

# Verwitterungsabhängige Zerfalls- und Entfestigungsvorgänge veränderlich fester Ton- und Schlufftonsteine

Dipl.-Ing. Julia Knopp und Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann,  
Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik (IGS)

*Veränderlich feste Gesteine sind sehr verwitterungsempfindlich, da sie innerhalb kurzer Zeit durch Austrocknungs- und Wiederbefeuchtungs-Wechsel ihren Zusammenhalt verlieren können. In einer umfangreichen Laborstudie wurde ein neues Verfahren zur Klassifikation der Veränderlichkeit entwickelt, mit dem eine eindeutige Erfassung des Zerfallspotentials möglich ist. Festgestellt wurde dabei, dass der natürliche Verwitterungszustand die Veränderlichkeit stark beeinflusst. Ursache hierfür ist ein mit der Verwitterung abnehmender Sulfatgehalt und ansteigender Interaggregatporenanteil.*

## 1 Einleitung

Veränderlich feste Gesteine nehmen nicht nur in Deutschland, sondern weltweit einen Großteil des oberflächennahen Baugrunds ein, womit sie baupraktisch von großem Interesse sind. Sie sind verwitterungsempfindlich und zerfallen unter anderem bei Austrocknung und Wiederbefeuchtung. Wie stark veränderlich ein Gestein ist, also wie sehr es sich aufgrund von Witterungseinflüssen zerlegen kann, kann mit einfachen Laborversuchen erfasst werden. Ein neues Verfahren zur Bestimmung der Veränderlichkeit wird aufbauend auf Knopp & Moormann (2018) in Absatz 6 beschrieben. Bei der Entwicklung des Verfahrens wurde festgestellt, dass der natürliche Entfestigungszustand (Verwitterungsgrad) der Gesteine einen starken Einfluss auf die Zerfallsanfälligkeit hat. Ziel der hier vorgestellten Untersuchungen ist es zu betrachten, welche Gesteinseigenschaften für die Verwitterungsabgängigkeit der Zerfallsneigung verantwortlich sind (Absatz 7).

## 2 Diagenese, Verwitterung und Zerfall von Keupertonsteinen

Die Ton- und Schluffsteine des Keupers, der obersten der drei lithostratigraphischen Gruppen der Germanischen Trias, bestehen nach Davis (1968) aus einer Aggregatstruktur. Die bei der Sedimentation abgelagerten Tonteilchen des Keupers wurden von den Sedimenten des Juras und jüngeren Schichten überlagert. Dabei wurde die primäre Struktur des sedimentierten Tons zu Partikeln in Schluffkorngröße komprimiert. Diese Partikel besitzen im Inneren eine hohe Ionendichte und es bestehen stabile Bindungen zwischen den Kristallgruppen, so dass die Partikel bei späteren mecha-

nischen Beanspruchungen intakt bleiben. Die Partikel enthalten intra- und interkristalline Poren (Abbildung 1). Mehrere Partikel bilden ein Aggregat, bei denen die Trennflächen zwischen den Partikeln mit einer Tonmatrix besetzt sind, die zu kohäsiven Bindungen führt. Die Poren zwischen den einzelnen Partikeln werden Intraaggregatporen genannt. Das Gestein ist letztendlich aus vielen Aggregaten aufgebaut und beinhaltet zusätzlich Interaggregatporen.

Die bei der Diagenese von Tonstein entstandenen Tonaggregate können durch Verwitterungseinflüsse entlang der Partikelgrenzen auseinander brechen, womit eine Veränderung des mechanischen Verhaltens verbunden ist.

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Gesteine der Grabfeld-Formation sind sulfatführende Tonsteine mit wasserfreiem Anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ ) im unverwitterten Ausgangsgestein. Anhydrit ist nur in Abwesenheit von freiem Porenwasser stabil. Geringe Mengen Wasser führen zur Hydratation und der Anhydrit wird in Gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) umgewandelt. Im Grundwasser geht Gips in Lösung und wird abtransportiert. Der Gipskeuper verliert so seine sulfatbedingte Festigkeit.

## 3 Zerfallsmechanismen

Bei einer sehr schnellen Abtragung und damit verbundenen Freilegung des Gesteins kann es innerhalb kurzer Zeit zu einem Zerfall des Gesteins kommen. Zerfall und Verwitterung unterscheiden sich dahingehend, dass der Zerfall deutlich schneller abläuft und nur physikalische und keine chemischen Prozesse stattfinden (Nickmann, 2009). Insbesondere ein spontanes Zerbrechen des Gesteins durch Kompression von Porenluft und die Aufhebung kapillarer Saugspannungen wird in der

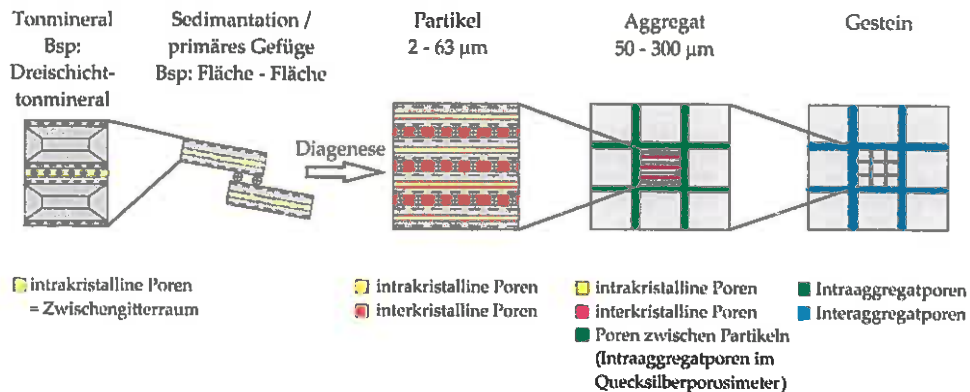


Abbildung 1: Strukturelemente der Keupertonsteine

Literatur als vorherrschender Mechanismus des Zerfalls angesehen (u.a. Nakano, 1967). Über die bei der Austrocknung entwässerten Poren und neu entstandenen Risse kann Luft ins Probeninnere gelangen. Die dabei entstandenen Kapillarspannungen bewirken bei Wasserzutritten ein schnelles Ansaugen von Wasser. Neben der Festigkeitsabnahme aufgrund der Reduzierung der Saugspannungen kann zudem die Luft in den inneren Poren nicht entweichen und wird zusammengepresst, wodurch ein Überdruck in den Poren entsteht, der zu einem spontanen Zerbrechen der diagenetischen Bindungen führen kann.

Des Weiteren werden ein unregelmäßiger Abbau von Saugspannungen bei Wasserzutritten (Bönsch, 2006), der Zusammenhang zwischen Saugspannung und Sättigungsgrad (Lempp, 1979) sowie osmotische Prozesse (u.a. Ondrasik, 2014), als ursächlich für Zerfallsprozesse beschrieben.

#### 4 Probenmaterial

Als Probenmaterialien wurden verschieden stark verwitterte Gesteine aus den Schichten Bochinger Horizont (BH) und Dunkelroter Mergel (DRM) der Grabfeld-Formation (Mittlerer Keuper) verwendet. Bei der Auswahl der Probenmaterialien wurde darauf geachtet, dass in allen zuvor genannten Schichten Proben aus verschiedenen Verwitterungshorizonten entnommen wurden. Eingeteilt wurden die Materialien in die Verwitterungsklassen V0 bis V5 nach Wallrauch (1969).

#### 5 Bestehende Verfahren zur Bestimmung der Veränderlichkeit

Nach DIN EN ISO 14689 wird anhand eines einfachen Wasserlagerungsversuches beurteilt, ob ein Gestein veränderlich ist. Unterschieden wird auf Basis rein visueller Kriterien zwischen fünf Veränderlichkeitsklassen von „nicht veränderlich“ bis „stark veränderlich“. Es ist aber bekannt, dass einige Gesteine im bergfrischen Zustand im einfachen

Wasserlagerungsversuch nicht reagieren, aber ausgetrocknet stark zerfallen können. In der aktuellen Version der DIN EN ISO 14689 wird zwar auf dieses Phänomen hingewiesen, allerdings wird in der Praxis der Wasserlagerungsversuch meist allein an Proben mit natürlichem Wassergehalt durchgeführt. Aber auch wenn der Wasserlagerungsversuch an einem bergfrischen und an einem ausgetrockneten Gestein durchgeführt wird, wird in der Regel das komplette Zerfallspotential nicht erfasst. In natürlicher Umgebung kommt es meist nicht nur zu einer einfachen Bewässerung bzw. Austrocknung und Bewässerung, sondern vielmehr zu Wechselbeanspruchungen zwischen Austrocknungen und Wiederbefeuchtungen. Versuche mit wiederholten Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln (TB-Wechsel) können dies besser abbilden. Aus der Literatur sind zwar einige Ansätze mit kombinierten TB-Wechseln zur Klassifizierung der Veränderlichkeit bekannt (u.a. Bönsch, 2006 und Nickmann, 2009) allerdings sind diese insbesondere für die hier untersuchten angewitterten und verwitterten Gesteine oft nicht anwendbar (Knopp & Moormann, 2018).

#### 6 Verfahren zur Bestimmung der Veränderlichkeit

Da die bisherigen Ansätze zur Klassifizierung der Zerfallsneigung veränderlich fester Gesteine ihre Grenzen haben, wurde ein neues Verfahren entwickelt, mit dem die Zerfallsanfälligkeit zuverlässiger als bisher abgebildet werden kann. Ausführlich beschrieben wird dieser Ansatz in Knopp & Moormann (2018).

Die Probe wird zunächst 24 Stunden in Wasser gelagert und anschließend schonend mit viel Wasser durch einen Siebsatz gewaschen. Als erstes Zwischenergebnis kann also die Reaktion im einfachen Wasserlagerungsversuch ermittelt werden. Danach werden die Siebe mit Rückstand bei 50°C im Ofen getrocknet und nach der Trocknung die Siebrückstände bestimmt. Insgesamt werden fünf Siebungen durchgeführt. Zu beachten ist, dass bei

der Nasssiebung der Anteil  $< 0,063$  mm nicht aufgefangen wird. Über den Wassergehalt des Materials wird die Ausgangstrockenmasse und über diese der Anteil  $< 0,063$  mm berechnet. Der Wassergehalt hierzu wird an einem separaten Stück, welches von der Ausgangsprobe abgebrochen wird, ermittelt. Da der Anteil  $< 0,063$  mm nicht aufgefangen wird, ist es auch nicht möglich, näher zu untersuchen, ob innerhalb dieser Fraktion während des Zerfallsversuches Veränderungen auftreten. Davis (1968) erläutert, dass es während des Zerfalls zu einer Zerkleinerung der Aggregate kommt, die Partikel aber aufgrund sehr stabiler Bindungen zwischen den Kristallgruppen mechanischen Beanspruchungen widerstehen. Es ist demnach davon auszugehen, dass während der Zerfallsversuche innerhalb der Fraktion  $< 0,063$  mm keine signifikanten Veränderungen auftreten.

Zur Auswertung werden die Siebfractionen in Aggregatklassen unterteilt. Wobei die Aggregatklasse 12 der Siebfraction  $> 63$  mm, die Aggregatklasse 11 der Fraktion 31,5 - 63 mm, die Klasse 10 der Fraktion 16 - 31,5 mm, usw. entspricht. Die Aggregatklasse 1 entspricht der Fraktion  $< 0,063$  mm.

Im nächsten Schritt wird dann die Verteilungskurve (Siebrückstände) des Wechsels  $n$  durch den Schwerpunkt  $S_n$  (Gl. 1) parametrisiert.

$$S_n = \sum_{i=1}^{12} [R_{i,n} \cdot C_i] \quad \text{Gl. 1}$$

$C_i$  gibt die Aggregatklasse  $i$  und  $R_{i,n}$  den Anteil der Aggregatklasse  $i$  im Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel  $n$  an.

In Abbildung 2 ist beispielhaft das Ergebnis eines Zerfallsversuches an einer Probe aus dem Bochinger Horizont, Verwitterungsgrad V1 dargestellt. Insbesondere nach der ersten Ofentrocknung (zwischen Wechsel 1 und 2) tritt bei der dargestellten Probe ein sehr starker Zerfall auf. Ab dem dritten Wechsel verändert sich die Probe nur noch geringfügig.

Die Zerfallsneigung  $D$  ist die Differenz des Schwerpunktes der Verteilungsfunktion im Ausgangszustand zu der des Endzustandes.

$$D = S_0 - S_5 = 12 - \sum_{i=1}^{12} [R_{i,5} \cdot C_i] \quad \text{Gl. 2}$$

Bei allen Versuchen, die Basis für die Ermittlung des neuen Bewertungsschemas waren, wurden für die Untersuchungen Probenstücke mit einer Größe von  $> 63$  mm verwendet. Die Proben haben somit im Ausgangszustand den Schwerpunkt 12. Bei einem völlig verwitterten Material V5 handelt es sich dabei um Tonmatrix, deren Partikel durch kohäsive Bindungen zusammengehalten werden. Ein maximaler Zerfall würde einen Schwerpunkt von 1 im Endzustand bedeuten. Die Zerfallsneigung  $D$  liegt somit zwischen 0 (kein Zerfall) und 11 (völliger Zerfall).

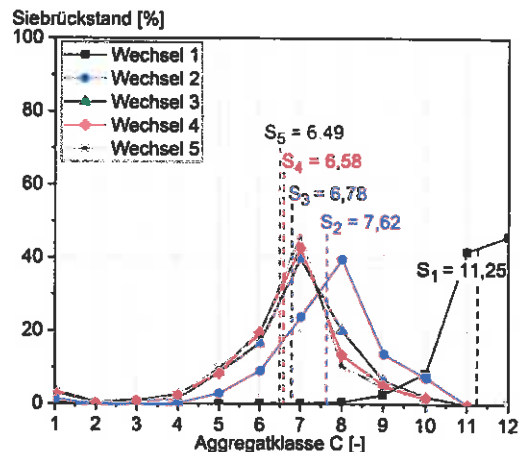


Abbildung 2: Ergebnis eines Zerfallsversuches an einer Probe aus dem Bochinger Horizont, Verwitterungsgrad V1. Anteile der einzelnen Fraktionen (Siebrückstände) sowie die berechneten Schwerpunkte der Kurven.

Ob bereits ein einfacher Wasserkontakt zu großen Veränderungen führt oder ob dafür Wechselbeanspruchungen zwischen Austrocknungen und Wiederbefeuchtungen notwendig sind, ist baupraktisch oft von großem Interesse. Deshalb sollten die Sofortreaktion  $D_1$  (Gl. 3) und die Langzeitreaktion  $D_L$  (Gl. 4) getrennt betrachtet werden:

$$D_1 = S_0 - S_1 = 12 - \sum_{i=1}^{12} [R_{i,1} \cdot C_i] \quad \text{Gl. 3}$$

$$D_L = S_1 - S_5 = \sum_{i=1}^{12} [R_{i,1} \cdot C_i] - \sum_{i=1}^{12} [R_{i,5} \cdot C_i] \quad \text{Gl. 4}$$

Die Summe aus  $D_1$  und  $D_L$  ist der Zerfall  $D$ .

In Abbildung 3 ist die Änderung der Schwerpunkte während der fünf Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel aller im Rahmen der vorgestellten Studie untersuchten Proben dargestellt. Bei den hier untersuchten Proben waren fünf Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel zur Beschreibung des Zerfallsverhaltens ausreichend, da sich mit dieser Anzahl von Wechseln die Änderungen der Schwerpunkte einer Asymptote annäherten. Grundsätzlich sollte aber vor Beendigung eines Zerfallsversuches anhand der Änderung des Schwerpunktes geprüft werden, ob der Zerfall der Probe abgeschlossen ist. Zu sehen ist auch, dass nur bei wenigen der untersuchten Proben anhand des Wasserlagerungsversuches an einer bergfeuchten Probe (Sofortreaktion), der potentiell mögliche Zerfall einer Probe zu treffend ermittelt werden konnte. Auch eine Austrocknung mit anschließender einmaliger Wasserlagerung reichte bei den meisten Proben nicht aus, das gesamte Zerfallspotential zu ermitteln. Vielmehr waren bei der überwiegenden Anzahl der untersuchten Proben wiederholte Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel (Langzeitreaktion) notwendig.

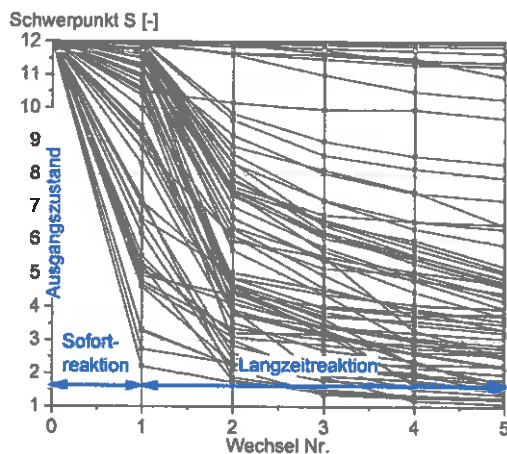


Abbildung 3: Änderung der Schwerpunkte der Siebrückstände während der fünf TB-Wechsel für alle untersuchten Proben.

Von Knopp & Moormann (2018) werden zur Klassifikation der Veränderlichkeit mit Hilfe des Zerfallsindex D sechs Veränderlichkeitsklassen abgegrenzt. Erläutert wird außerdem, dass es mit Hilfe der Berechnung der Standardabweichung der Verteilungskurve vom Schwerpunkt möglich ist zu prüfen, wie weit verteilt die Aggregatgrößen des Materials nach den Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln vorliegen.

## 7 Einflüsse auf die Zerfallsneigung

Aus der Literatur (Nickmann, 2009) ist bekannt, dass Gesteine mit einer höheren Gesamtporosität tendenziell stärker zum Zerfall neigen, als Gesteine mit einer geringen Porosität. Neben der Gesamtporosität gilt auch die Porengrößenverteilung als zerfallsrelevant. Aber auch die mineralogische Zusammensetzung beeinflusst die Zerfallsanfälligkeit von Gesteinen. Gesteine mit hohem Gehalt an zementierenden Mineralen (z.B. Karbonat und Sulfat) gelten als widerstandsfähiger gegenüber Zerfallsangriffen. Zudem haben quellfähige Tonminerale einen Einfluss auf die Zerfallsanfälligkeit, da diese Wasser anlagern können (Czerewko & Cripps, 2006). In einem umfassenden Versuchsprogramm wurde die Porosität, die Porengrößenverteilung sowie die mineralogische Zusammensetzung verschieden stark verwitterter Tonsteine untersucht. Im Folgenden wird betrachtet, welchen Einfluss diese Gesteinskenngrößen auf die Zerfallsneigung haben.

### 7.1 Mineralogische Zusammensetzung

Abbildung 4 zeigt, dass Gesteine mit einem hohen Sulfatgehalt eine geringe Neigung zum Zerfall haben und dass die Verringerung des Sulfatgehalts infolge der verwitterungsbedingten Auslaugung zu einer Erhöhung der Zerfallsneigung führt. Wird der Sulfatgehalt in Anhydrit- und Gipsanteile unterteilt, ergibt sich erwartungsgemäß, dass die Umwand-

lung von Anhydrit in Gips zu einer Erhöhung der Zerfallsneigung führt.

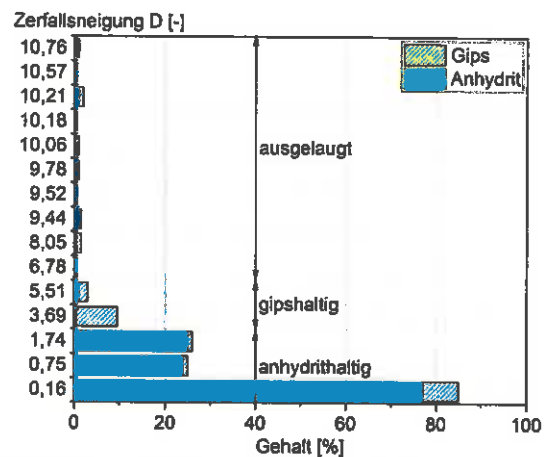


Abbildung 4: Einfluss des Sulfatgehalts auf die Zerfallsneigung.

Weitere Einflüsse aus der Mineralogie der Gesteine auf die Zerfallsneigung konnten nicht festgestellt werden. Die Zerfallsneigung der hier untersuchten Gesteine zeigte weder eine Abhängigkeit vom Smektit- noch vom Karbonatgehalt.

### 7.2 Einfluss des Porenraums

Zur Ermittlung der Porengrößenverteilung wurde ein Quecksilberporosimeter der Firma micrometric, Typ AutoPore IV verwendet, der vom Institut für Angewandte Geologie, Abteilung für Ingenieurgeologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) zur Verfügung gestellt wurde. Mittels der Quecksilberporosimetrie kann die Porengrößenverteilung insbesondere im Makro- und Mesoporenbereich einer trockenen Probe ermittelt werden. Um die nicht benetzende Flüssigkeit Quecksilber in ein poröses System eindringen zu lassen, ist ein Überdruck notwendig, der mit sinkender Porenweite zunimmt. Der Quecksilberdruck wird stufenweise bis zu einem Maximalwert gesteigert. Für jede Druckstufe werden der Quecksilberdruck und die einströmende Quecksilbermenge erfasst (Intrusion). Nachdem der Maximaldruck erreicht ist, wird der Quecksilberdruck wieder schrittweise reduziert und die nun ausströmende Quecksilbermenge gemessen (Extrusion). Zur Auswertung wird das Intrusionsvolumen auf die Trockenmasse der Probe bezogen. Über das Intrusionsvolumen, die Trockenmasse der Probe und die Komdichte kann der mit Quecksilber gefüllte Porenanteil  $n_{HG}$  ermittelt werden.

In Abbildung 5 ist der mit Quecksilber gefüllte Porenanteil in Abhängigkeit des jeweiligen Porendurchmessers beispielhaft für eine Probe aus dem Dunkelroten Mergel, Verwitterungsgrad V3, als Summenkurve dargestellt. Anhand der Steigung der Intrusionskurve ist eine Trennung in Inter- und Intraggregatporen möglich.

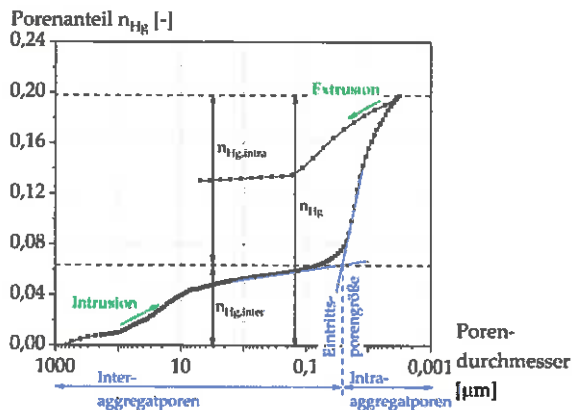


Abbildung 5: Dunkelroter Mergel (V3): Mit Quecksilber gefüllte Porenanteil und Ermittlung der Inter- sowie Intraaggregatporenanteile

Zunächst werden im Zuge der Intrusion die größeren Poren zwischen den Aggregaten (Interaggregatporen) mit Quecksilber gefüllt. Die Kurve flacht sichtlich ab, bevor es zu einem erneuten starken Anstieg des Porenanteils kommt. Der Beginn der Füllung der Intraaggregatporen ist an einem starken Anstieg der Kurve erkennbar und kann über Tangenten an die Wendepunkte ermittelt werden (Birle, 2011). Bei den Intraaggregatporen handelt es sich um die Poren zwischen den Partikeln innerhalb der Aggregate (Abbildung 1).

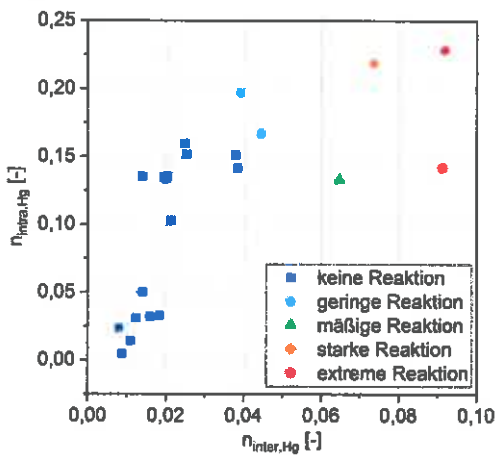


Abbildung 6: Einfluss des Inter- und Intraaggregatporengehalts auf die Sofortreaktion.

Abbildung 6 zeigt, dass nur Gesteine mit einem Interaggregatporenanteil > 4% im bergfrischen Zustand auf Wasserkontakt reagieren (Sofortreaktion). Es ist also ein gewisser Mindestanteil an Interaggregatporen erforderlich, damit überhaupt Wasser in das bergfrische Gestein eindringen kann. Sobald dieser Mindestanteil an Interaggregatporen überschritten wird, nimmt die Reaktion des Gesteins stark zu. Die Intraaggregatporen hingegen beeinflussen die Sofortreaktion kaum.

## 8 Verwitterungsabhängigkeit

Bei Verwitterungsgrad V0 bis V2 ist eine Sofortreaktion quasi nicht vorhanden (Abbildung 7), da der Interaggregatporenanteil sehr niedrig ist (Abbildung 8). Gesteine mit einem Verwitterungsgrad V0 reagieren auch bei Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln nicht. Der Sulfatgehalt dieser Gesteine ist hoch (Abbildung 9), was zu einer niedrigen Zerfallsneigung führt. Zudem sind die Bindungen sehr stark, so dass während der Trocknung keine Schumpfrisse entstehen, über die Wasser in das Gestein eintreten kann. Ab einem Verwitterungsgrad V1 sind die Bindungskräfte gelockert, der Sulfatgehalt deutlich niedriger und es kommt während der Trocknung zur Bildung von Schumpfrissen und somit zu einer Reaktion bei Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln. Ab einem Verwitterungsgrad V3, wenn der Anteil an Interaggregatporen > 4% ist, reagieren die Gesteine bereits bei einfachen Wasserkontakten.

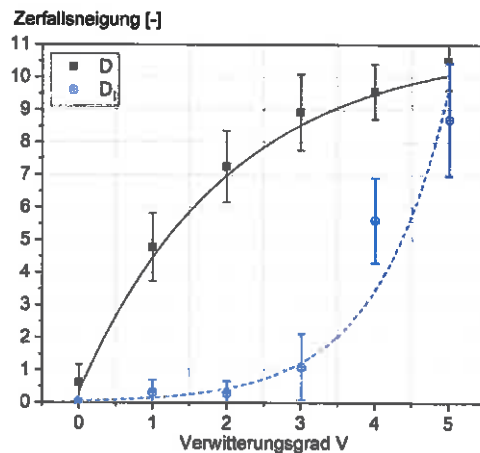


Abbildung 7: Zerfallsneigung  $D$  und Sofortreaktion  $D_s$  in Abhängigkeit des Verwitterungsgrades. Schichtübergreifende Mittelwerte je Verwitterungsgrad.

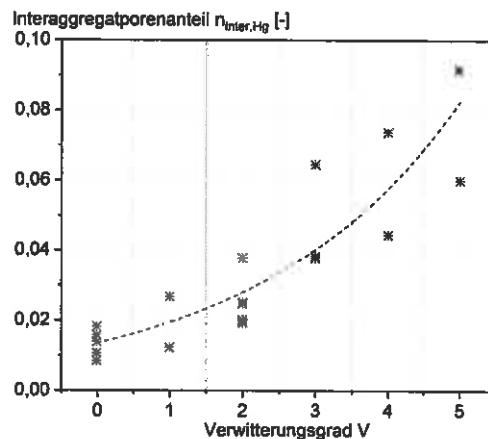


Abbildung 8: Interaggregatporenanteil in Abhängigkeit des Verwitterungsgrades.

Mit steigendem Verwitterungsgrad und somit steigendem Interaggregatporenanteil nimmt die Reaktionsstärke zu. Bei einem Verwitterungsgrad V5 zerfielen die hier untersuchten Gesteine bei einem einfachen Wasserkontakt nahezu komplett.

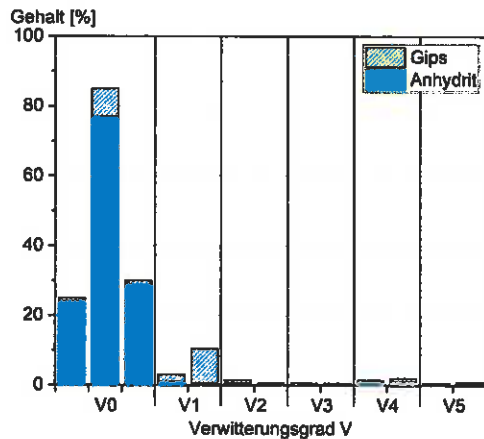


Abbildung 9: Sulfatgehalt in Abhängigkeit des Verwitterungsgrades.

## 9 Zusammenfassung

Veränderlich feste Gesteine sind witterungsempfindlich und zerfallen unter Umwelteinflüssen. Da diese Gesteine häufig als oberflächennaher Baugrund anstehen, ist es von großem Interesse ihre Zerfallsneigung richtig einzuschätzen. Der in der Praxis häufig verwendete einfache Wasserlagerungsversuch nach DIN EN ISO 14689 ist jedoch nicht ausreichend, um die Zerfallsneigung abzuschätzen. Auch die in der Literatur vorgeschlagenen verbesserten Methoden sind nur bedingt anwendbar. Daher wurde ein neuer Ansatz zur Klassifizierung entwickelt. Dieser Ansatz sieht vor Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel durchzuführen und im Anschluss die Zerfallsneigung D nach Gl. 2 zu bestimmen, anhand der eine Klassifikation möglich ist (Knopp & Moormann, 2018). Im Vergleich zum einfachen Wasserlagerungsversuch ist das neue Verfahren wesentlich aufwändiger. Die erhöhte Aussagekraft und Zuverlässigkeit der Bewertung und die damit verbundene Planungssicherheit rechtfertigen jedoch den zusätzlichen Aufwand.

Bei den hier untersuchten Gesteinen der Grabfeld-Formation konnte eine niedrige Zerfallsneigung auf einen hohen Sulfatgehalt zurückgeführt werden. Die Sulfatauslaugung führt zu einer Erhöhung der Zerfallsneigung. Es wurde auch festgestellt, dass Gesteine mit Anhydrit widerstandsfähiger sind als solche, bei denen die Anhydrit-Gips-Umwandlung begonnen hat (Abbildung 4).

Erst ab einem Interaggregatporenanteil von > 4% findet eine Reaktion des bergfrischen Gesteins bei Wasserkontakt statt (Abbildung 7).

Sowohl der Interaggregatporenanteil als auch der Sulfatgehalt verändern sich im Zuge der Verwitterung (Abbildung 8 und Abbildung 9), weshalb auch die Zerfallsneigung vom Grad der Verwitterung abhängt (Abbildung 7).

## Literaturverzeichnis

- Birle, E. (2011). *Geohydraulische Eigenschaften verdichteter Tone unter besonderer Berücksichtigung des ungesättigten Zustandes*. Dissertation, TU München, Zentrum für Geotechnik.
- Bönsch, C. (2006). *Auswirkungen der Saugspannung auf physikalische und mechanische Eigenschaften von überkonsolidierten Tonen und Tonsteinen im Verwitterungsprozess*. Dissertation, Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften und Geographie.
- Czerewko, M., & Cripps, J. (2006). *The implications of diagenetic history and weathering on the engineering behaviour of mudrocks*. 10th IAEG International Congress: Engineering Geology for Tomorrow's Cities, S. Paper No.118.
- Davis, A. (1968). *The structure of Keuper Marl*. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 1(3), S. 145-153.
- DIN EN ISO 14689, *Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels* (2018).
- Knopp, J., & Moormann, C. (2018). *Klassifizierung der verwitterungsabhängigen Zerfallsneigung veränderlich fester Gesteine*. *Geotechnik*, 4, S. 241-253.
- Lempp, C. (1979). *Die Entfestigung überkonsolidierter, pelitischer Gesteine Süddeutschlands und ihr Einfluß auf die Tragfähigkeit des Straßenuntergrundes*. Dissertation, Universität Tübingen, Lehrstuhl für Angewandte Geologie.
- Nakano, R. (1967). *On weathering and change of properties of tertiary mudstone related to landslide*. *Soils and Foundations*, 1, S. 1-14.
- Nickmann, M. (2009). *Abgrenzung und Klassifizierung veränderlich fester Gesteine unter ingenieur-geologischen Aspekten*. Dissertation, Technische Universität München.
- Ondrasik, M., & Kopecky, M. (2014). *Rock pore structure as main reason of rock deterioration*. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 36, 1, S. 79-88.
- Wallrauch, E. (1969). *Verwitterung und Entspannung bei überkonsolidierten tonigschluffigen Gesteinen Südwestdeutschland*. Dissertation, Universität Tübingen, Lehrstuhl für Angewandte Geologie.