

Zeitschrift:	Bulletin für angewandte Geologie
Herausgeber:	Schweizerische Vereinigung der Petroleum-Geologen und –Ingenieure; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieur-Geologie
Band:	8 (2003)
Heft:	1
Artikel:	Interaktion zwischen Wasser und Tonen : wo liegen die Grenzen zwischen dem Modell der diagenetischen Bindungen und der reversiblen Konsolidierung?
Autor:	Bönsch, Carola / Lempp, Christof
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-224296

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 31.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Interaktion zwischen Wasser und Tonen – wo liegen die Grenzen zwischen dem Modell der diagenetischen Bindungen und der reversiblen Konsolidierung? Carola Bönsch¹, Christof Lempp¹

Stichworte: Röt, Ton, Tonstein, Verwitterung, physikalische Eigenschaften, diagenetische Bindung, reversible Konsolidierung

Zusammenfassung

Alles an Tonminerale gebundene und in Tonsedimenten enthaltene Wasser hat unterschiedliche Wirkung auf physiko-mechanische Eigenschaften von Tonen. Bei der Fassung in Gesetzmäßigkeiten mit speziellen geo- oder ingenieurwissenschaftlichen Ansätzen ist es bisher nur ansatzweise gelungen, die Fluid-Festsubstanz-Wechselwirkungen so umfassend zu beschreiben, dass beim Bau in Tonböden nicht immer noch überraschende Änderungen baurelevanter Eigenschaften eine Rolle spielen. Es wurden Röt-Tone mit ähnlicher Korngrößen- und Mineralzusammensetzung sowie einer vergleichbaren diagenetischen Entwicklung von verschiedenen Lokalitäten im Thüringer Becken untersucht. Die Tonsteine entsprechen verschiedensten Stadien der Verwitterungsabfolge, die in vier Typen klassifiziert wurden. Es wurden Untersuchungen durchgeführt, um direkte Ton-Wasser-Reaktionen abzubilden, z. B. Wasseraufnahmevermögen, Wasserrückhaltevermögen und Aggregatzerfall durch Wechsel von Austrocknung und Befeuchtung, außerdem wassergehaltsabhängige Versuche, z. B. die Bestimmung der Konsistenzgrenzen, und schließlich feststoffcharakterisierende Untersuchungen (z.B. Messung der spezifischen Oberfläche). Die erhaltenen Ergebnisse erscheinen z. T. noch nicht vollständig erklärbar. Sowohl bei spezifischer Oberfläche, als auch beim Wasseraufnahmevermögen nach Enslin-Neff tritt eine «kritische» Aggregatgröße auf, ab der sich das Verhalten des Materials grundlegend ändert. Einige der an Tonaggregaten beobachteten Phänomene lassen sich durch die Übertragung des Verwitterungsschemas aus dem Aufschlussmaßstab auf den Kleinstmaßstab erklären.

Abstract

All water which is either part of clay minerals or contained in clayey sediments has different effects on the physico-mechanical behaviour of clays. With the intention to establish rules on basic approaches of special geoscientific or engineering knowledge it has been only partially successful in describing sufficiently the interactions between fluids and grains. That is why sometimes surprising changes of soil behaviour during construction activity on clayey soils can occur which entail problems for these buildings. We examined some clay sediments of Roet age with similar grain size distribution, similar mineralogical composition and comparable diagenetic development. The Roet samples were taken from different places of the Thuringian Basin.

The pelitic rocks are exposed (to surface) and are corresponding to distinct stages of weathering sequences that were classified into 4 different types. Examinations were carried out in order to investigate the direct interaction between clay particles and water (e.g. water absorptive capacity, water retentivity and also the behaviour of rock disaggregation due to alternation by dehydration and moisturization as well as experiments that depend on the moisture content, i.e. Atterberg limits of consistency as well as investigations that may characterise the solid phase, e.g. measurement of the specific surface). The results appear not to be sufficient to explain completely the interaction of water and particles. Both in case of the specific surface and in case of the water absorptive capacity (according to Enslin-Neff) there seems to be a «critical» size of grain aggregates where the behaviour of the material changes basically. The transfer of the observations concerning the weathering scheme from outcrop scale to the smaller scale of the grain aggregates may be an explanation for some of the phenomena within the grain aggregates.

1. Einleitung

Alles an Tonminerale gebundene und in Tonsedimenten enthaltene Wasser hat unterschiedlichen Einfluss auf die physiko-mechanischen Eigenschaften dieser feinkör-

nigen Ablagerungen. Bei deren Quantifizierung und Fassung in Gesetzmäßigkeiten mit speziellen geo- oder ingenieurwissenschaftlichen Ansätzen ist es bisher nicht oder nur ansatzweise gelungen, die Fluid-Festsubstanz-Wechselwirkungen so umfassend zu

¹ Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut f. Geologische Wissenschaften und Geiseltalmuseum, Domstraße 5, D-06108 Halle/Saale, Email: boensch@geologie.uni-halle.de; lempf@geologie.uni-halle.de

beschreiben, dass beim Bauen in Tonböden nicht immer noch überraschende Änderungen baurelevanter Eigenschaften eine Rolle spielen. Ziel der Untersuchung soll deshalb sein, einen möglichst ganzheitlichen Ansatz und geeignete, im geotechnischen Alltag praktikable, Indexversuche für die Erfassung des Charakters der «Wasserbindungsstruktur» eines Tons zu finden, um das daraus resultierende Verhalten qualitativ und möglichst auch quantitativ abschätzen zu können. Erste Ergebnisse sollen am Beispiel von Röt-Tonen des Thüringer Beckens dargestellt werden.

Zunächst ist von Interesse, wie sich Wasser-Festsubstanz-Wechselwirkungen unterscheiden, wenn Tonsediment konsolidiert oder dekonsolidiert, be- oder entlastet bzw. auch ver- oder entfestigt wird. Es ist zu prüfen, wo das Modell der metastabilen diagenetischen Bindungen für Tonsedimente gilt, und sich Wasser-Ton-Reaktionen in Abhängigkeit von Spannungspfad und Zeitdauer der Einwirkungen gleichen oder qualitativ unterscheiden. Vier Tone gleichartiger Mineralogie, vergleichbaren geologischen Alters und unterschiedlicher Spannungsgeschichte werden beispielhaft einander gegenübergestellt. Neben Eigenschaften, die direkt die Ton-Wasser-Reaktion (Wasserrückhaltevermögen, Wasseraufnahmevermögen) widerspiegeln, sollen auch wassergehaltsabhängige Eigenschaften betrachtet werden, um an konkreten Beispielen zu diskutieren, welche Aspekte die Modellvorstellung diagenetischer Bindungen stützen und welche Eigenschaften mit der Konsolidierungstheorie angemessen zu erklären sind.

Geologisch gleichartige Tonsedimente zeigen trotz derselben mineralogischen Zusammensetzung und derselben primären Korngrößenverteilung ein unterschiedliches mechanisches Verhalten. Dieses wird im Verwitterungsprofil durch eine unterschiedlich starke Aggregation der Tonmineralpartikel, und damit in einer sekundären, größeren Aggregatgrößenverteilung sichtbar. Was die Gründe für die wechselnden mechanischen

Eigenschaften von überkonsolidierten Tonsedimenten und das gleichzeitige und benachbarte Auftreten unterschiedlich fester Varietäten desselben Tonsedimentes sind, ist dabei trotz intensiver Forschung in den letzten Jahrzehnten noch immer eine nahezu ungeklärte Frage (Schetelig & Becker 2001). Verschiedene Autoren versuchten sich unter unterschiedlichen Gesichtspunkten dem Problem zu nähern. So beschäftigte sich Pimentel (1996) mit dem Quellverhalten diagenetisch verfestigter Tonsteine, Gronemeier et al. (1985) bearbeiteten geochemische und mikrostrukturelle Veränderungen von Röttonen im Zuge der Verwitterung, Einsele & Lempp (1981) untersuchten die Ursachen der Entfestigung veränderlich fester pelitischer Gesteine. Diese Beispiele sollen belegen, dass die unterschiedlichen Untersuchungsansätze für das Verständnis noch nicht ausreichend sind.

2. Geologie und Petrographie

Es wurden Röt-Tone einer vergleichbaren stratigraphischen Position in verschiedenen Verwitterungszuständen von verschiedenen Lokalitäten im Thüringer Becken untersucht (siehe Fig. 1). Die Tonsteine repräsentieren verschiedenste Stadien der Verwitterungsabfolge, die in vier Typen (siehe Fig. 2) zusammengefasst wurden. Unter dem Begriff «Tonsteine Typ 1» sind Tonsteine zusammengefasst, 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 mit den Verwitterungsklassen W1 bis W2 zu verstehen. Dieses Material ist deutlich überkonsolidiert, enthält aber wenig weiche, normalkonsolidierte Matrix. Bei den Röt-Tonen des «Typs 3» handelt es sich um inhomogene Halbfestgesteine mit der Verwitterungsstufe W3 bis W4; härtere

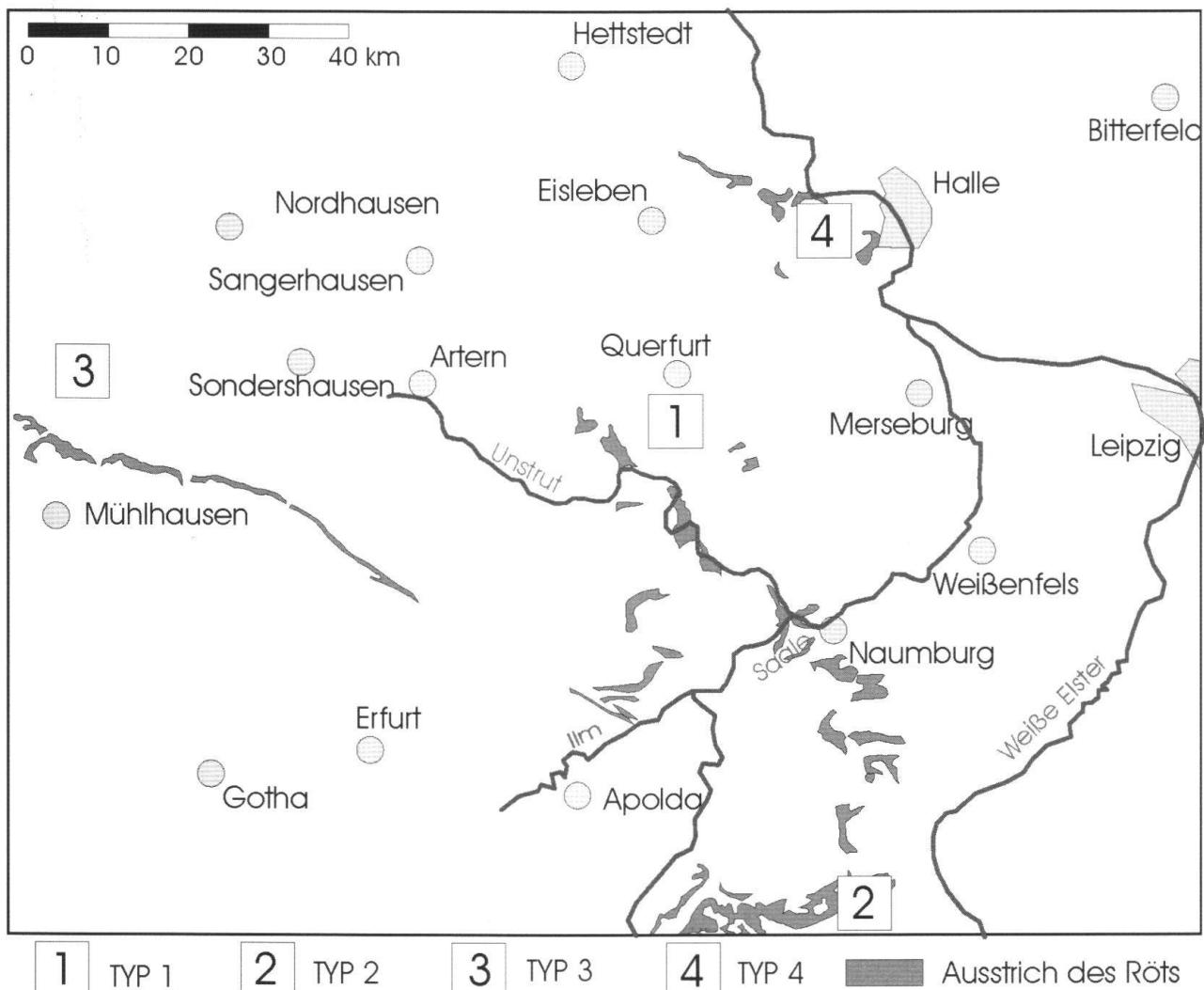


Fig. 1: Lage der Probenamelpunkte im Bereich des Thüringer Beckens und Ausstrich des Röts an der Oberfläche.

überkonsolidierte Bröckchen schwimmen dabei in einer mit fortschreitender Verwitterung anteilig zunehmenden, weichen, normalkonsolidierten Matrix. Bei den Tonen des «Typs 4» ist die Verwitterung (W5) so weit fortgeschritten, dass das Material wieder homogen als bindiges Lockermaterial in einem weichen, schneidbaren, anscheinend normalkonsolidierten Zustand vorliegt.

Die hier vorgelegten Untersuchungsergebnisse sind an Proben aus Spielberg (überwiegend Typ 1) in der Querfurter Mulde, aus Eisenberg nahe dem Hermsdorfer Kreuz der Bundesautobahnen A14 und A9 (überwiegend Typ 2), aus Deuna in den Bleicheröder Bergen (überwiegend Typ 3) und aus Angersdorf bei Halle (überwiegend Typ 4) ermittelt.

Trotz der überregionalen geographischen

Verbreitung sind die untersuchten Tone miteinander vergleichbar. Dies wird vor allem in der ähnlichen Korngrößenverteilung (Fig. 3) und der gleichartigen mineralogischen Zusammensetzung deutlich. Die Korngrößenverteilung wurde nach vorsichtiger Ultraschalldispersierung unter Zugabe von Natriumpyrophosphat als Antikoagulanz mittels Lasergranulometer bestimmt. Die Röt-Tone haben einen Anteil < 2 µm von 55 bis 75% und einen Anteil < 0,7 µm von 15 bis 25%, ihre Kornverteilungskurven verlaufen annähernd parallel. Proben des dekonsolidierten Typs 4 wiesen einen geringfügig höheren Schluffanteil auf.

Wie sich in mineralogischen Untersuchungen zeigte, wird der Tonmineralbestand in allen vier Typen deutlich von Illit dominiert, daneben kommt etwas Chlorit vor; als Nicht-

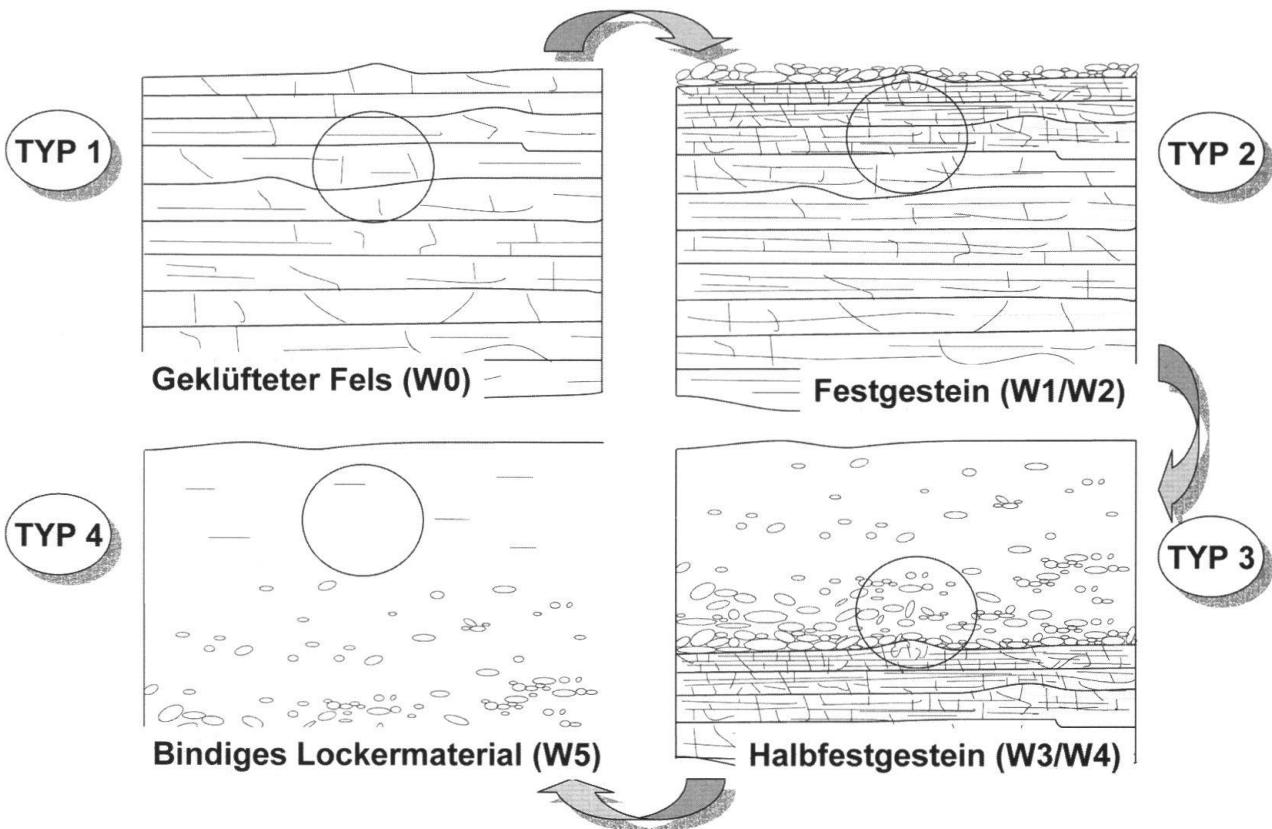


Fig. 2: Verwitterungsentwicklung von Tonsteinen. A) Typ 1: Geklüfteter Fels (W0), B) Typ 2: Festgestein (W1/W2), C) Typ 3: Halbfestgestein (W3/W4), D) Typ 4: Bindiges Lockermaterial (W5). (Verwitterungsklassen nach Einsele & Wallrauch. 1964).

tonminerale sind Quarz und Feldspat zu finden. Geringfügige Unterschiede in der Tonmineralzusammensetzung gehen auf den unterschiedlichen Verwitterungsgrad zurück.

Die aktuellen Eigenschaften eines Tonsteins werden zum einen durch die Eigenschaften des Ausgangsmaterials, wie Feststoff und beteiligte Fluide, und zum anderen durch die Rahmenparameter bei Sedimentation, Diagenese und Verwitterung, d. h. Temperatur, Druck und Zeit, beeinflusst. Die hier betrachteten 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 (Fig. 4). 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, also 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.

3. Untersuchungen der Verwitterungstypen des Röt-Tonsteines

3.1 Aggregate und Aggregatzerfall

Durch wiederholte Austrocknung und Wiederbefeuchtung findet ein zunehmender Zerfall der oben beschriebenen Tonsteinaggregate statt. Die dunkle Linie in Fig. 5 kennzeichnet exemplarisch den *in-situ* Zustand des Materials, welches nach einer vorsichtigen Trocknung bei 40°C mit geringem Energieeinsatz trocken gesiebt wurde.

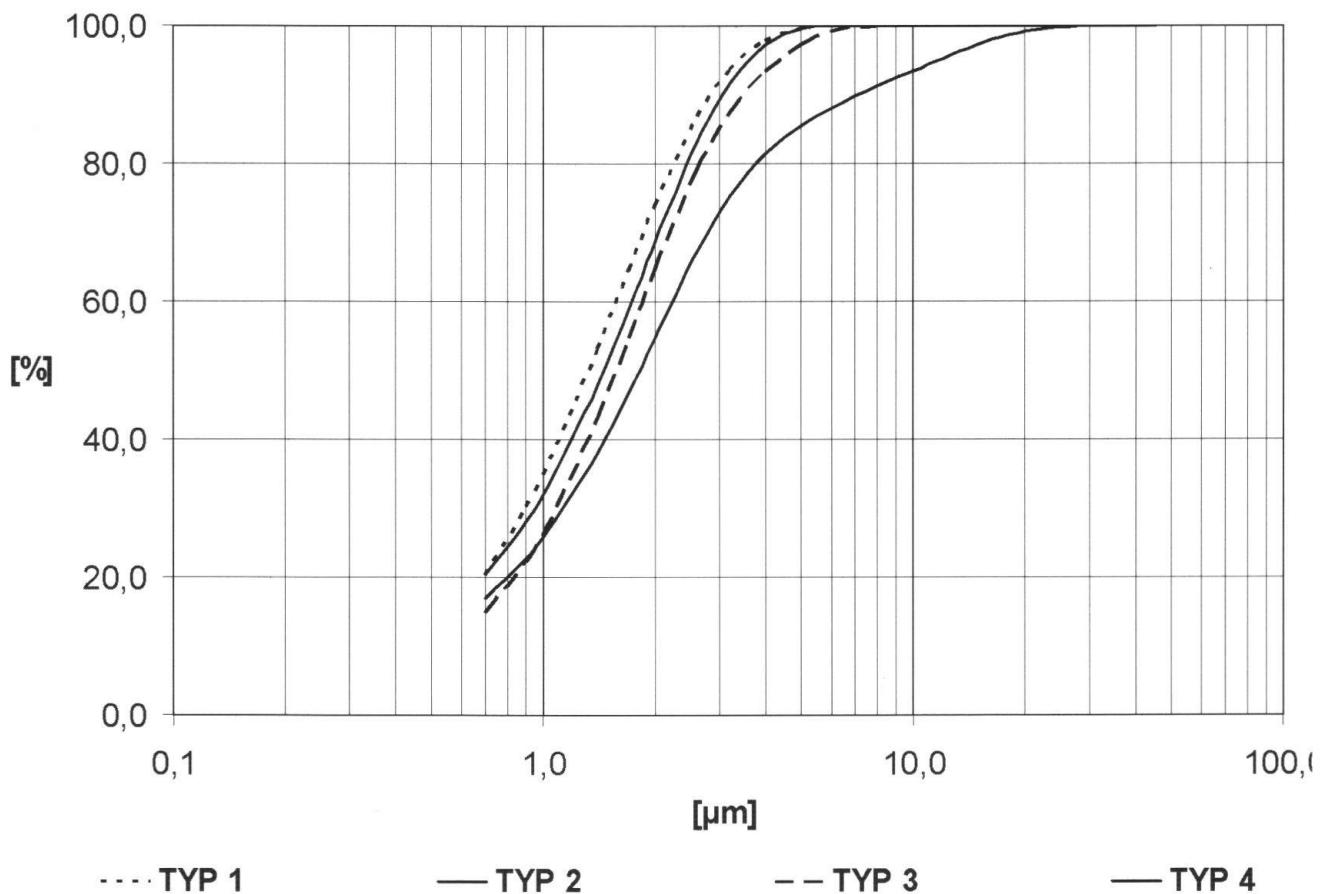


Fig. 3: Korngrößenverteilung, ermittelt mit einem Lasergranulometer nach vorsichtiger Ultraschalldispersierung unter Zugabe von Natriumpyrophosphat.

Anschließend wurde das Material einige Zeit unter Wasserbedeckung gebracht. Die bei der Siebung der im Wasser zerfallenen Proben erzeugten Kornfraktionen (0,063-0,125 mm, 0,125-0,25 mm, 0,25-0,5 mm, 0,5-1,0 mm, 1,0-2,0 mm, 2,0-4,0 mm und maximal 4,0-8,0 mm) wurden für die nachfolgenden Messungen verwendet. Wiederholt man die Trocknung und Wiederbefeuchtung, so setzt sich der Aggregatzerfall fort. Die Summenkurve der Aggregatgrößenverteilung verschiebt sich immer weiter in den feineren Bereich, wobei interessant ist, dass die Kurven einen annähernd parallelen Verlauf zeigen, der allmählich zur «primären» Korngrößenverteilung führt (siehe Fig. 5). Die «primäre» Korngrößenverteilung, das heißt die Korngrößenverteilung des tonigen Sedimentes, hat demnach auch in einem Tonstein einen Einfluss auf die Ausbildung des Trennflächengefüges, wie dies bei der Aggregation zum Ausdruck kommt und hier am Beispiel einer Probe des Typs 2 gezeigt wird.

3.2 Spezifische Oberfläche

Die spezifische Oberfläche des feinkörnigen Sedimentes wurde nach der BET-Methode (Brunauer et al. 1938) mit Hilfe von N_2 -Adsorption bestimmt. Als Analysegas wurde ein 30 Vol% – Stickstoff – 70 Vol%-Helium-Gemisch verwendet, wobei 1 ml adsorbierter Stickstoff bei einer Umgebungstemperatur von 27°C und einem Druck von 1 atm einer Oberfläche von $2,84 \text{ m}^2$ entspricht. Die «innere Oberfläche» der Probe wird aus den gemessenen Drücken und Gasvolumina berechnet. Die Bezeichnung «innere Oberfläche» wird im Folgenden vermieden, da sie gerade bei Anwendung auf Tone zu Missverständnissen führen könnte, weil in der Tonmineralogie die «innere Oberfläche» als die «Oberfläche in den Zwischenschichten» definiert ist, die mit der Stickstoffadsorption selbstverständlich nicht messbar ist. Hierfür müssten andere Methoden, z. B. die thermogravimetrische Bestimmung durch Einlage-

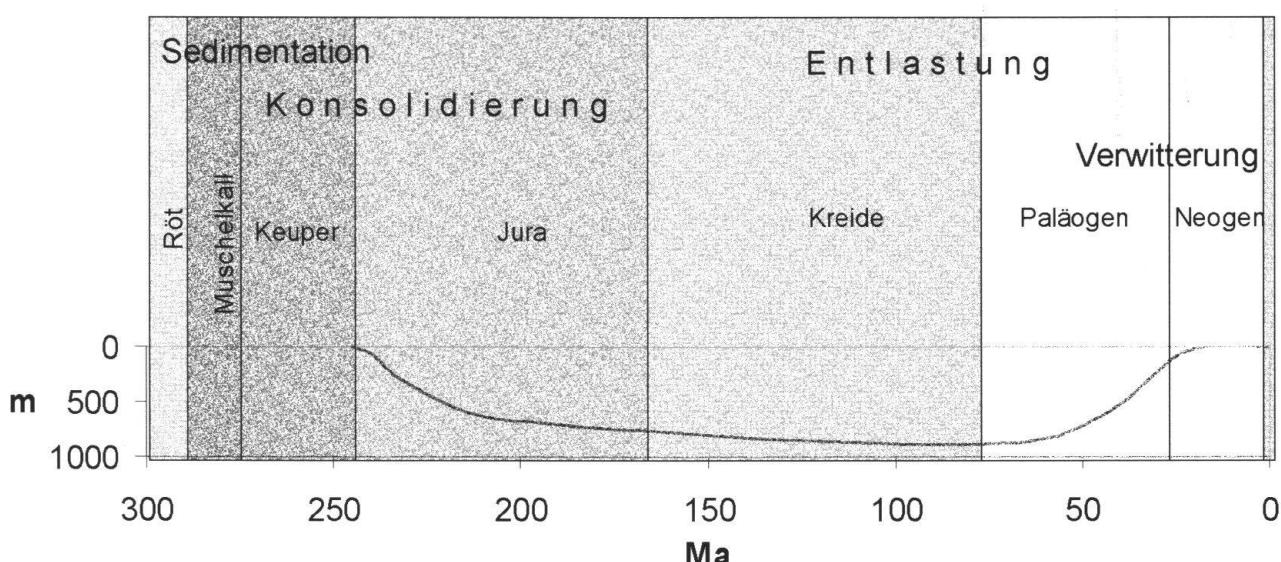


Fig. 4: Einflussfaktoren während des Be- und Entlastungspfades der Röt-Tone im Thüringer Becken.

rung von Glycerin (Madsen, 1977), herangezogen werden.

Zunächst sind einige theoretische Überlegungen zum Zusammenhang zwischen Aggregatgröße und spezifischer Oberfläche notwendig (Fig. 6): Nimmt man für ideale Kugeln eine Dichte von $2,6 \text{ g/cm}^3$ an, was in etwa der Korndichte der Röt-Tone entspricht, kann die spezifische Oberfläche in Abhängigkeit vom Kugeldurchmesser be-

rechnet werden. Im doppelt logarithmischen Diagramm ergibt sich ein linearer Zusammenhang von Korndurchmesser und spezifischer Oberfläche. Als Referenzmaterial wurde ein in den gleichen Fraktionen wie die Tonaggregate gesiebter Quarz-Feldspat-Sand gemessen. Auch hier wird ein linearer Zusammenhang zwischen Korndurchmesser und berechneter spezifischer Oberfläche deutlich. Die Tonaggregate der Typen 1 bis 3

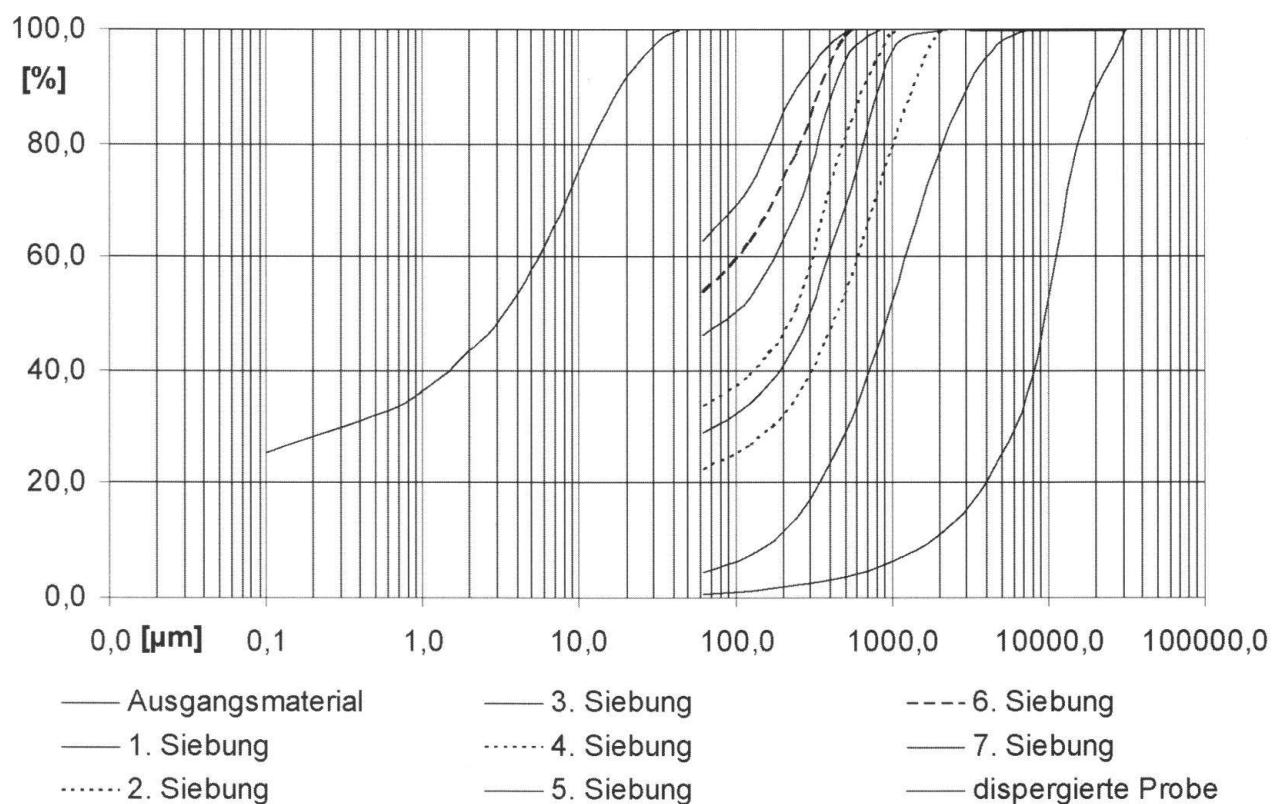


Fig. 5: Aggregaterfall nach mehreren Trocknungs-Befeuchtungs-Zyklen am Beispiel einer Probe des Verwitterungstyps 2.

verhalten sich jedoch deutlich anders. Es können nur die aggregatführenden Typen betrachtet werden. Die Abhängigkeit zwischen Aggregatgröße und Oberfläche ist in Fig. 7 als halblogarithmisches Diagramm dargestellt. Typ 1 und 2 zeigen bis zu einer Aggregatgröße von 0,25 mm eine mit der Aggregatgröße ansteigende Oberfläche. Bei Typ 1 erfolgt dann ein deutlicher Abfall der

Oberflächengröße bei größeren Aggregaten, während Typ 2 eine quasi gleich bleibende spezifische Oberfläche aufweist, die unabhängig von der Aggregatgröße ist. Typ 3 zeigt andererseits einen linearen Anstieg der spezifischen Oberfläche mit größer werden den Aggregaten, was den theoretischen Ausgangsüberlegungen widerspricht.

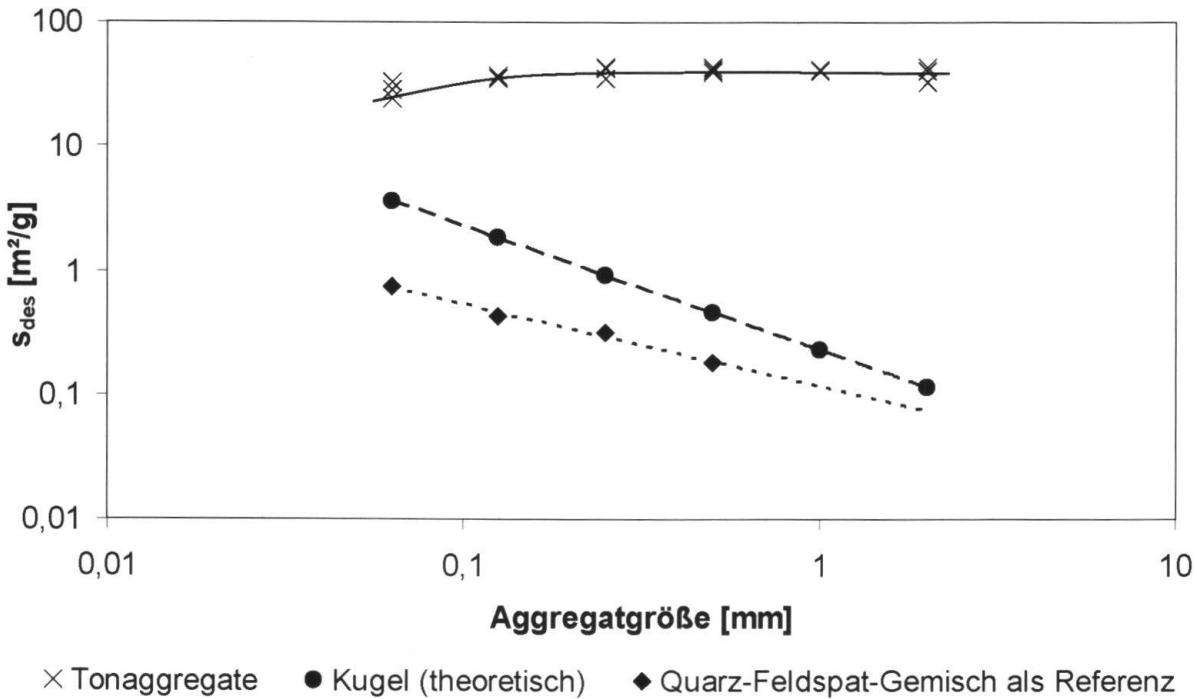


Fig. 6: Änderung der spezifischen Oberfläche mit der Aggregatgröße. Gemessen: Tonaggregate und Quarz-Feldspatgemisch. Berechnet: Ideale Kugeln.

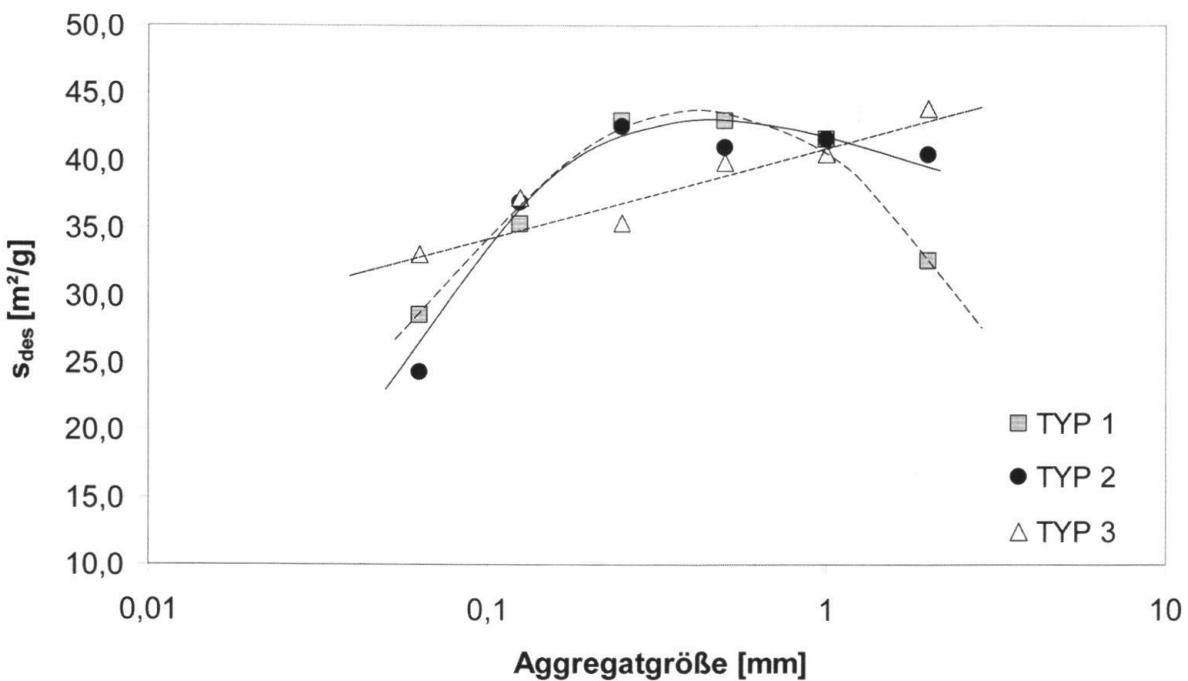


Fig. 7: Änderung der spezifischen Oberfläche ihrer Tonaggregate mit der Aggregatgröße.

Dieses Phänomen könnte erklärt werden, wenn man das Verwitterungsschema im Sinne von Einsele & Wallrauch (1964) (Fig. 2) auf den Maßstab der Aggregate überträgt. Es findet dementsprechend eine allmähliche Verwitterung der Aggregate von außen nach innen statt, wobei die äußere aufgelockerte Schicht eine erhöhte Porosität erhält. Große Aggregate haben eine größere Oberfläche als kleinere wegen der unterschiedlichen Verhältnisse zwischen «festem Kern» und entfestigter, weil pulvormig zerkleinerter Hülle (Fig. 8).

3.3 Wasseraufnahme

Das Wasseraufnahmevermögen wurde nach dem Verfahren nach Enslin/Neff (Neff 1959) in Anlehnung an die DIN 18132 durchgeführt. Es wäre theoretisch zu erwarten, dass sich das Wasseraufnahmevermögen wie auch die spezifische Oberfläche mit zunehmender Aggregatgröße verringern. So wird es aus den theoretischen Berechnungen für ideale Kugeln und am «Referenzsand» deutlich (Fig. 9A). Hinsichtlich des Wasseraufnahmevermögens lässt sich diese theoretische Überlegung auf das Probenmaterial übertragen, wenn auch nicht der rechnerisch erwartete lineare Zusammenhang vorhanden ist, sondern das Wasseraufnahmevermögen ab einer «kritischen» Korngröße extrem abnimmt. Der Referenzsand zeigt diesen Trend tendenziell auch, deshalb sollte bei der Diskussion dieser Ergebnisse nicht außer Acht gelassen werden, dass das Versuchsgerät ursprünglich für die Messung von Pulvern konzipiert wurde und dass damit der kapillaren Wasseraufnahme durch die sehr geringen Auflageflächen der unregelmäßigen Aggregate ab einer gewissen Größe Grenzen gesetzt sind. Es ist anzunehmen, dass bei der Wasseraufnahme durch kapillaren Anstieg auch die ungesättigte Wasserleitfähigkeit und elektrische Potentiale innerhalb der einzelnen Aggregate eine größere Rolle spielen, als bei der Untersuchung von Pulvern. Um diese Frage zu klä-

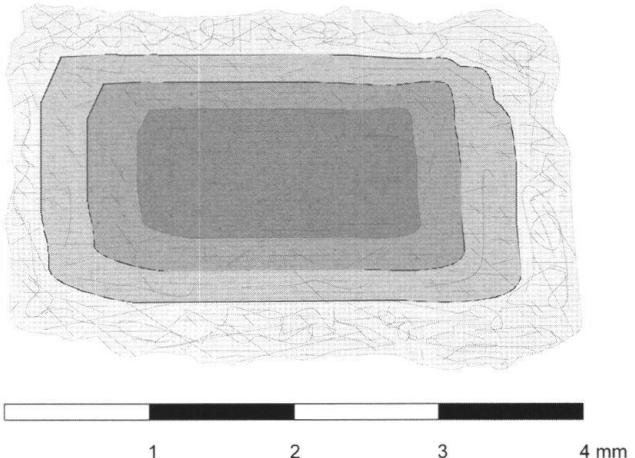


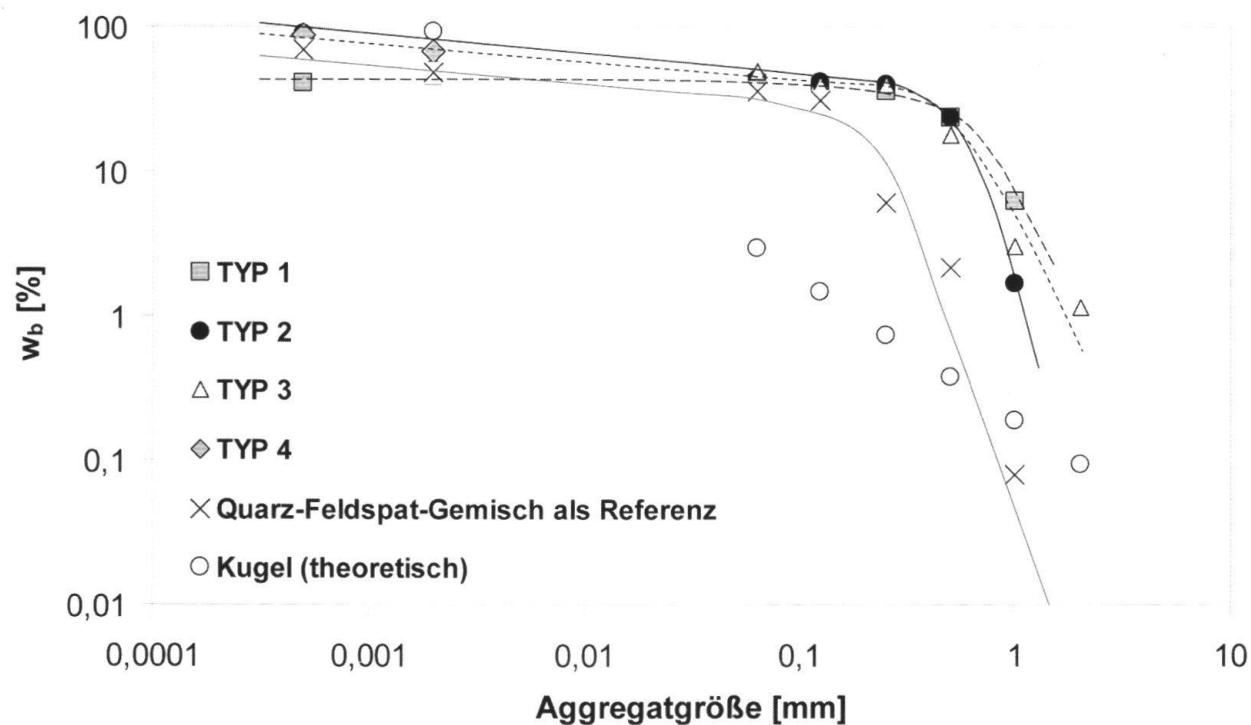
Fig. 8: «Bröckchenzerfall»: Die Röt-Tonstein-Verwitterung folgt im kleinen Maßstab dem für den Maßstab des Profilaufschlusses aufgestellten Prinzip von Einsele & Wallrauch (1964).

ren, werden derzeit Langzeitversuche mit einer Verdunstungskorrektur durchgeführt (in Anlehnung an die Versuche von Kugler et al. 2002). Diese Ergebnisse liegen allerdings zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vollständig vor.

Auch bei der Siebreihe der Trocknungs-Befeuchtungszyklen wird deutlich, dass das Wasseraufnahmevermögen von den gröberen zu den feineren Aggregaten hin zunimmt (Fig. 9B). Bei den Fraktionen $> 1000 \mu\text{m}$ und $> 500 \mu\text{m}$ wird deutlich, dass das Wasseraufnahmevermögen der verbliebenen gröberen Aggregate mit jedem Siebgang abnimmt. Für die feineren Aggregate lässt sich kein eindeutiger Trend bestimmen, die Werte für das Wasseraufnahmevermögen sind im Rahmen der Analysegenauigkeit für alle Trocknungs-Befeuchtungszyklen gleich bleibend. Unterzieht man die Messwerte einer statistischen Analyse so erhält man mit einer Gaußschen Anpassung die besten Ergebnisse, das heißt die Werte sind statistisch normal verteilt. Dass sich die Aggregate $> 500 \mu\text{m}$ anders verhalten, als die Feineren wurde bereits bei der Spezifischen Oberfläche beobachtet, so dass sich die Frage stellt, ob eine «kritische Aggregatgröße» tatsächlich existiert.

Die Wasseraufnahme sollte jedoch auch mit der spezifischen Oberfläche korrelieren: Je mehr Oberfläche zur Verfügung steht, desto

A



B

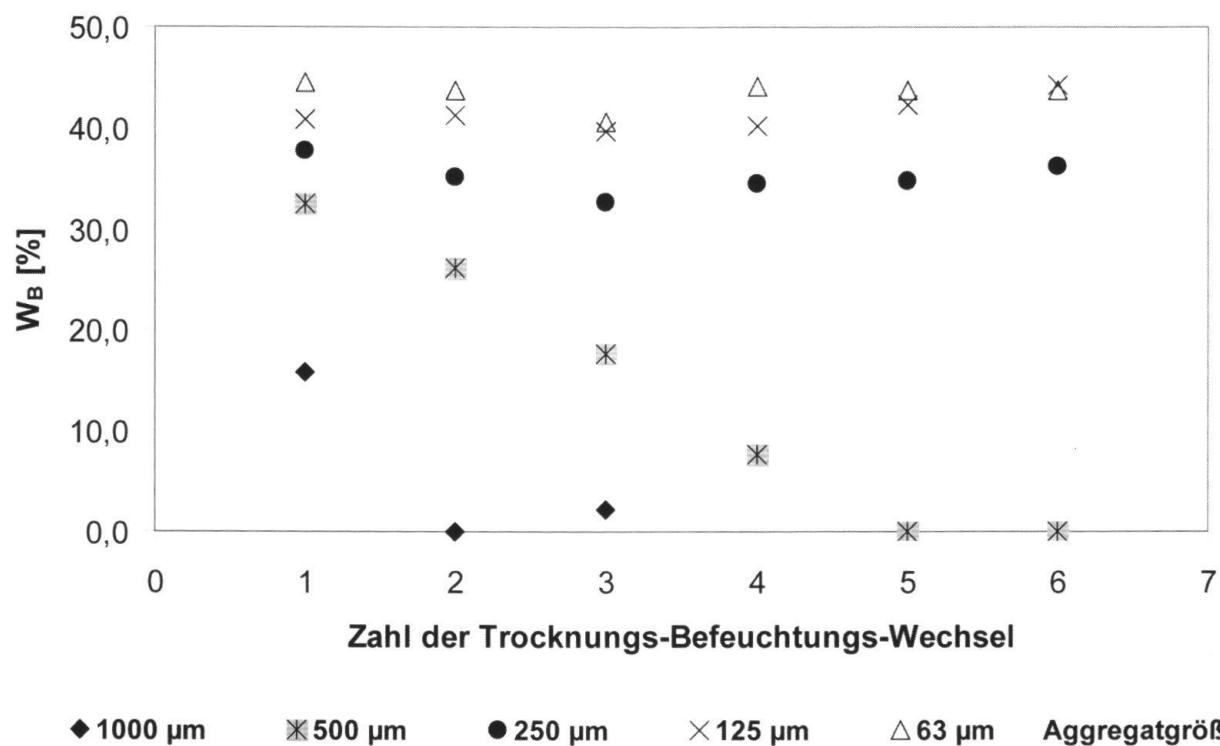


Fig. 9: Wasseraufnahmevermögen nach Enslin/Neff in Abhängigkeit von der Aggregatgröße; A) Typen 1 bis 4; B) Aggregate einer Probe des Typs 2 nach wiederholten Trocknungs-Befeuchtungszyklen (1. bis 6. Wiederholung).

mehr Wasser kann theoretisch daran gebunden werden. Wie jedoch in Fig. 10 erkennbar wird, steigt das Wasseraufnahmevermögen trotz gleich bleibender bzw. sich sogar verringriger spezifischer Oberfläche. Die Wasseraufnahme der stärker verwitterten Proben liegt etwas höher, was mit der erhöhten Porosität der Aggregate als Folge von Auflockerung oder Mikrorissbildung durch Verwitterung erklärbar ist. Betrachtet man die Messungen an entsprechenden Pulverproben, die durch vorsichtige Zerkleinerung der Aggregate im Handmörser gewonnen wurden, stellt sich das Verhältnis von spezifischer Oberfläche zum Wasseraufnahmevermögen in zwei «Clustern» dar, innerhalb derer ein erhöhtes Wasseraufnahmevermögen auch mit einer größeren spezifischen Oberfläche einhergeht (Fig. 11). Die Streuung der Werte ist jedoch sehr hoch, was zum einen in der geringen Messgenauigkeit des Enslin-Versuchs und zum anderen in der Empfindlichkeit der Oberflächenmessung auf Korngrößenverteilung (auf Grund der

geringen Probenmengen) begründet sein dürfte.

3.4 Saugspannung

Die Saugspannung wird in der Regel als pF-Wert [$\lg \text{mbar}$] 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 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).

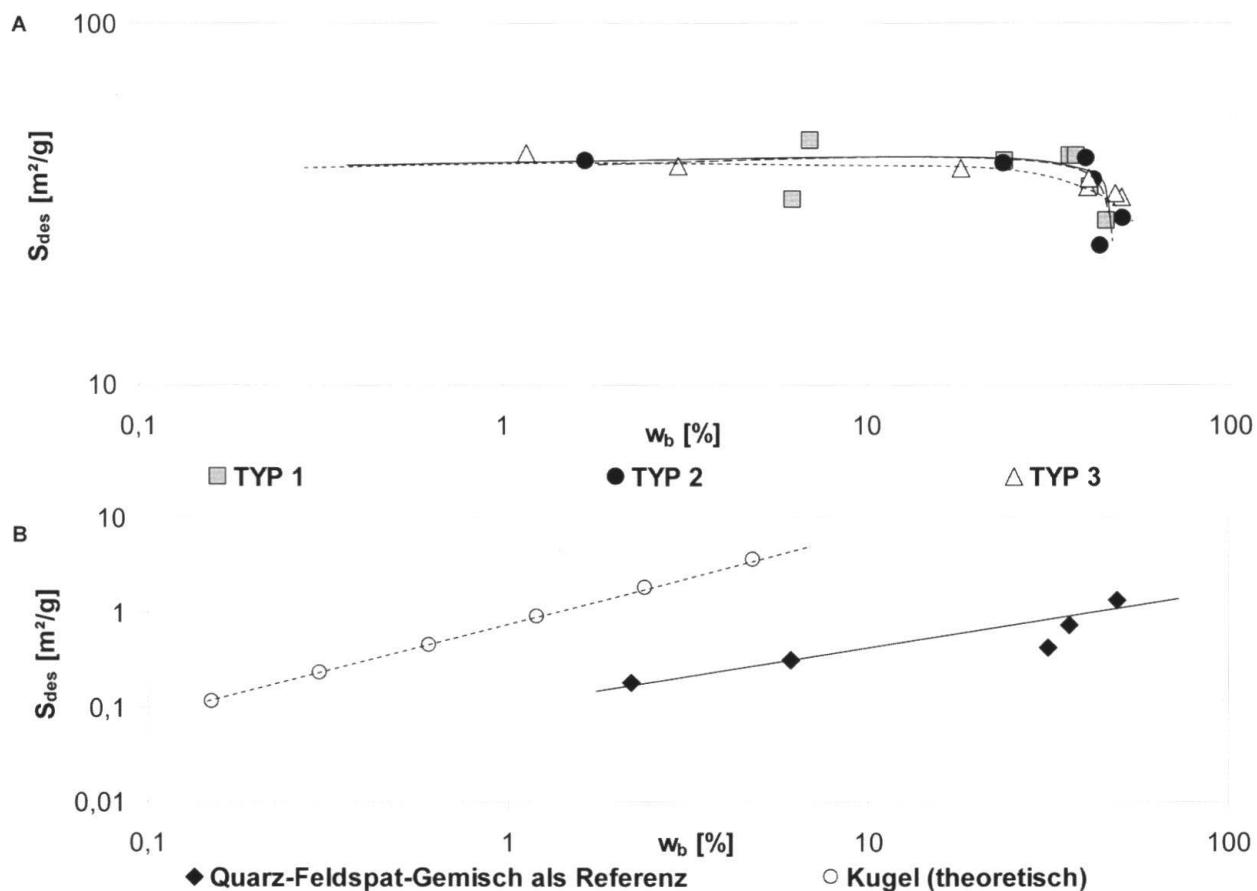


Fig. 10: Wasseraufnahmevermögen in Relation zur spezifischen Oberfläche; A) Ton-Aggregate der Typen 1 bis 3, B) Quarz-Feldspat-Gemisch und theoretische Berechnung für ideale Kugel.

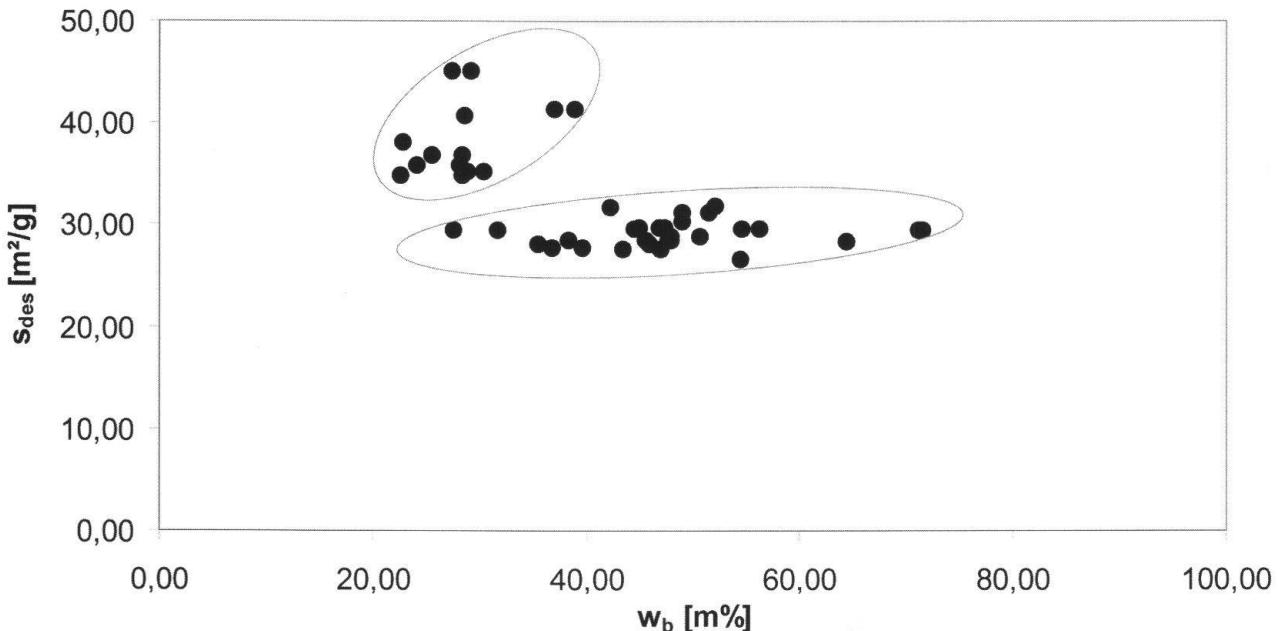


Fig. 11: Wasseraufnahmevermögen in Relation zur spezifischen Oberfläche (vorsichtig zerkleinerte Gesamtproben).

In Böden vorhandenes Wasser kann unterschieden werden in freibewegliches Sickerwasser und in Haftwasser, das an die festen Bodenpartikel gebunden ist. Das Haftwasser ist verschieden stark an die Bodenmatrix gebunden. So werden die Bindungskräfte für Kapillarwasser nur mit 0,02 bis 1,5 mbar und für Adsorptionswasser mit 245 bis 590 mbar angegeben (Walzenbach 1991). Die Wasserbindungsintensität kann als Arbeit ausgedrückt werden, die verrichtet werden muss, um dem Boden eine bestimmte Wassermenge zu entziehen. Die Wasserbindungsintensität wird auch als Wasserspannung bzw. Saugspannung bezeichnet und nach Schofield (1935) als Logarithmus einer der Wasserspannung äquivalenten Wassersäule [cm] ausgedrückt. Die Saugspannung eines Bodens ist gleich Null, wenn dieser vollständig gesättigt ist. Im Potentialkonzept von Scheffer & Schachtschnabel (1984) ist die Summe aller für die Bewegung des Wassers im Boden verantwortlichen Kräfte zusammengefasst. 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.

Wenn keine Wasserbewegung im Boden stattfindet, wenn also Matrixpotential und Gravitationspotential gleich groß sind, dann ist die Saugspannung eines Bodens umso größer, je größer die Entfernung von der Grundwasseroberfläche ist. Daraus erklärt sich auch ein Einfluss der Höhe der verwendeten Probenringe auf die Saugspannungsmessung, wo sich im Stechzylinder eine Wassersäule einstellt (Schlichting et al. 1995). Demnach müsste mit einer theoretischen Probenhöhe von Null gearbeitet werden. Man kann diesen Fehler bei $pF > 1,5$ vernachlässigen, da er hier nur sehr gering zum Tragen kommt.

Die hydraulische Leitfähigkeit im ungesättigten Bereich 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.

Die Röt-Tone vom Typ 1 bis 3 verhalten sich in ihrem Wasserrückhaltemögen sehr ähnlich. Die pF -Kurven haben zunächst einen

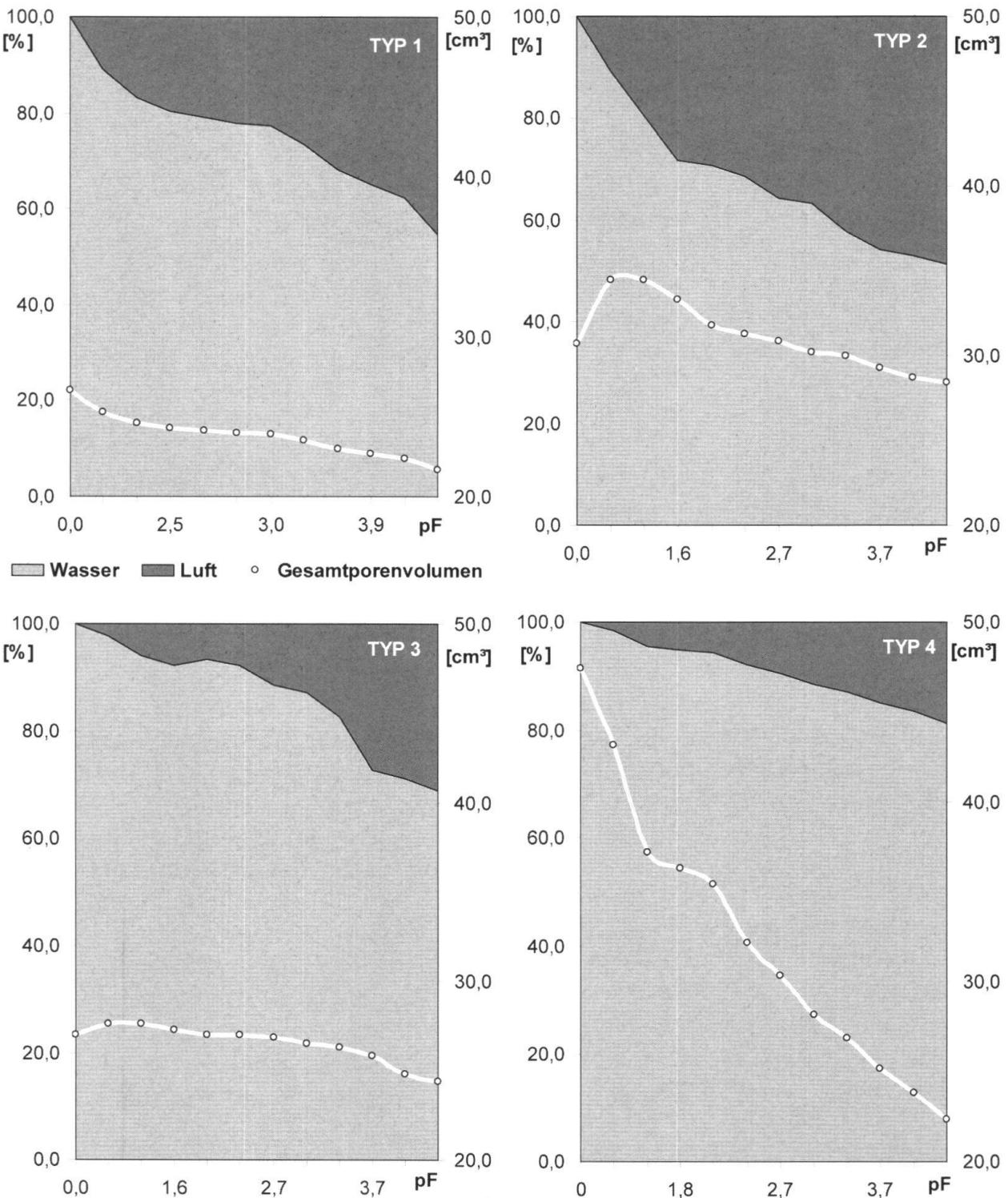


Fig. 12: Veränderungen der Porenraumverteilung während des Saugspannungsversuchs in der Druckmembranzelle.

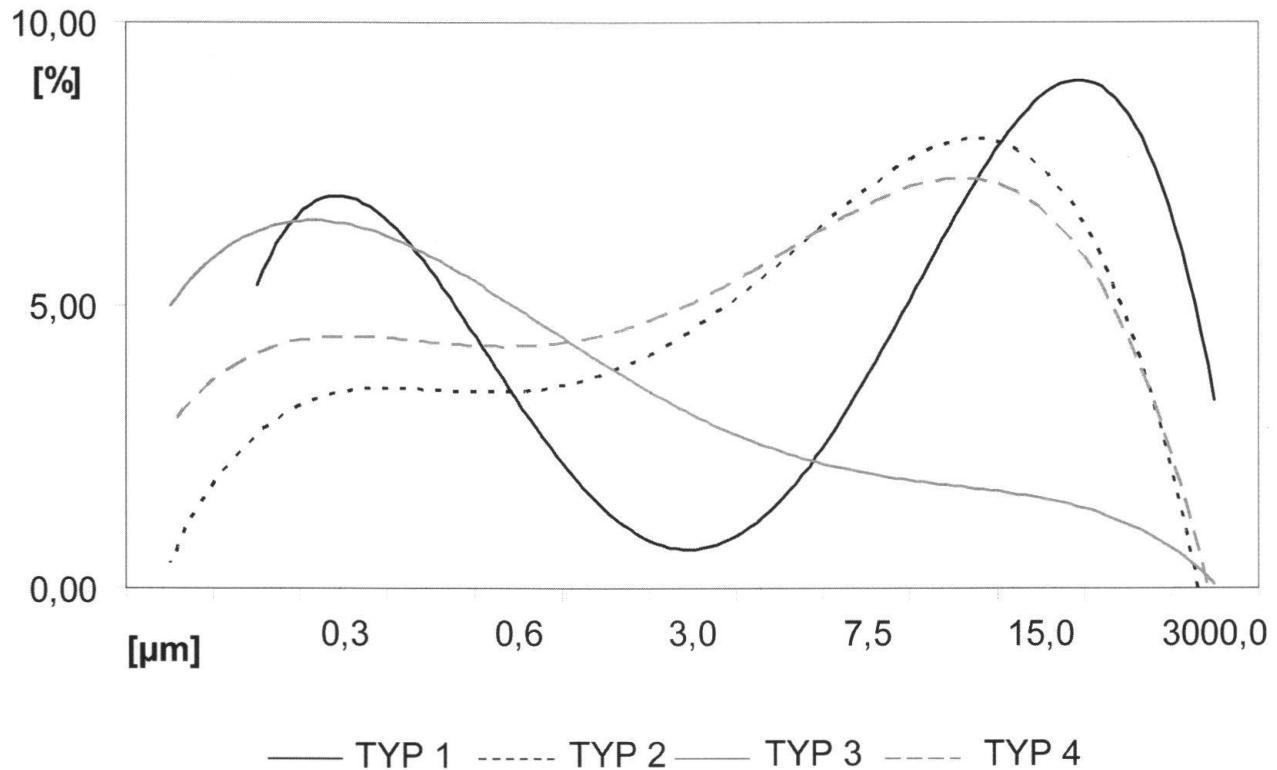


Fig. 13: Errechnete Porenradienverteilung in den vier Verwitterungstypen.

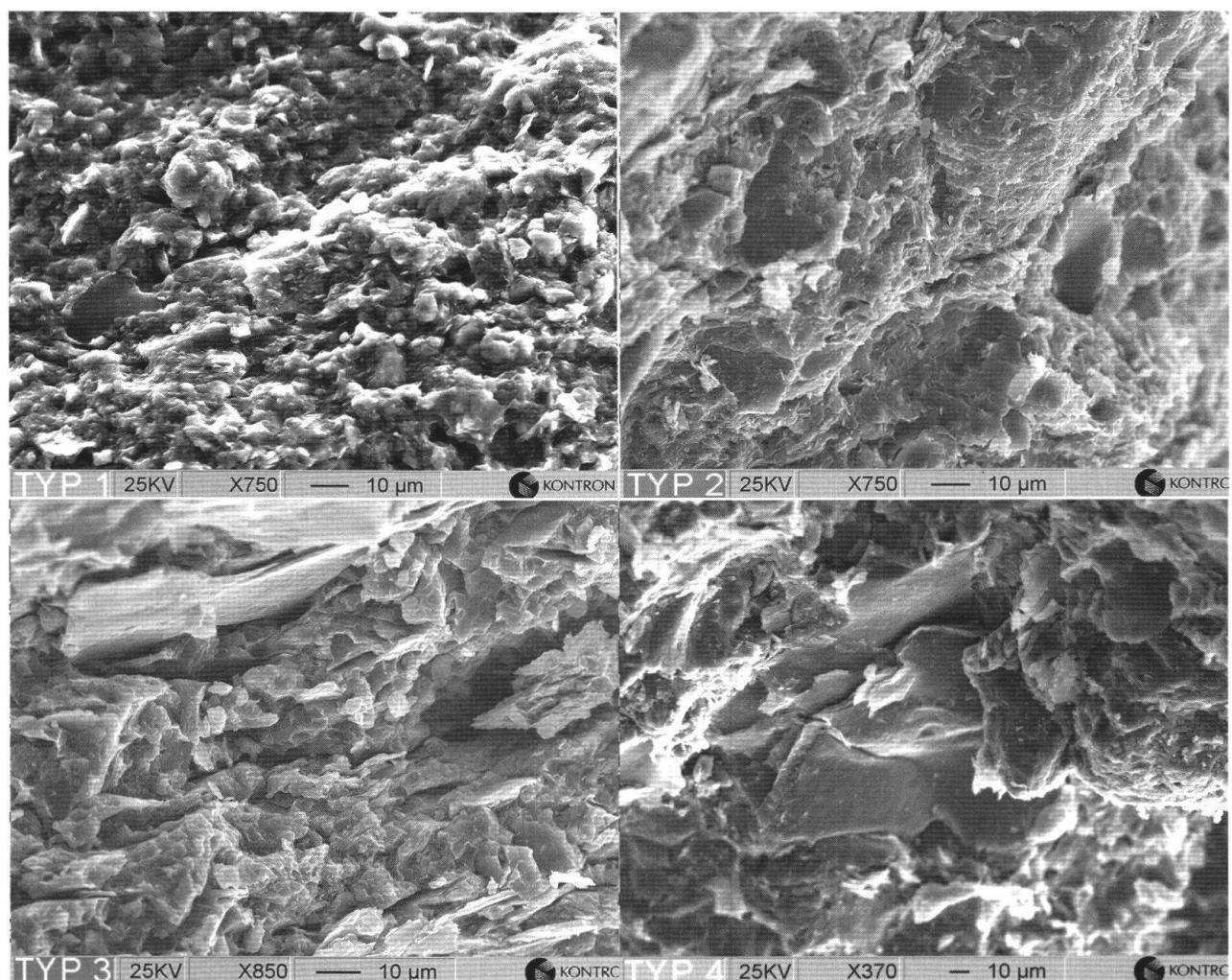


Fig. 14: REM-Aufnahmen des Porenraumes der vier Verwitterungstypen der Röt-Tone.

ehler flachen Verlauf und beginnen mit einem vergleichsweise geringen Sättigungswassergehalt. Typ 4 zeigt einen steileren Verlauf der pF-Kurve, d. h. eine Erhöhung des Druckes wirkt sich stärker auf den Wassergehalt aus. Die zu beobachtende konvexe (nach oben gewölbte) Form der Kurven ist für Tone typisch. Je verwitterter das Material, um so mehr ist es in der Lage Wasser zurückzuhalten.

Da das Wasser eine Dichte von ca. 1 g/cm^3 hat, kann aus der Wassermenge, die eine Probe unter definierter Saugspannung enthält, auf das Porenvolumen geschlossen werden, wenn man eine kreisrunde Form der Poren mit Äquivalentdurchmesser voraussetzt. Dieses so ermittelte Porenvolumen entspricht nicht dem Gesamtporenvolume, es repräsentiert den Bereich eines oberen und eines unteren Grenzdurchmessers (Schlichting et al. 1995), der durch die entsprechend angelegte Wasserspannung bestimmt ist. Die berechnete Porenradienverteilung (Fig. 13) stimmt mit dem Befund der Rasterelektronenmikroskopbilder (Fig. 14) gut überein. Typ 1 hat eine deutliche bimodale Porenraumverteilung, mit einem Maximum im Grobporenbereich, was die aufgeweiteten Zwischenräume zwischen den Aggregaten darstellt und einem Maximum im Bereich 0,3 bis 0,6 μm , was den Porenraum innerhalb der Aggregate repräsentiert. Auch bei den Typen 2 und 3 ist die Porenradienverteilung noch bimodal, jedoch werden die beiden Maxima mit zunehmender Verwitterung durch das Auftreten von Poren im mesoskaligen Bereich

verwischen. Typ 4 enthält nur noch untergeordnet Grobporen und ein deutliches Maximum im Feinstporenbereich. In den Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen (Fig. 14) wird auch der geringere Feinporenanteil der Typen 2 und 3 im Vergleich zu den Typen 1 und 4 deutlich.

Die Volumenschrumpfung mit zunehmender Saugspannung während des Versuches entspricht einer Verringerung des vorhandenen Porenraumes, wie in den Diagrammen in Fig. 12 gezeigt. Dieser verbleibende Porenraum wird 100% gesetzt (Flächendiagramm) und es wird in unterschiedlichen Grautönen die Verteilung von luft- beziehungsweise wassergefülltem Porenraum aufgezeigt, die aus den Gleichgewichtswassergehalten, der Korndichte und der Dichte des Wassers berechenbar ist. Bei stärker verwitterten Proben ist der Luftporenanteil geringer, dafür findet ein regelrechter Kollaps der Porenstruktur bei zunehmender Wasserspannung statt.

3.5 Konsistenzgrenzen

Die Konsistenzgrenzen wurden nach DIN 18122 Teil 1 bestimmt. Dafür wurden die Tonsteine mit Wasser versetzt und nach einer mehrtägigen Einwirkzeit die Aggregate vorsichtig zerkleinert, bis eine homogene Masse hergestellt war, von der die Fließ- und Ausrollgrenze zu bestimmen war. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt. Mit zunehmendem Verwitterungsgrad erhöht sich die Plastizität der Röt-Tone. Die Fließgrenze

Probentyp	w_L [%]	w_P [%]	I_p [%]	S_{des} [m^2/gl]	w_b [%]
Typ 1	26,0	17,7	8,2	43,2	29,8
Typ 2	29,6	20,0	9,7	29,6	40,3
Typ 3	58,3	25,9	32,4	31,8	45,2
Typ 4	60,5	26,3	34,2	29,6	51,0

Tab. 1: Konsistenzgrenzen, spezifische Oberfläche und Wasseraufnahmevermögen der vier Verwitterungstypen. w_L : Fließgrenze, w_P : Ausrollgrenze, I_p : Plastizitätsindex, S_{des} : spezifische Oberfläche (Desorptive Bestimmung nach BET-Methode), w_b : Wasseraufnahmevermögen nach Enslin-Neff.

steigt mit zunehmender Verwitterung von 26,0% bei Typ 1 bis auf mehr als das doppelte bei Typ 4. Bei der Ausrollgrenze ist ein ähnlicher jedoch abgeschwächter Trend zu verzeichnen. Ein eindeutiger Zusammenhang der Plastizität mit der spezifischen Oberfläche ist nicht erkennbar, jedoch erhöht sich mit der Steigerung der Plastizität mit zunehmender Verwitterung auch die Wasseraufnahme nach Enslin-Neff.

4. Diskussion

Sowohl bei der spezifischen Oberfläche, als auch beim Wasseraufnahmevermögen nach Enslin-Neff tritt eine «kritische» Aggregatgröße auf, ab der sich das Verhalten des Tonsteins grundlegend ändert. Während dieses Phänomen im Wasseraufnahmeversuch teilweise mit apparativen Bedingungen zu erklären ist, muss der beobachtete Trend der Resultate der Oberflächenbestimmung im Rahmen der Fehlern Grenzen allein von den Materialeigenschaften abhängen. Ab einer gewissen Größe der Aggregate sind der kapillaren Wasseraufnahme durch die sehr geringen Auflageflächen der unregelmäßigen Aggregate Grenzen gesetzt sind, und es ist anzunehmen, dass bei der Wasseraufnahme durch kapillaren Anstieg auch die hydraulische Wasserleitfähigkeit der teilweise gesättigten Aggregate und elektrische Potentiale innerhalb der einzelnen Aggregate eine größere Rolle spielen, als bei der Untersuchung von Pulvern.

Als eine mögliche Erklärung für die Beobachtungen aus den Oberflächenmessungen, wird die Übertragung des Verwitterungsschemas im Sinne von Einsele (Fig. 2) auf den Maßstab der Tonsteinbröckchen vorgeschlagen, wobei eine Auflockerung durch allmähliche Verwitterung der Aggregate von außen nach innen stattfindet. Dadurch wird die äußere stärker aufgelockerte Schicht eine erhöhte Porosität und damit auch «innere» Oberfläche entwickeln, während sich zum Inneren hin der Auflockerungsgrad verringert.

Die Volumenschrumpfung durch zunehmende Saugspannung entspricht demnach einer Verringerung des Porenraumes. Je höher der Verwitterungsgrad, desto instabiler ist das Körnerüst, was sich in einer Verringerung des Gesamtporenvolumens äußert. Diese saugspannungsbedingte Volumenschrumpfung ist bei erneuter Wasseraufnahme nur teilweise reversibel. Dies kann als eine verwitterungsbedingte Zunahme von Gefügedefekten interpretiert werden.

Es erscheint plausibel, dass die Steigerung des Wasseraufnahmevermögens mit einer Erhöhung der Plastizität einhergeht. Beide Eigenschaften gehen auf dieselben physiko-chemischen Gesetzmäßigkeiten zurück. Bei zunehmender Verwitterung der Röt-Tone dürfte vor allem die Erhöhung elektrischer Oberflächenpotentiale eine Rolle spielen, weshalb die Wechselwirkungskräfte zwischen Wasser und Feststoffoberfläche zunehmen, d. h. dass auf Grund einer höheren Ladungsdichte der Tonminerale zum Einem eine größere Zahl von Wassermolekülen an der Oberfläche angelagert werden, was das Wasseraufnahmevermögen erhöht, zum Anderen aber auch die Bindungskräfte zwischen der Mineraloberfläche und dem Wasserdipol größer werden, was einen Einfluss auf die Kohäsionskräfte und damit die Plastizität haben dürfte.

5. Schlussfolgerungen

Messbare Effekte als Folge der Aggregierung von Tonmineralen zu größeren Teilchen sind zu komplex, als dass die reversible Konsolidierung als allein ausreichende Erklärung für das unterschiedliche Verhalten der Röt-Tone angesehen werden kann. Ein hier nicht näher betrachtetes Problem besteht darin, dass man im Labor nur den Verwitterungspfad betrachten kann, dass man jedoch den Konsolidierungsfaktor «Zeit» nicht zufriedenstellend simulieren kann. Die festgestellten Effekte resultieren zum einen aus den Wechselwirkungen des Wassers mit

den Partikeloberflächen der Tonmineralaggregate und werden zum anderen offensichtlich durch Wirkungen der Gasphase mitbeeinflusst. Ob diese Effekte durch eine diage-

netische Bindung zufrieden stellend zu begründen sind, muss solange offen bleiben, bis bessere Kenntnisse über die Natur derartiger Bindungen vorliegen.

Literaturverzeichnis

- Brunauer, S., Emmett, P. H. & Teller, E. 1938: Adsorption of gases in multimolecular layers. *J. Am. Chem. Soc.* 62, 309a.
- DIN 18122 Teil 1: Baugrund: Untersuchung von Bodenproben, Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen), Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze.
- DIN 18132 1995: Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte. Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens.
- DIN ISO 11274.1998: Bodenbeschaffenheit, Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens, Laborverfahren.
- Einsele, G. & Lempp, Ch. 1981: Ursache und Einfluß der Entfestigung veränderlich fester Gesteine auf die Tragfähigkeit. Bundesminister f. Verkehr Abt. Straßenbau (Hrsg.) *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* 330, 1-102.
- Einsele, G. & Wallrauch, E. 1964: Verwitterungsgrade bei mesozoischen Schiefertonen und Tonsteinen und ihr Einfluß bei Standsicherheitsproblemen. Vortr. Baugrundtagung. Dt. Ges. f. Erd- u. Grundbau. Essen, Berlin, 59-89.
- 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, 143-155.
- Hartge, K.H. & Horn, R. 1989: Die physikalische Untersuchung von Böden. Enke Verlag Stuttgart, 175 S.
- Hartge, K.H. & Horn, R. 1991: Einführung in die Bodenphysik. Enke Verlag Stuttgart, 303 S.
- 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.
- Kirkham, D. & Powers, W. L. 1972: *Advanced soil physics*. Wiley London.
- Kugler, H., Schwaighofer, B. & Gruber, S. 2002: Die Modifizierung des Wasseraufnahmeversuches nach Enslin-Neff. *Berichte d. Dt. Ton- und Tonmineralgruppe Band 9. Beiträge zur Jahrestagung Wien, 18.-20. September 2002*, 125-141.
- Madsen, F. T. 1977: Surface area measurements of clay minerals by glycerol sorption on a thermobalance. *Thermochimica Acta* 21, 89-93.
- Nagaraj, T. S. 1964: Soil structure and strength characteristics of compacted clay. *Geotechnique* 14, 103-114.
- Neff, H. K. 1959: Über die Messung der Wasseraufnahme ungleichförmiger bindiger anorganischer Bodenarten in einer neuen Ausführung des Enslingerätes. *Bautechnik* 39 Heft 11, 415-421.
- Pimentel, E. 1996: Quellverhalten Von Diagenetisch Verfestigtem Tonstein. *Veröff. Inst. Bodenmech. U. Felsmech. Universität Fridericiana. Karlsruhe.* 139, 184 S.
- Richter, J. 1986: Der Boden als Reaktor – Modelle für Prozesse im Boden. Enke Verlag Stuttgart, 239 S.
- Schachtschnabel P., Blume, H.P., Brümmer, G., Hartge, K.H. & Schwertmann, U. 1992: *Lehrbuch der Bodenkunde*. Enke Verlag Stuttgart, 491 S.
- 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, 157-162.
- Schlüchting, 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. *3rd International Congress of Soil sciences* 2, 37-48.
- Tucker, M.E. 1985: *Einführung in die Sedimentpetrologie*. Enke Verlag Stuttgart, 265 S.
- Walzenbach, J. 1991: Mineralöle in Locker- und Festgestein – Untersuchungen zur Durchlässigkeit, Saugspannung und Kapillarität, *Schriftenreihe zur Angewandten Geologie Karlsruhe* 12. Universität Karlsruhe.