			0,29
WF7 2.Sieb >250	3	Röt	250	47,93	480	18,87	2,71			0,31
WF7 2.Sieb >500	3	Röt	500	20,80	480	14,27	2,71			0,24
WF7 2.Sieb >63	3	Röt	63	45,72	480	26,10	2,71			0,43
WF7 3.Sieb <63	3	Röt	2			15,40	2,71			0,26
WF7 3.Sieb >1000	3	Röt	1000			16,88	2,71			0,28

	Typ	Lithologie	Korngröße	$w_B$ kor.	Zeit $w_B$	$s_{des}$	Korndichte	Wasserdampfadsorption	Kapillarwasser	Adsorptionswasser (errechnet)
			$\mu m$	%	s	$m^2/g$	$g/cm^3$	%	%	%
WF7 3.Sieb >125	3	Röt	125			15,58	2,71			0,26
WF7 3.Sieb >2000	3	Röt	2000			11,19	2,71			0,19
WF7 3.Sieb >250	3	Röt	250			21,97	2,71			0,37
WF7 3.Sieb >500	3	Röt	500			25,34	2,71			0,42
WF7 3.Sieb >63	3	Röt	63			23,60	2,71			0,39
WZ2	2	Röt	0			24,08	2,68			0,40

A.3 Korngrößenverteilungen der disintegrierten Tonsteine

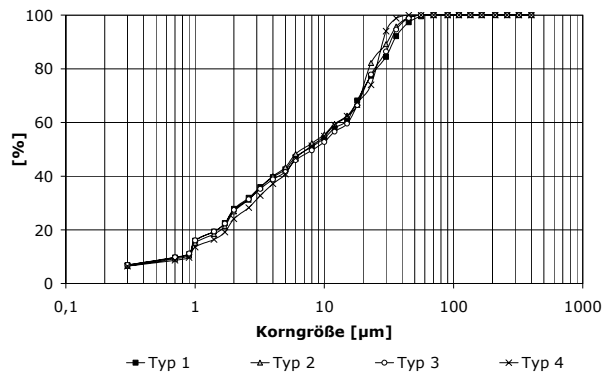


Abbildung II Opalinuston (Essingen)

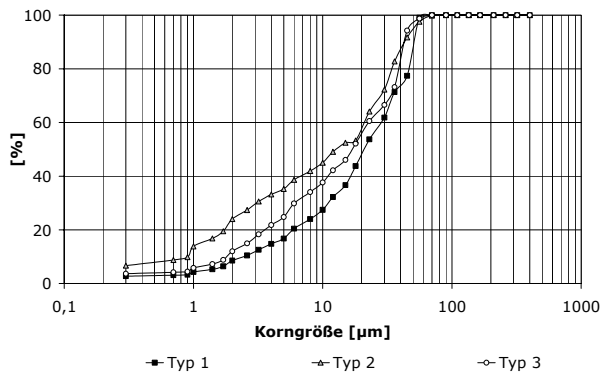


Abbildung III Röt-Tonsteine (Deuna)

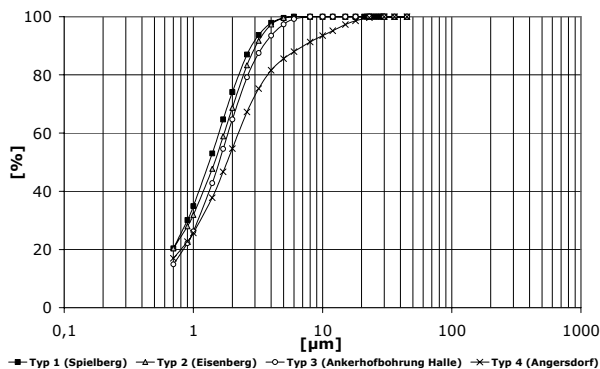


Abbildung IV Sonstige Röt-Tonsteine.

A.4 Aggregatgrößenverteilungen

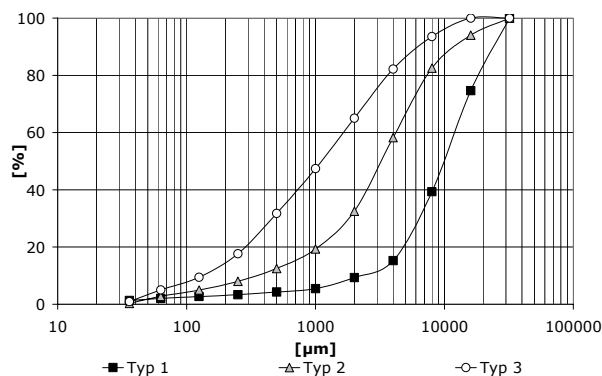


Abbildung V Röt-Tonsteine Deuna

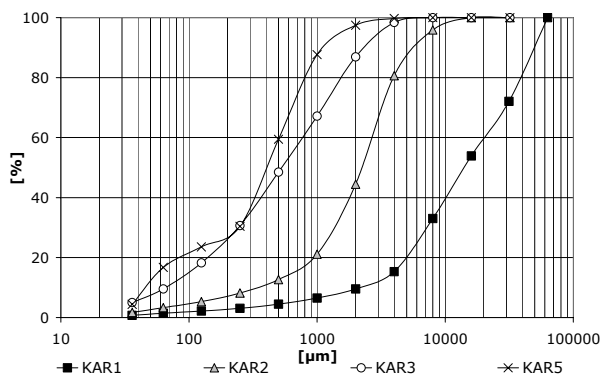


Abbildung VI Röt-Tonsteine Karsdorf

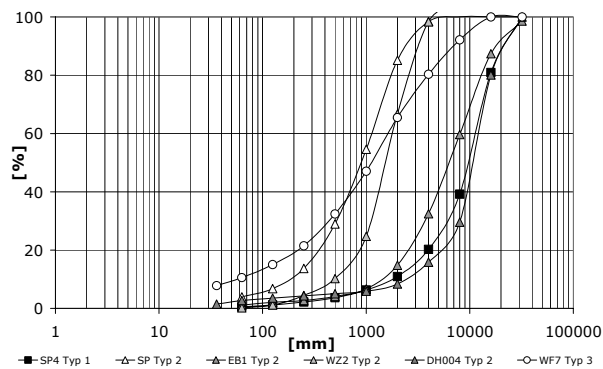


Abbildung VII sonstige Röt-Tonsteine

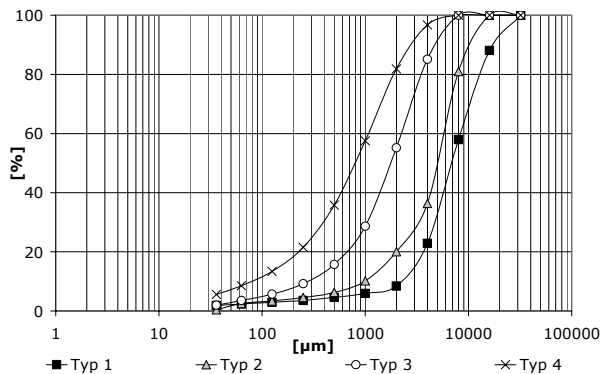


Abbildung VIII Opalinuston Essingen

A.5 Scherversuche Tertiärton

Zusammenhang zwischen Saugspannung und Bruchspannung im direkten Scherversuch für den Tertiärton. (Berechnung nach VANAPILLI et al., 1996).

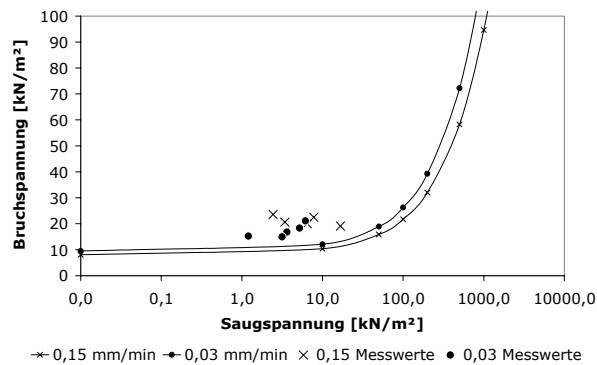


Abbildung IX Vertikalspannung 10 kN/m<sup>2</sup>

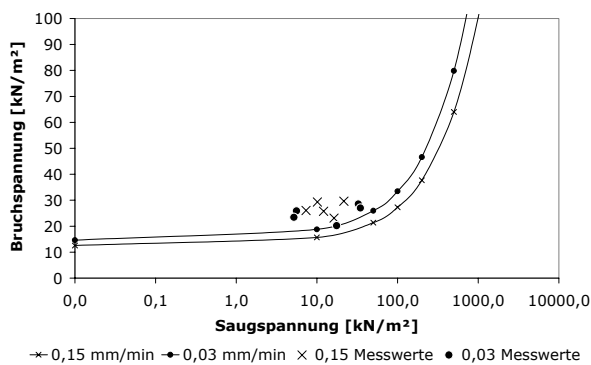


Abbildung X Vertikalspannung 25 kN/m<sup>2</sup>

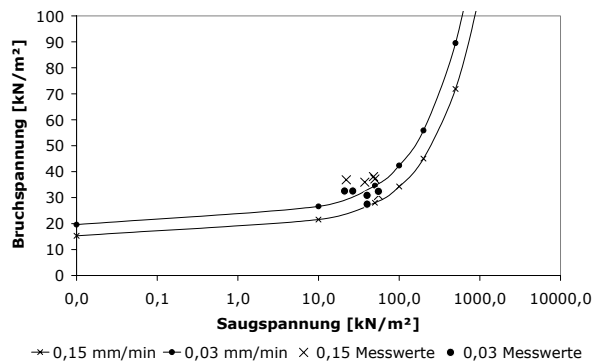


Abbildung XI Vertikalspannung 50 kN/m<sup>2</sup>

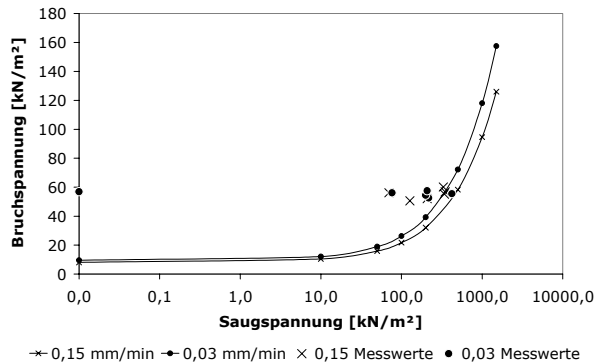


Abbildung XII Vertikalspannung 100 kN/m<sup>2</sup>

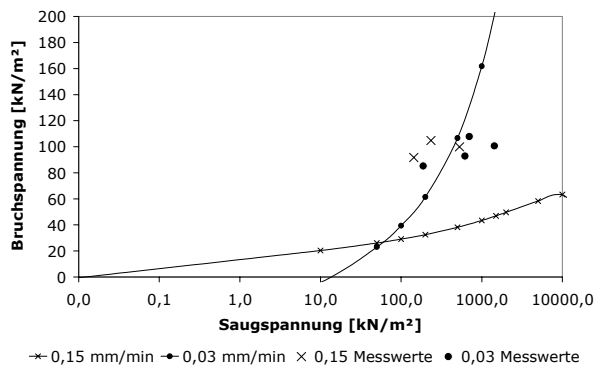


Abbildung XIII Vertikalspannung 200 kN/m<sup>2</sup>

A.6 Scherversuche Tonsteine

Zusammenhang zwischen Saugspannung und Bruchspannung im direkten Scherversuch für die unterschiedlich verwitterten Tonsteine (Berechnung nach VANAPILLI et al., 1996).

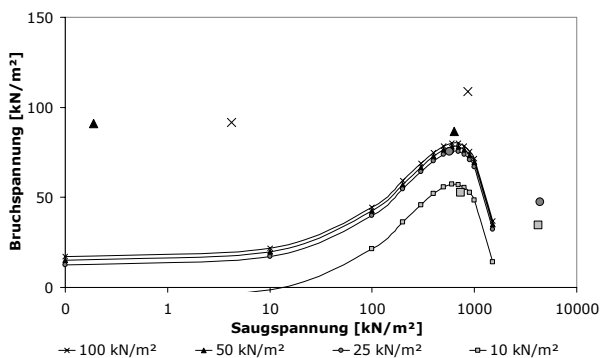


Abbildung XIV Opalinuston Typ 2

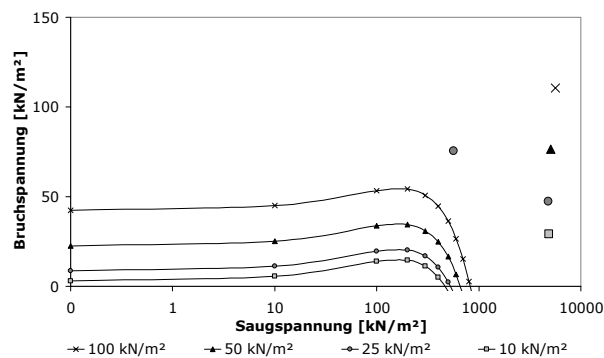


Abbildung XV Röt-Tonstein Typ 2

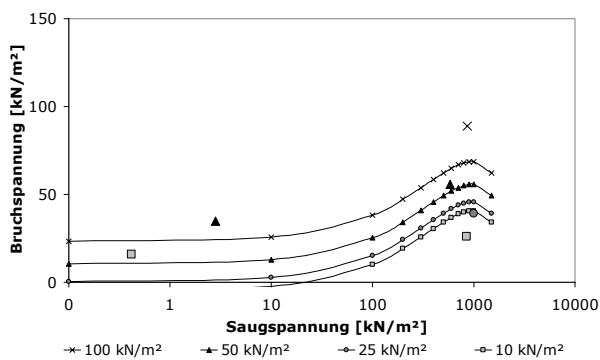


Abbildung XVI Opalinuston Typ 3

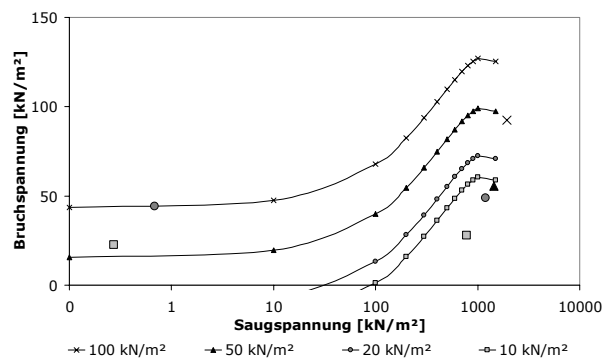


Abbildung XVII Röt-Tonstein Typ 3

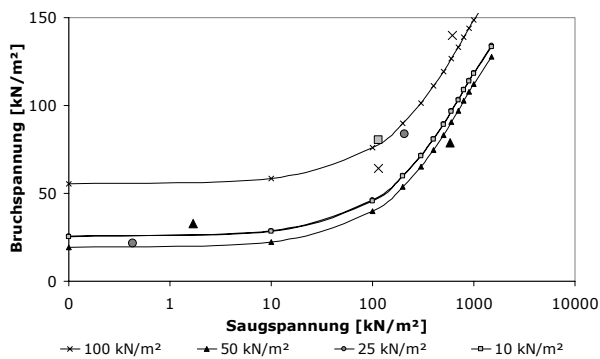


Abbildung XVIII Opalinuston Typ 4

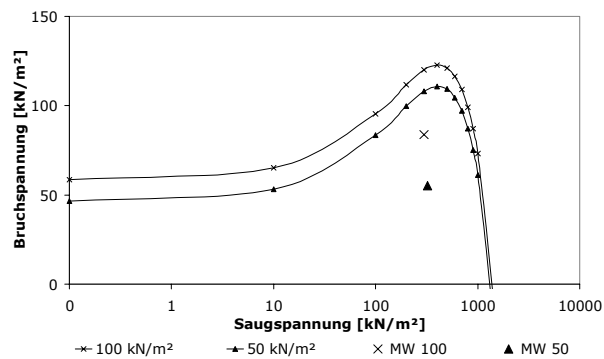


Abbildung XIX Röt-Tonstein Typ 4

A.7 Kriechpresse

**Tabella I** Übersicht: Ergebnisse der Kriechversuche

Probe	Typ	Vertikalspannung [kN/m <sup>2</sup> ]	delta sigma [kN/m <sup>2</sup> ]	d / l	bezogene Setzung	Steifemodul [MN/m <sup>2</sup> ]	Zeit [d]
WZ7 (Röt)	2	10859	10859	1,3	0,2	52,7	226
WZ11 (Röt)	3	10678	10678	0,7	0,3	35,8	369
WF5 (Röt)	3	10859	10859	1,2	0,5	22,0	226
ESS6 (Opalinuston)	3	10612	10612	1,0	0,3	31,4	369
DEU U1 (Röt)	3	8687	4344	1,1	0,4	93,0	18
AH1 (Röt)	3	10859	6515	0,6	0,3	37,4	82
WZ4 (Röt)	3	10859	10859	1,0	0,0	75,8	135
FW2 (Röt)	4	10859	10859	0,7	0,2	41,1	80
FW3 (Röt)	4	10859	10859	1,0	0,1	29,1	63

WZ – Steinbruch Wüstenzell

WF – Wiesenfeld

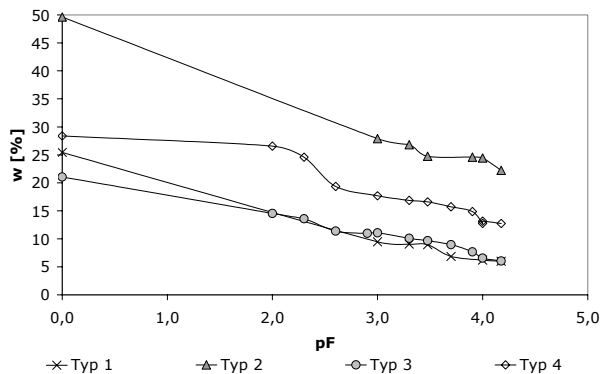
DEU – Zementwerk Deuna

AH – Halle, Bohrung am Ankerhof

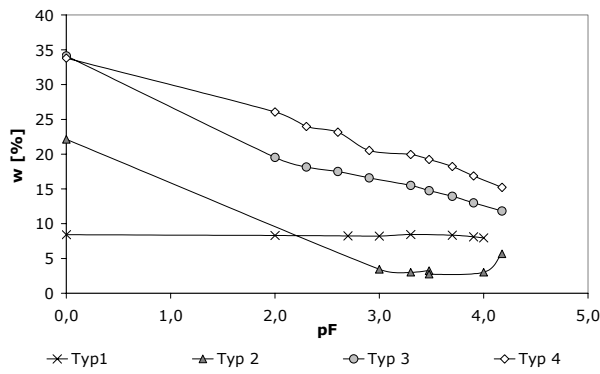
FW – Angersdorf Baustelle Feuerwehr

ESS – Essingen

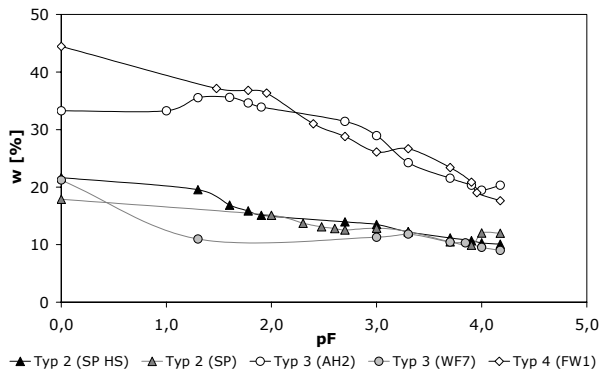
A.8 Saugspannung



**Abbildung XX** Wasserspannungskurven von Röt-Tonsteinen aus Deuna in unterschiedlichem Verwitterungszustand



**Abbildung XXI** Wasserspannungskurven von Opalinuston aus Essingen in unterschiedlichem Verwitterungszustand



**Abbildung XXII** Wasserspannungskurven von unterschiedlich verwitterten Röt-Tonsteinen unterschiedlicher Lokalitäten

A.9 Röntgendiffraktometrie

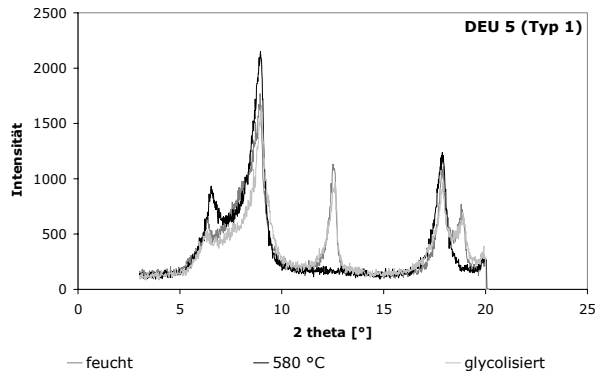


Abbildung XXIII Deuna, Typ 1, < 2 μm

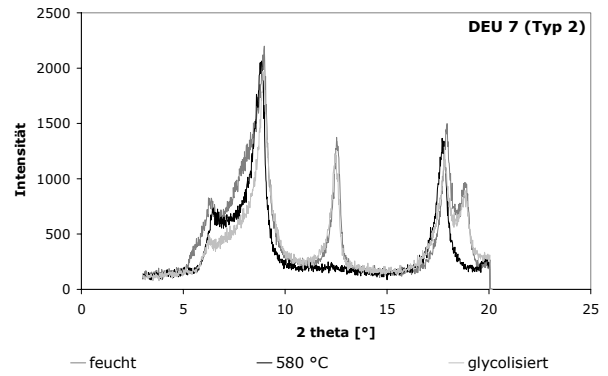


Abbildung XXIV Deuna, Typ 2, < 2 μm

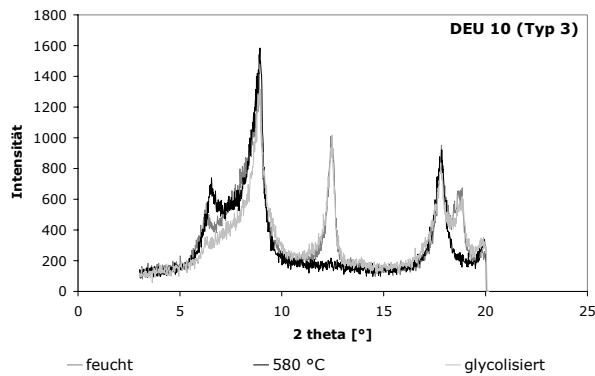


Abbildung XXV Deuna, Typ 3, < 2 μm

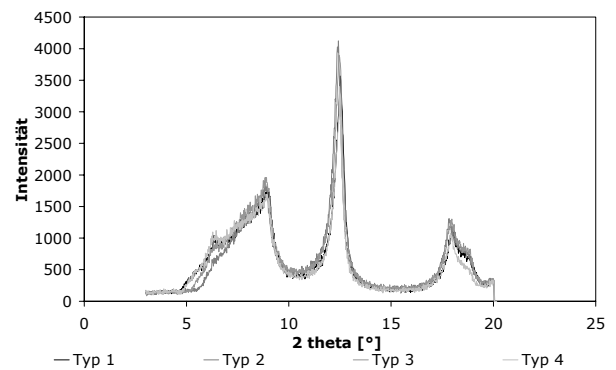


Abbildung XXVI Opalinuston Essingen, < 2 μm, feucht.

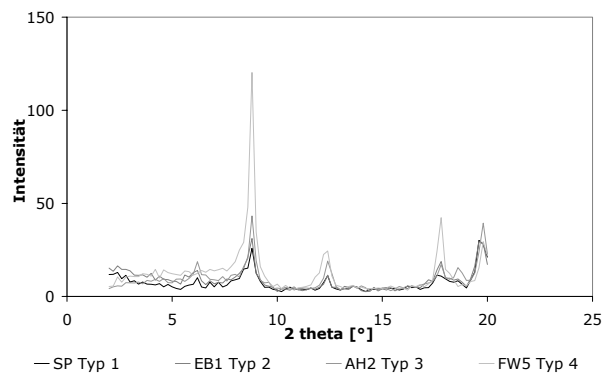


Abbildung XXVII Übersichtsaufnahmen Röt-Tonsteine von verschiedenen Lokalisationen, < 63 μm

## Anhang B – Bilder

### B.1 Aufschlussbilder

Beispiele für verschiedene halbfeste Tonsteine aus diversen stratigraphischen Positionen.



**Abbildung XXVII** Röt bei Deuna (DEU)



**Abbildung XXVIII** Röt bei Wiesenfeld (WF)



**Abbildung XXIX** Oberkarbon bei Witten  
(Photo Lempp)



**Abbildung XXX** Röt bei Karsdorf (KD) mit  
Gipsbändern



**Abbildung XXXI** Devon bei Hagen (Photo  
Lempp)



**Abbildung XXXII** Kreide bei Münster (Photo  
Lempp)





**Abbildung XXXIII** Opalinuston an der BAB 81 bei Tuningen (Photo Lempp)



**Abbildung XXXIV** Röt Höhefeld



**Abbildung XXXV** Röt Spielberg (SP)

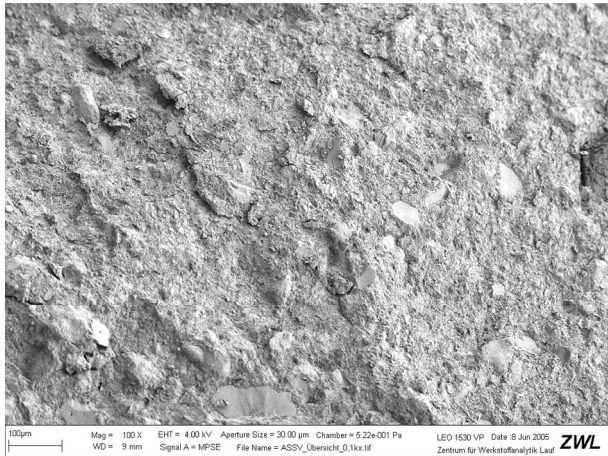


**Abbildung XXXVI** Röt bei Wüstenzell (WZ)

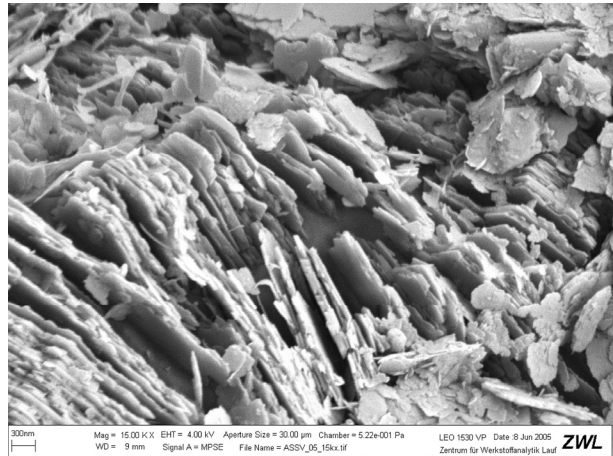


**Abbildung XXXVII** Opalinuston bei Essingen (ESS)

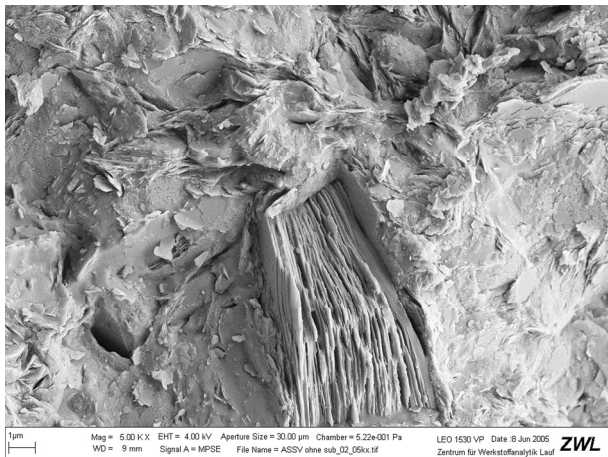
B.2 REM-Aufnahmen



**Abbildung XXXVIII** Tertiärton  
Übersichtsaufnahme



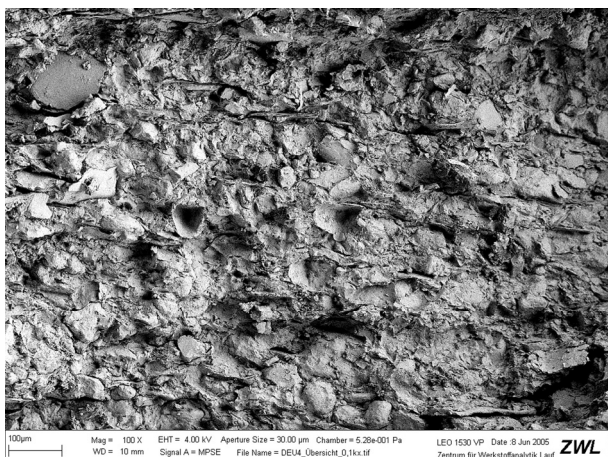
**Abbildung XXXIX** Parallele Kaolin-Kristalle  
im Tertiärton, aufgeweitete Struktur,  
Porenwasser im Hintergrund



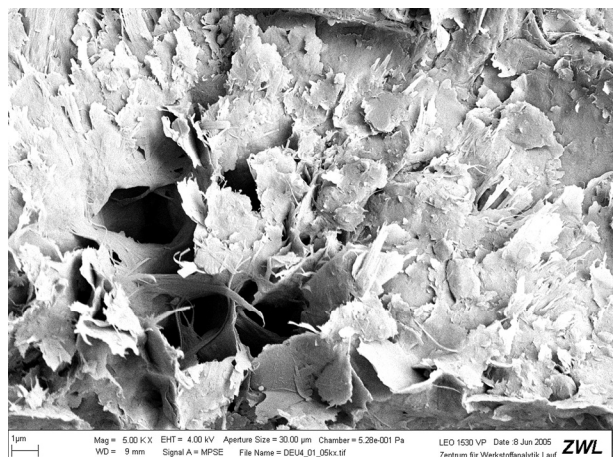
**Abbildung XL** Struktur des Tertiärtons, parallele  
Schichtstapel innerhalb der  
Kartenhausstruktur.



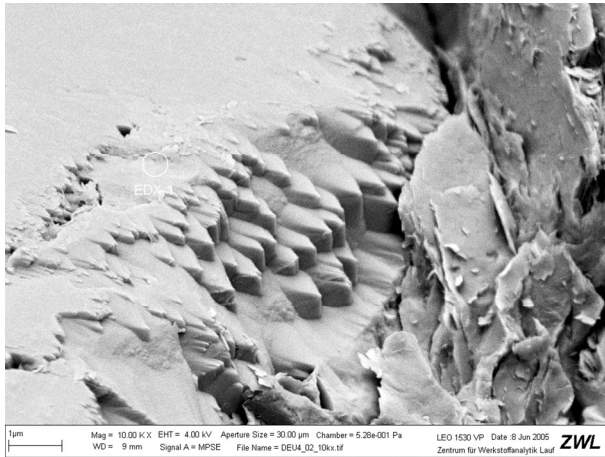
**Abbildung XLI** Verteilung des  
Porenwassers innerhalb der Tertiärton-  
Struktur



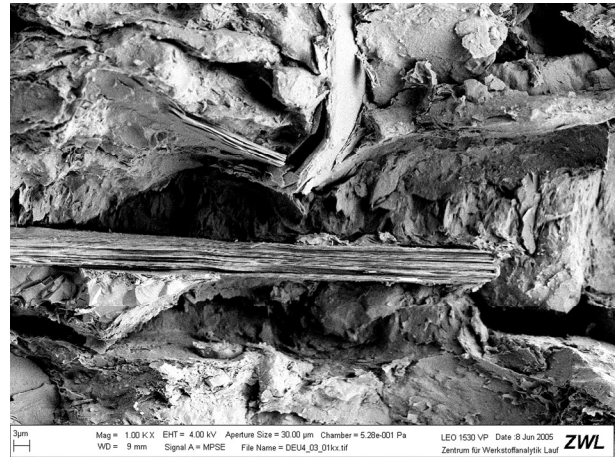
**Abbildung XLII** Röt-Tonstein Typ 1  
(DEU4) - Übersichtsaufnahme



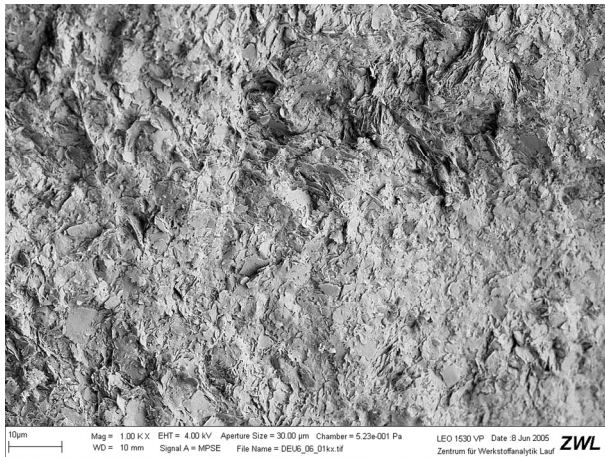
**Abbildung XLIII** Röt-Tonstein Typ 1  
(DEU4): sperrige Kartenhausstruktur



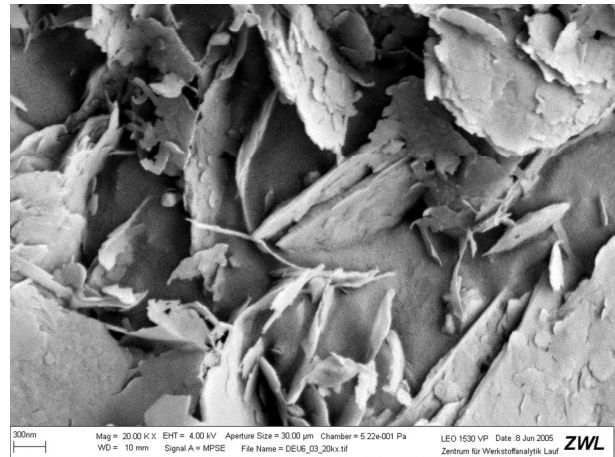
**Abbildung XLIV** Röt-Tonstein Typ 1  
(DEU4) – Anschnitt eines Feldspats mit  
Wasserüberzug, (Kryo-Aufnahme)



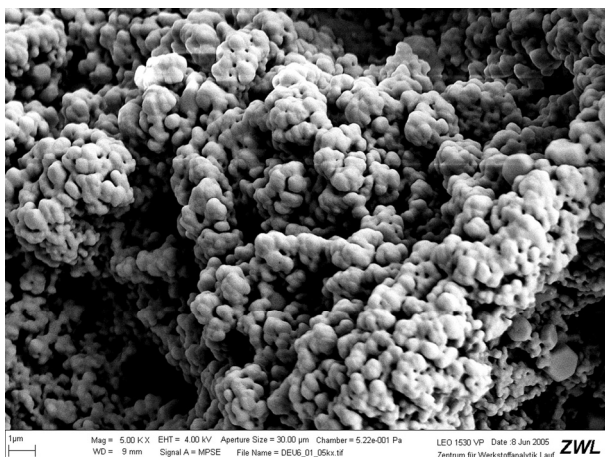
**Abbildung XLV** Röt-Tonstein Typ 1  
(DEU4): große parallel gelagerte Kaolinit-  
Blättchen innerhalb der chaotischen Struktur  
kleinkristalliner Illite



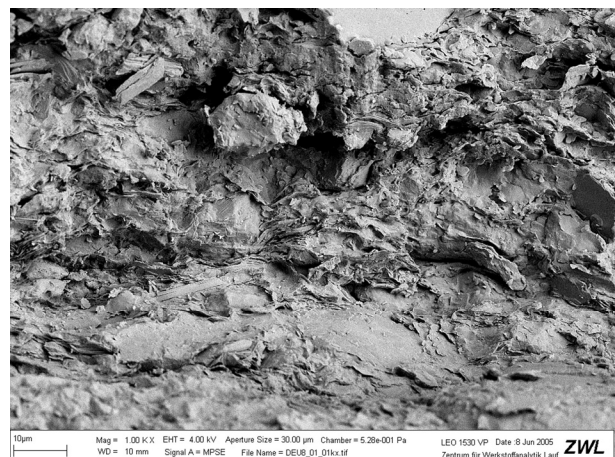
**Abbildung XLVI** Röt-Tonstein Typ 4  
(DEU6) – Übersichtsaufnahme



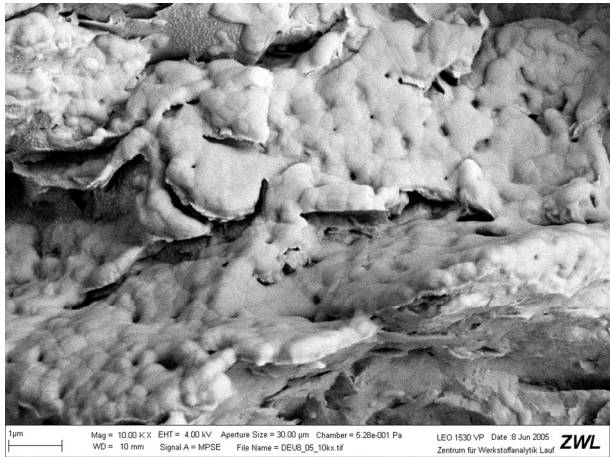
**Abbildung XLVII** Wassergefüllte Poren in  
einem Röt-Tonstein des Typs 4 (DEU6)



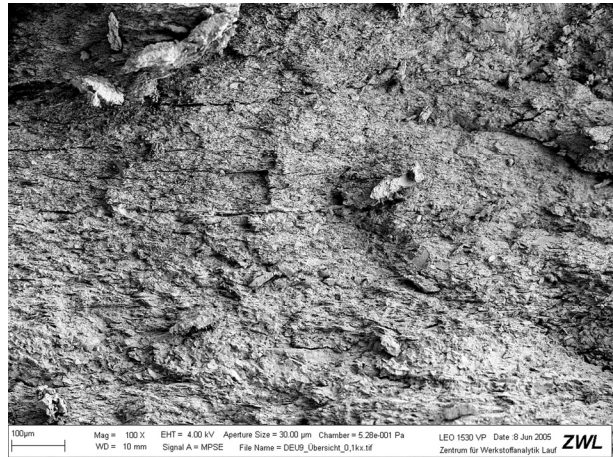
**Abbildung XLVIII** Kondenswasser in  
typischer Absonderungsform nach  
ungenügender Sublimation in einem Röt-  
Tonstein des Typs 4 (DEU6)



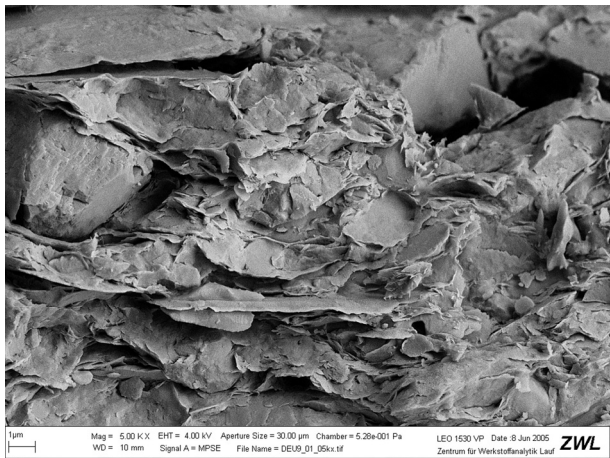
**Abbildung XLIX** Röt-Tonstein Typ 2  
(DEU8): „Umfließen“ von größeren Partikeln  
durch die Tonminerale



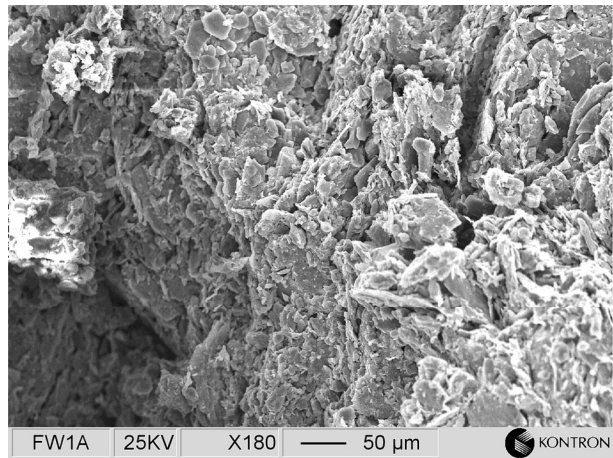
**Abbildung L** Wasserüberzug in einer Makropore im Röt-Tonstein Typ 2 (DEU8)



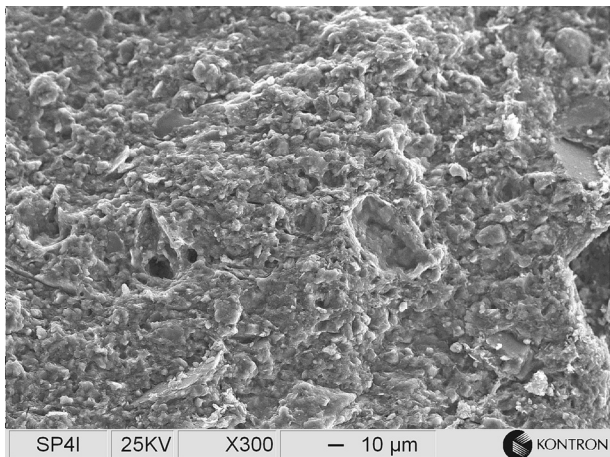
**Abbildung LI** Röt-Tonstein Typ 3 (DEU9) - Übersichtsaufnahme



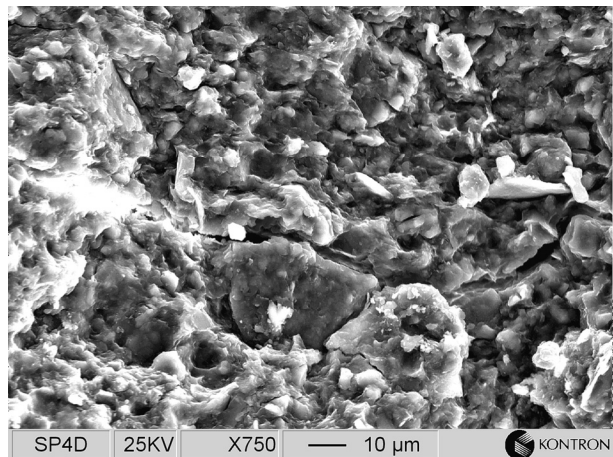
**Abbildung LIIR** Röt-Tonstein Typ 3 (DEU9)



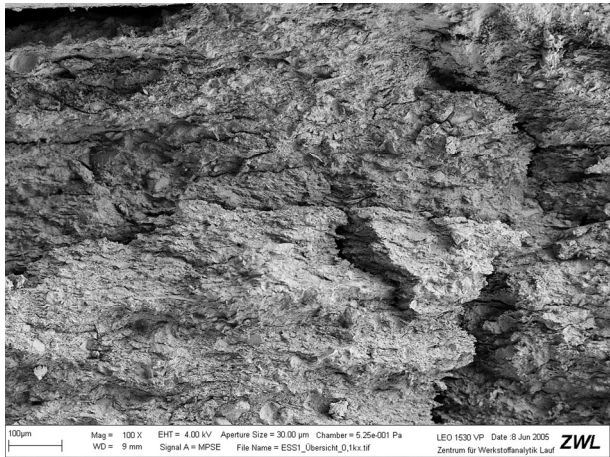
**Abbildung LIII** Röt-Tonstein Typ 4 (FW) - Übersichtsaufnahme der Struktur (ohne Kryo-Transfer)



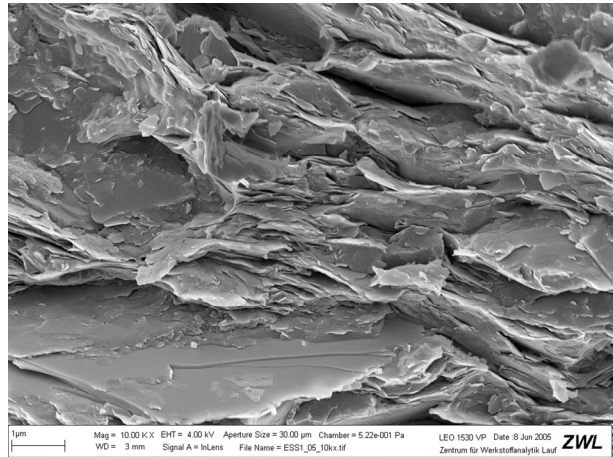
**Abbildung LIV** Röt-Tonstein Typ 1 (SP4) Übersichtsaufnahme der Struktur (ohne Kryo-Transfer)



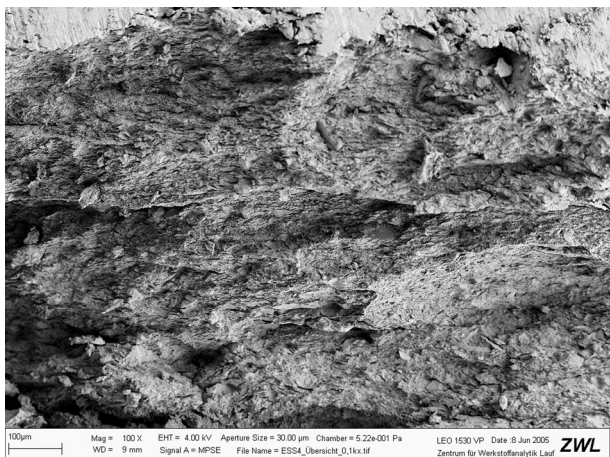
**Abbildung LV** Röt-Tonstein Typ 1 (SP4) Übersichtsaufnahme der Struktur (ohne Kryo-Transfer)



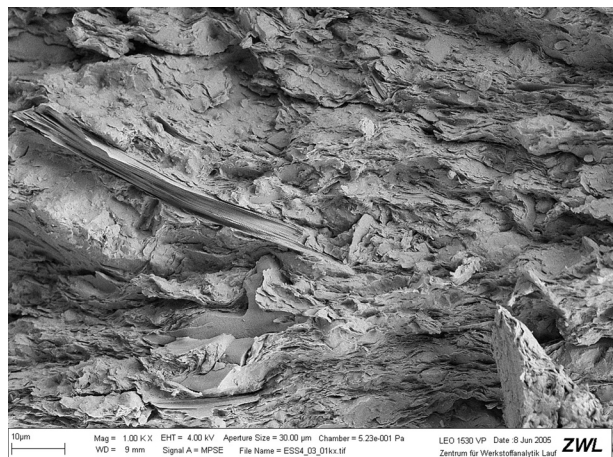
**Abbildung LVI** Opalinuston Typ 2 (ESS1)  
- Übersichtsaufnahme



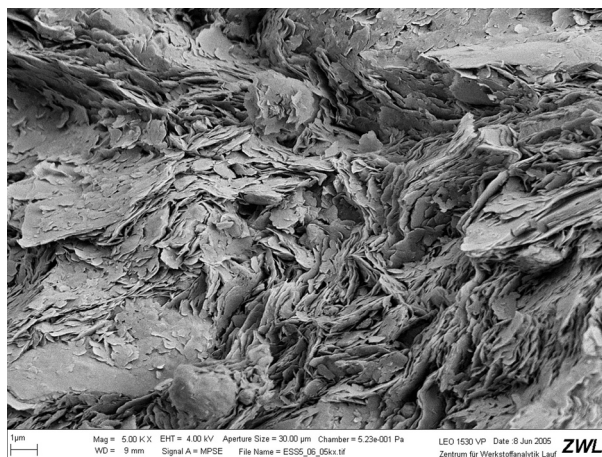
**Abbildung LVII** Opalinuston Typ 2  
(ESS1): wellige Anordnung der Tonblättchen



**Abbildung LVIII** Opalinuston Typ 3 (ESS4)  
- Übersichtsaufnahme der Struktur



**Abbildung LIX** Opalinuston Typ 3  
(ESS4): wellige Anordnung der Tonblättchen



**Abbildung LX** Opalinuston Typ 4 (ESS6): unregelmäßige Anordnung der Tonpartikel

---

Hiermit erkläre ich, dass ich die hier vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst sowie keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet und die wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Ich erkläre, die Angaben wahrheitsgemäß gemacht und die wissenschaftliche Arbeit an keiner anderen wissenschaftlichen Einrichtung zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht zu haben.

Carola Bönsch, Halle 15.12.2005

---

## Lebenslauf:

Name: Carola Bönsch  
26.10.1976 geboren in Halle / Saale

1983 - 1985 22. Polytechnische Oberschule „Klement Gottwald“ in Halle – Neustadt

1985 - 1991 5. POS „N.K. Krupskaja“ mit erweitertem Russischunterricht in Halle - Neustadt

1991 - 1995 Gymnasium am Reileck in Halle / Saale, Abitur

1995 - 2001 Studium der Geologie an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Diplom

2001 Tätigkeit in einem Drittmittelprojekt zur Charakterisierung eines Tonvorkommens in Bogen (Bayrische Dachziegel Bogen GmbH)

2001 - 2002 Graduiertenstipendium des Landes Sachsen-Anhalt zum Thema „Interaktionen von Wasser und wässrigen Lösungen mit Tonen – Auswirkungen auf Baugrund- und Hangstabilität, Rutsch-, Gleit- und Rheologieverhalten von Tonböden“

2002 - 2004 Wirtschaftswissenschaftlicher Zusatzstudiengang für Naturwissenschaftler und Ingenieure an der Fernuniversität Hagen (ohne Abschluss)

2002 - 2006 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Inst. f. Geol. Wiss. MLU Halle-Wittenberg, FG Ingenieurgeologie / Geotechnik