



Originally published as:

Steding, S., Bürkner, G., Törzs, T., Grabe, J. (2018): Zum besonderen Quellverhalten von Tarrastonen. - *Geotechnik: Organ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik*, 41, 4, pp. 254—263.

DOI: <http://doi.org/10.1002/gete.201800003>

Svenja Steding
Göta Bürkner
Tom Törzs
Jürgen Grabe

Zum besonderen Quellverhalten von Tarrastonen

Im Rahmen der derzeit stattfindenden Variantenuntersuchung zur Erneuerung der Fehmarnsundquerung wurde in verschiedenen Tiefen Tarraston angetroffen. Wie schon bei den Baumaßnahmen vor 50 Jahren stellt dieser eine ernste Herausforderung dar. Insbesondere das Quell- und Schwellverhalten des Tons sowie seine geringe Scherfestigkeit im Bereich von Harnischflächen könnten beim Bau der neuen Brücke bzw. des Tunnels Probleme bereiten. Dieser Artikel vergleicht verschiedene als Tarraston eingestufte Proben im Hinblick auf ihre Zusammensetzung, ihre Mikrostruktur und ihr Quellverhalten und zeigt dabei Zusammenhänge auf. So konnte gezeigt werden, dass die Kornverteilung der untersuchten Proben des Tarrastons keine sichere Aussage über deren Quellverhalten zulässt, während Plastizität oder Wasseraufnahmevermögen zuverlässige Anhaltspunkte bieten. Zwei Tone, die sich in granulometrischer und tonmineralogischer Zusammensetzung sowie Setzungsverhalten kaum unterscheiden, wiesen beim Quellverhalten deutliche Unterschiede auf. Der Artikel diskutiert die Ursachen und geht dabei auch auf die Mikrostruktur des Tarrastons ein. Ferner werden die Versuchsergebnisse mit Literaturwerten des besser erforschten London Clay verglichen.

Keywords: Tarraston, Mikrostruktur, Quellverhalten

About the extraordinary swelling behavior of Tarras Clay. In the course of the currently ongoing variant analysis for a new fixed link across the Fehmarnsund Tarras Clay has been found at various depths. Just like 50 years ago, it presents a serious challenge to the construction measures. Especially the shrinkage and swelling behavior of the clay as well as its very low shear strength in the area of slickensided discontinuities may cause serious problems with regard to a new bridge or tunnel construction. This article compares the composition, the microstructure and the swelling behavior of different soil samples that were classified as pure Tarras Clay in order to point out correlations. For instance, it was shown that no reliable statement can be made about the swelling behavior based on the grading curve of the examined clay samples. However, plasticity index and water absorbency represent much more reliable indicators. Two clay samples were tested, whose granulometric composition, clay mineralogy and settlement behavior were almost the same, but their swelling properties were found to be very different. In this article the reasons are discussed and the microstructure of Tarras Clay is analysed in greater detail. Furthermore, the test results are compared to literature values of better researched London Clay.

Keywords: Tarras Clay, microstructure, swelling behavior

1 Einleitung

Der auf der Insel Fehmarn sowie im Fehmarnsund anzutreffende Tarraston zeichnet sich durch eine auffällig hohe Plastizität und Quellfähigkeit aus, weshalb dieser Ton umfangreich untersucht wurde. Ähnlich wie paläogene Tone im Fehmarnbelt und der London Clay weist er eine teilweise stark ausgeprägte Poly-

gonstruktur bestehend aus zahlreichen ungleichmäßig angeordneten Plättchen auf, welche die Scherfestigkeit herabsetzen kann [1], [2]. *Pour-Naghshband* [3] unterscheidet zwischen einem braunen und einem grünen reinen Tarraston sowie mehreren Mischformen u.a. mit Geschiebemergel, die im Küstenbereich vor Fehmarn anzutreffen sind. Beide Reinformen werden als quellfähig eingestuft, nähere Untersuchungen zum Quellverhalten fanden bisher jedoch nicht statt. Dieser Artikel beschreibt die Eigenschaften des Tarrastons im Hinblick auf Struktur und Quellverhalten und versucht, mögliche Ursachen für dessen auffälliges Verhalten aufzuzeigen. An mehreren Proben, die im Rahmen der Vorerkundungen zur neuen Fehmarnsundbrücke entnommen und als reiner Tarraston eingestuft worden sind, wurden Laborversuche zur bodenmechanischen Klassifikation durchgeführt, eine Röntgendiffraktometrie zur Bestimmung der Tonmineralogie sowie Quellversuche nach *Huder & Amberg*. Ferner wurde die Mikrostruktur des Tarrastons mittels Elektronenmikroskopie untersucht und seine Eigenschaften mit denen des London Clay verglichen.

Quellprozesse sind komplexe Vorgänge, die verschiedene Ursachen haben können. Im Gegensatz zum Anhydritquellen handelt es sich bei der Tonquellung um eine Einlagerung der Wassermoleküle zwischen den Schichten des Tonminerals. Dabei ist zu unterscheiden zwischen intrakristalliner Quellung und osmotischer Quellung. Erstere ruft Quelldrücke von über 100.000 kN/m² hervor, ist jedoch in den üblichen Bautiefen für gewöhnlich bereits vollständig abgeschlossen. Letztere erreicht Quelldrücke von bis zu 2.000 kN/m² und hängt stark von den Austauschaktionen des Tons ab, der Elektrolytkonzentration der Porenlösung sowie der Menge des bereits eingelagerten Wassers bzw. der Vorbelastung [4]. Auch der Tonanteil des Bodens und die Tonmineralogie spielen eine wichtige Rolle. Dabei nimmt bei gleichem Tongehalt und Ionenbelag das Ausmaß der Quellung von Kaolinit über Illit bis hin zu smectitreichen Böden zu. Quellvorgänge verändern die Mikrostruktur des Bodens und damit sein bodenmechanisches Verhalten [5], [6]. Als Mikrostruktur wird hier die Anordnung und Ausrichtung der Tonplättchen bezeichnet.

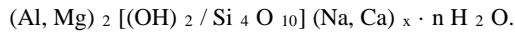
2 Herkunft und Entstehung

Untereozäner Tarraston, ungefähr 53 Millionen Jahre vor heute, steht auf Fehmarn im Südosten am Kliff bei Katharinenhof sowie am Kliff des Hohen Ufers bei Heiligenhafen an. Er wurde vom Gletschereis in den Geschiebemergel eingeschuppt. Auf Fehmarn bildet der Tarraston ab einer Tiefe von 25-70 m das Liegende des unteren Geschiebemergels. Tarras enthält pyritisierte Fossilien wie Muscheln, Schnecken, Seelilienglieder und Hölzer. Der Name Tarras stammt von der Insel Fehmarn [7]. Tarraston ist im gesamten Untergrund der Ostseeküste von der Lübecker Bucht bis in die südöstlichen Dänischen Inseln weit verbreitet. Auf der Nordseite der Insel Fehmarn wurde er im Zuge der Fehmarnbelterkundung angetroffen und als paläogener Ton aus dem Eozän beschrieben [1]. Es handelt sich um einen Ton mit hohen Anteilen sehr stark quellfähiger Tonminerale der Smectitgruppe. Häufigstes Smectitmineral im Tarras ist der Montmorillonit [7], welcher häufig in Wechsellagerung mit anderen Tonmineralen wie Illit oder Kaolinit auftritt [4].

Während des Eozäns war Norddeutschland mit Wasser bedeckt. Es herrschten tropische Klimabedingungen in Europa. Zu dieser Zeit entstand der Tarraston im Marinen als Verwitterungsprodukt des südschwedischen Grundgebirges [3]. Im Quartär war der Tarraston während der Eiszeiten vermutlich bis in mehrere Zehnermeter Tiefe gefroren und hohen Belastungen ausgesetzt. Im gefrorenen Zustand verhielt er sich wie ein Festgestein, Einschuppungen und Auffaltungen entstanden, wodurch insbesondere die oberen Dekameter stark gestört sind [1], [8].

Montmorillonit, als einer der bodenmechanisch bestimmenden Tonminerale des Tarrastons, mit Korngrößen zwischen 0,1-1 µm x 0,001-0,01 µm, besitzt eine spezifische Oberfläche um die 800-1000 m²/g. Damit ist Montmorillonit deutlich feinkörniger als zum Beispiel Illit mit Korngrößen von 0,1-2 µm x 0,01 µm und spezifischer Oberfläche von 80-100 m²/g [9]. Montmorillonit ist ein Phyllosilikat mit Dreischichtstruktur

vom di- oder trioktaedrischen Typ mit der Strukturformel



Durch Einlagerung von positiv geladenen Hydroxidschichten oder Einzelkationen, nackt oder hydratisiert, wird die Struktur stark aufgeweitet. Je nach Wassergehalt ändert sich durch innerkristalline Quellung oder Schrumpfung der Gitterabstand [10]. Die Anordnung der O- und OH-Ionen in Schichten ist die Ursache für die blättchenförmige Gestalt der Phyllosilikate.

Das verwendete Probenmaterial stammt aus Kernbohrungen, beauftragt von der Firma BBI Geo- und Umwelttechnik Ingenieur-Gesellschaft mbH, Hamburg, und wurde im Bodenmechanischen Forschungslabor der TUHH untersucht. Tarraston wurde dabei in Tiefen von 9 bis 30 m angetroffen, teilweise in Durchmischung mit dem anstehenden Geschiebemergel. In Reinform wurden zwei Arten von Tarraston identifiziert, eine grüne und eine braune Form. Während der braune Ton T(b) nur in ca. 10 m Tiefe auftritt und kein ausgeprägtes Polygonegefüge aufweist, wurde der grüne Ton in verschiedenen Tiefen angetroffen. Größe und Anordnung der Tonplättchen ändern sich dabei leicht, weshalb zwischen unterem und oberem grünen Ton – T(g,u) und T(g,o) – unterschieden wird. Insgesamt werden somit drei verschiedene Tonarten, die vorerst allesamt als reiner Tarraston eingestuft worden sind, untersucht und verglichen. Der braune Ton T(b) stammt dabei aus 9,7-11 m Tiefe, der obere grüne Ton aus 7 m bzw. 10 m Tiefe und der untere grüne Ton aus 26,7 m bzw. 30 m Tiefe. Für die Ödometerversuche wurde ungestörtes Probenmaterial aus der Mitte der 25 cm langen Bohrstützen verwendet. Die Bodenansprache erfolgte im Labor; in-situ Bestimmungen von Dichte und Wassergehalt fanden nicht statt.

3 Klassifikation des Tarrastons

Die Versuche zur Klassifizierung der als Tarraston eingestuften Proben umfassen neben der Ermittlung von Korngrößenverteilung und Zustandsgrenzen auch Untersuchungen mit dem Elektronenmikroskop und dem Röntgendiffraktometer, um mehr über die Zusammensetzung und innere Struktur des Tons zu erfahren. Außerdem wurden Organik- und Kalkgehalt aller drei Tonsorten bestimmt.

3.1 Korngrößenverteilung, Zustandsgrenzen, Organik- und Kalkgehalt

Die Korngrößenverteilung des oberen und unteren grünen Tons gemäß DIN 18123 ist nahezu identisch und weist einen Tonanteil von ca. 83% auf (s. Bild 1). Bei den übrigen 17% handelt es sich überwiegend um Feinschluff, während der Sandanteil mit in beiden Fällen unter 0,2% vernachlässigbar ist. Beim braunen Ton ist der Tonanteil mit rund 74% etwas geringer, was sich vor allem in etwas höheren Anteilen an Fein- und Mittelschluff ausdrückt. Der Sandanteil ist mit ca. 1,3% ebenfalls sehr gering, es fiel jedoch auf, dass die Rückstände gröber und ungleichförmiger waren als beim grünen Ton.

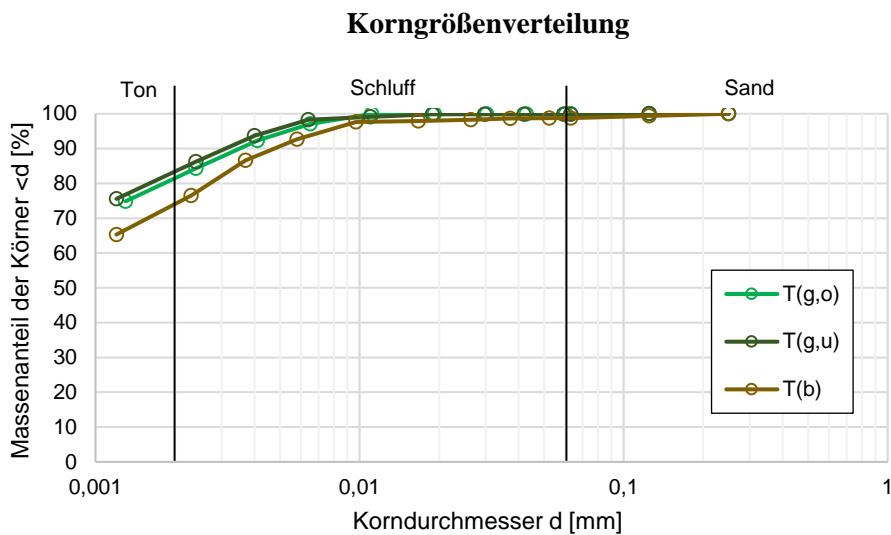


Bild 1. Korngrößenverteilung der drei Tonsorten nach DIN 18123

Fig. 1. Grain size distribution of the three different types of clay according to DIN 18123

In beiden Fällen handelt es sich gemäß DIN 18196 eindeutig um feinkörnige Böden, deren weitere Klassifikation über die plastischen Eigenschaften zu erfolgen hat. Wassergehalt und Zustandsgrenzen gemäß DIN 18122 sind in Tabelle 1 aufgeführt. Dabei fällt sofort auf, dass die grünen Tonproben deutlich höhere Fließgrenzen aufweisen als der braune Ton. Dessen Fließgrenze hingegen liegt eher im Bereich der Ausrollgrenze des grünen Tons. Dementsprechend unterschiedlich sind auch die Plastizitätszahlen (s. Bild 2). In Tabelle 5 der DIN 18196 gelten bereits Tone mit einer Fließgrenze $>50\%$ und einer Plastizitätszahl $>7\%$ als ausgeprägt plastisch. Dieser Gruppe sind beide grünen Tonarten zuzuordnen, ebenso wie der Tarraston im Allgemeinen, welcher in der DIN explizit als Beispiel mit aufgeführt wird. Der braune Ton hingegen ist als mittelpplastisch einzustufen, seine Werte sind insgesamt keineswegs so außergewöhnlich wie die der beiden grünen Proben. Die Ergebnisse widersprechen damit denen von *Pour-Naghshband* [3], der für braunen, reinen Tarraston ebenso hohe Fließgrenzen und Plastizitäten angibt wie für den grünen. Insofern ist fraglich, ob es sich bei dem hier angetroffenen braunen Ton überhaupt um einen Tarraston handelt, für den ein ausgeprägt plastisches Verhalten offenbar charakteristisch ist. So weisen die paläogenen Tone im Fehmarnbelt mit durchschnittlich 114% sogar noch etwas höhere Plastizitätszahlen auf als der hier untersuchte grüne Ton [12].

In Bezug auf den Organikgehalt unterscheiden sich grüner und brauner Ton kaum; er beträgt bei allen Proben unter 1%, was zu den Werten von *Pour-Naghshband* [3] passt. Für den Kalkgehalt wäre dasselbe zu erwarten. Die Werte gehen mit unter 1% beim grünen Ton und fast 16% beim braunen Ton jedoch weit auseinander; ein weiterer Hinweis darauf, dass es sich bei dem braunen Ton nicht um einen Tarraston aus dem Untereozän handelt.

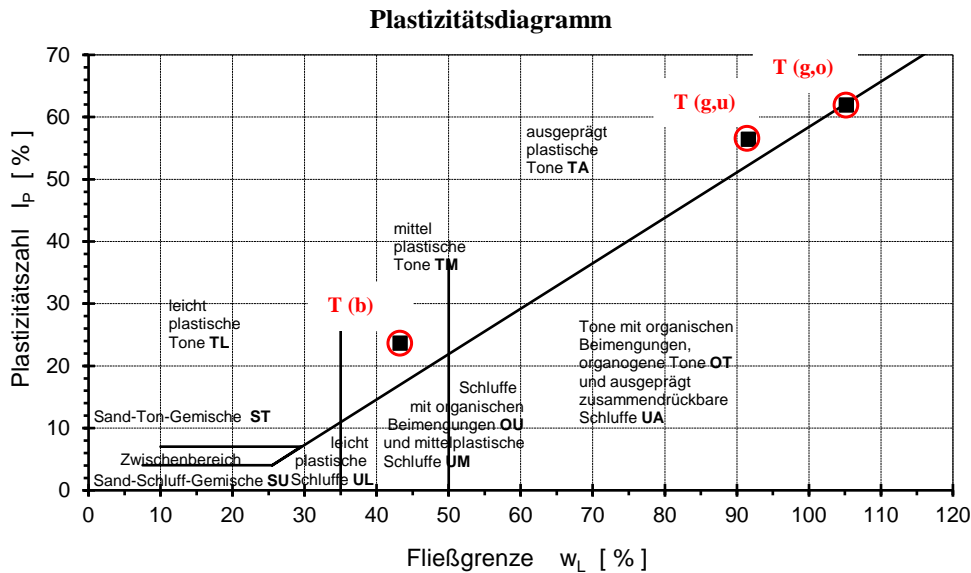


Bild 2. Plastizitätsdiagramm zur Klassifikation bindiger Böden nach DIN 18196

Fig. 2. Plasticity diagram for the classification of cohesive soils according to DIN 18196

3.2 Klassifizierung der Mineralogie und Elementanalyse

Zur Ermittlung der Ursachen für die unterschiedliche Plastizität des grünen und braunen Tons wurde zusätzlich eine mineralogische Analyse mittels Röntgendiffraktometrie durchgeführt. Auf diese Weise konnten die Hauptbestandteile der Proben qualitativ bestimmt werden. Zusätzlich wurden mithilfe einer Elementanalyse Nebenbestandteile identifiziert.

Die Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie belegen, dass oberer und unterer grüner Ton über nahezu dieselbe Zusammensetzung verfügen, deren Hauptbestandteile voraussichtlich Tiefquarz (v.a. Schluff), ein Illit mit K^+ -Ionen und ein Na^+ -Montmorillonit in Wechsellagerung mit Kaolinit sind (s. Bild 3 und Tabelle 2). Der braune Ton weist einige zusätzliche Ausschläge auf, die sich überwiegend auf einen höheren Quarz- und Kalkgehalt zurückführen lassen. Die für die Tonmineralogie charakteristischen Ausschläge sind hingegen weitgehend gleich. Diese Ergebnisse decken sich mit denen von *Pour-Naghshband* [3], wonach der Tarraston überwiegend aus Montmorillonit und Illit sowie 15-25% Kaolinit besteht. Insbesondere der Verlauf des grünen Tons ähnelt zudem Messungen von Kemp und Wagner [13] an Proben des London Clay.

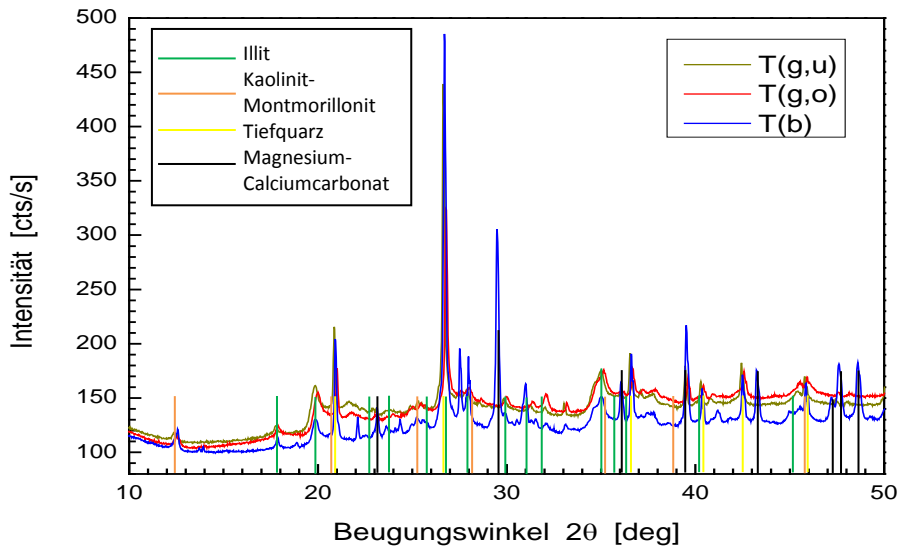


Bild 3. Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie

Fig. 3. Results of X-ray diffraction analysis

Eine Elementanalyse mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) konnte die These einer ähnlichen Tonmineralogie von grünem und braunem Ton stützen. Auch wenn die Ergebnisse mehr qualitativ als quantitativ zu betrachten sind, sprechen die hohen Übereinstimmungen für eine ähnliche Zusammensetzung beider Tonarten. Zusätzlich konnte in allen drei Proben Eisen nachgewiesen werden, dessen unterschiedliche Oxidationsstufen eine mögliche Erklärung für die unterschiedliche Färbung der Proben sind. Auch das im braunen Ton nachgewiesene Mangan kann zu dessen dunklerer Färbung beitragen.

3.3 Tonstruktur

Da die Tonmineralogie von braunem und grünem Ton offenbar nahezu gleich ist, wurde zusätzlich die innere Struktur des Tons in Betracht gezogen, um die unterschiedlichen Zustandsgrenzen in Abschnitt 3.1 zu erklären. Zu diesem Zweck wurden Tonproben sowohl mit bloßem Auge als auch unter einem Elektronenmikroskop betrachtet und die Anordnungen der Tonminerale miteinander verglichen.

Bild 4 zeigt die durch Zugspannung hervorgerufenen Bruchflächen faustgroßer Tonproben. Beim grünen Ton zeigt sich deutlich die dreidimensionale Polygonstruktur: Die Bruchfläche besteht aus zahlreichen ungleichmäßig angeordneten Plättchen und an einigen Stellen sind glatte, glänzende Flächen auszumachen, in denen die Anordnung scheinbar gleichmäßig ist. Diese Bereiche sind jedoch kaum größer als 1 cm² und zeigen keine gleichmäßige Ausrichtung. Insgesamt wirken die Oberflächen wie eine chaotische Anordnung von Schnittebenen, in denen zahlreiche Ein- und Ausbuchtungen mit mehreckigen Umrissen zu erkennen sind. Beim braunen Ton sind keine Harnischflächen auszumachen, dafür sind die Unebenheiten in den rauen Bruchflächen weniger stark ausgeprägt. Eine klare Ausrichtung der Tonplättchen ist auch hier nicht erkennbar. Stattdessen treten regelmäßig Einschlüsse aus Kalk auf. Die zunächst grün bis türkisfarbene Bruchfläche des grünen Tons verblasst nach einigen Stunden Luftkontakt, was die These von reduziertem Eisen als Ursache für die Farbgebung stützt.

T(g,o):

T(b):

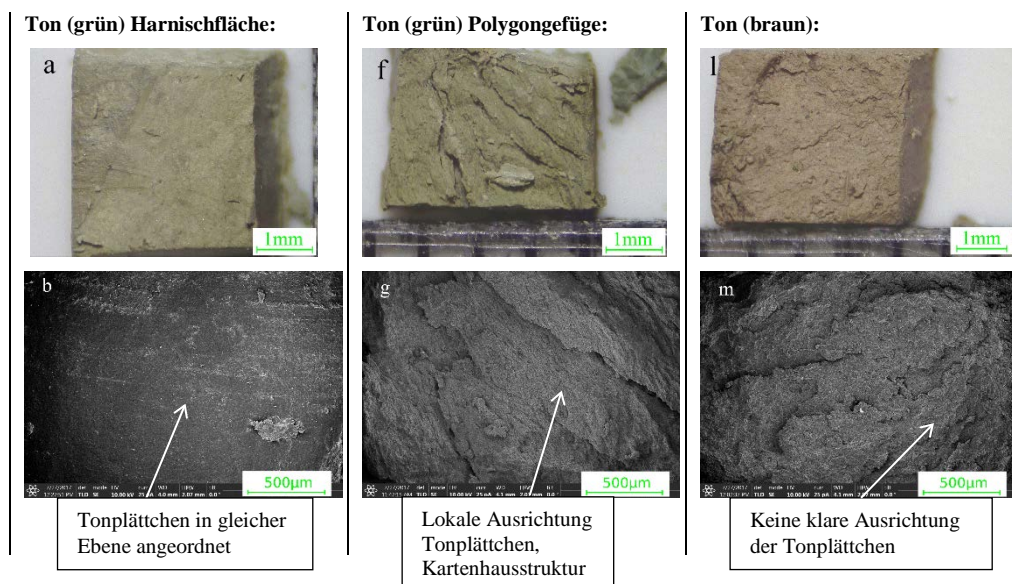


Bild 4. Bruchflächen bei Zugbeanspruchung und natürlichem Wassergehalt
 Fig. 4. Fracture surface resulting from tensile stresses at natural water content

Aus den Bruchflächen wurden ca. 4 mm x 4 mm große Stücke ausgeschnitten und bei Raumtemperatur getrocknet, um sie anschließend auf Mikroskala zu betrachten. Abbildung 5 (oben) zeigt die Ausschnitte einer Polygonfläche und einer Harnischfläche des grünen Tons sowie einen Ausschnitt aus der relativ gleichmäßigen Fläche des braunen Tons.

Die Aufnahmen des Elektronenmikroskops bestätigen den ersten Eindruck über die Ausrichtung der Tonminerale. So scheinen innerhalb der Harnischfläche tatsächlich alle Plättchen in einer Ebene angeordnet zu sein. Innerhalb dieser Ebene variieren jedoch Form, Größe und Ausrichtung der Teilchen, wie bei höherer Auflösung deutlich wird (s. Bild 5 a-e). Die von ihnen gebildete Fläche ist nicht durchgehend, sondern weist an einigen Stellen Einschnitte bzw. Risse auf.

Bei Betrachtung der Polygonstruktur ergibt sich ein anderes Bild. Die lokal offenbar vorhandene Ausrichtung der Tonminerale löst sich mit zunehmender Vergrößerung immer weiter auf und die Anordnung der eindeutig blättchenförmigen Gebilde wirkt immer mehr zufällig (s. Bild 5 f-k). Es entsteht der Eindruck einer Kartenhausstruktur mit diversen Mikroporen. Die geringen Durchmesser der Kristalle (<1 µm) und die fehlende Hexagonalform sprechen gegen größere Mengen Kaolinit, stattdessen sind Illit oder Montmorillonit bzw. eine Mischform als Haupttonmineral zu erwarten, wie es die Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie in 3.2 bereits nahelegten. Eine Kartenhausstruktur ist beim braunen Ton nicht erkennbar (s. Bild 5 l-p), stattdessen umschließen die Tonminerale größere Gebilde (s. Bild 5 o). Dabei dürfte es sich vornehmlich um Quarzkörner und Calcit handeln, die im Vergleich zum grünen Ton vermehrt nachgewiesen werden konnten. Die Lagerung wirkt beim braunen Ton insgesamt kompakter und es sind weniger Mikroporen erkennbar.



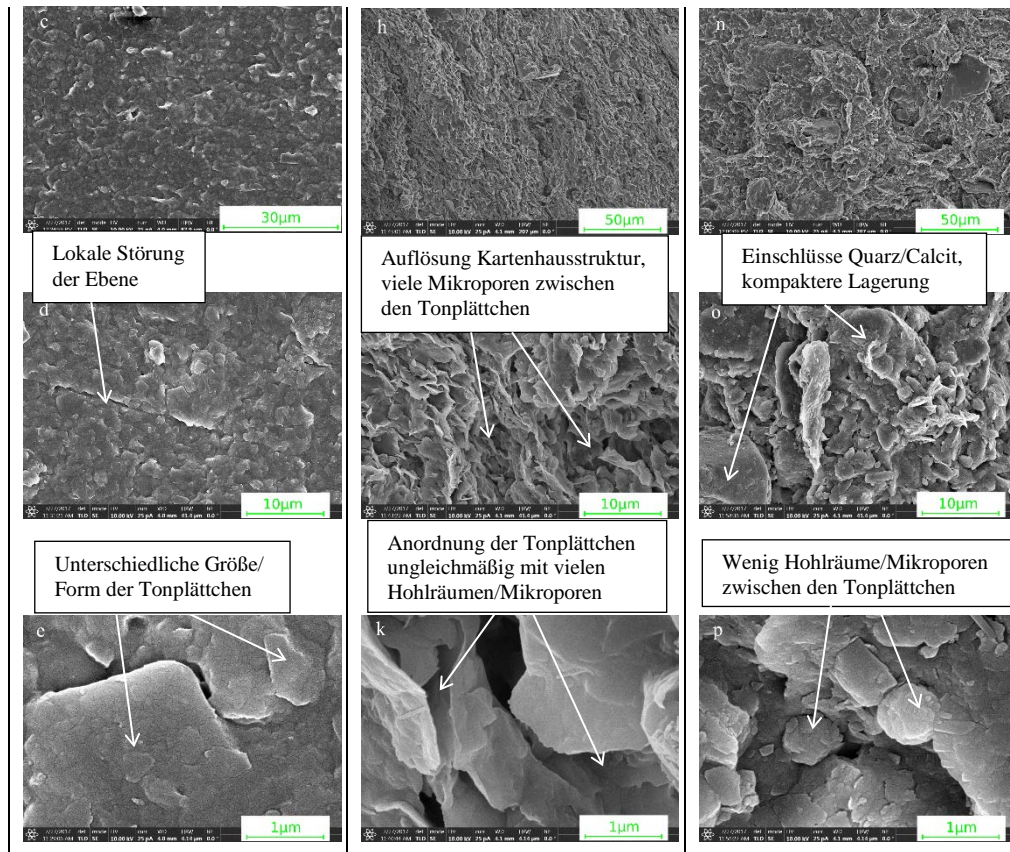


Bild 5. Elektronenmikroskopische Aufnahmen der drei Tonarten auf verschiedenen Skalen

Fig. 5. Electron microscopic pictures of all three clay samples taken at different scales

Insgesamt konnte auf Mikroebene bestätigt werden, was auf Makroebene bereits beobachtet wurde: Während oberer und unterer grüner Ton sich stark ähneln, sind im Vergleich zum braunen Ton deutliche Unterschiede erkennbar. So weist der grüne Ton eine Kartenhausstruktur aus dünnen, ungleichförmigen Tonplättchen auf, die auf Illit und/oder Montmorillonit hindeuten. Die vielen Feinporen deuten auf die Fähigkeit hin, große Wassermengen einlagern zu können. Die Kristalle des braunen Tons wirken in ihrer Form ähnlich, sind jedoch kompakter gelagert und umschließen häufiger größere Gebilde wie Quarz. Kartenhausstruktur und Feinporen sind weniger ausgeprägt als beim grünen Ton. Die Ausbildung größerer Flächen mit gleichmäßiger Ausrichtung der Kristalle konnte nur in den Harnischflächen des grünen Tons beobachtet werden.

4 Untersuchung des Quellverhaltens

4.1 Wasseraufnahmevermögen nach DIN 18132

Die Untersuchungen zur Klassifikation des grünen und braunen Tons haben eine ähnliche Korngrößenverteilung und Tonmineralogie ergeben, während bei der Plastizität deutliche Unterschiede erkennbar waren. Inwieweit auch Unterschiede in Bezug auf das Quellverhalten existieren, wurde mithilfe mehrerer Versuche zum Wasseraufnahmevermögen und Quellversuchen in Anlehnung an *Huder & Amberg* ermittelt.

Die Ermittlung des Wasseraufnahmevermögens erfolgte mithilfe eines Gerätes nach *Enslin-Neff*. Den getrockneten, pulverisierten Proben wurde dabei entionisiertes bzw. 1,2%-iges Salzwasser, entsprechend des Salzgehaltes im Fehmarnsund, zur Verfügung gestellt und die Wasseraufnahme über 24 Stunden hinweg gemessen. Da Dreischichttonminerale infolge einer regulären Trocknungstemperatur von 105°C bereits strukturelle Veränderungen erfahren, wurden die Tonproben gemäß DIN 18132 bei lediglich 60°C getrocknet. Vorherige Untersuchungen hatten ergeben, dass der Massenverlust sich in beiden Fällen kaum unterscheidet.

Die Ergebnisse in Bild 6 zeigen, dass der grüne Ton ein wesentlich höheres Wasseraufnahmevermögen besitzt als der braune. Oberer und unterer grüner Ton sind sich, wie bei nahezu allen bisherigen Untersuchungen, äußerst ähnlich. Mit Werten um die 300% weisen sie ein außerordentlich hohes Wasseraufnahmevermögen selbst für plastische Tone auf. Ungewöhnlich ist außerdem, dass die Wasseraufnahme nach 24 Stunden noch nicht zum Stillstand gekommen ist, sondern, im logarithmischen Maßstab, sogar einen steileren Anstieg aufweist als in den ersten zwei Stunden. Beides deutet auf eine starke Quellfähigkeit des grünen Tons hin und stimmt mit den bisherigen Ergebnissen sowie den Werten von *Pour-Naghshband* [3] überein. Das vergleichsweise niedrige Wasseraufnahmevermögen des braunen Tons passt zu seiner geringeren Plastizität, nicht jedoch zu den Werten von *Pour-Naghshband* [3]. Die knapp 100% deuten auf ein durchschnittliches Quellvermögen hin. Deutliche Unterschiede zwischen entionisiertem Wasser und Salzwasser konnten nicht festgestellt werden.

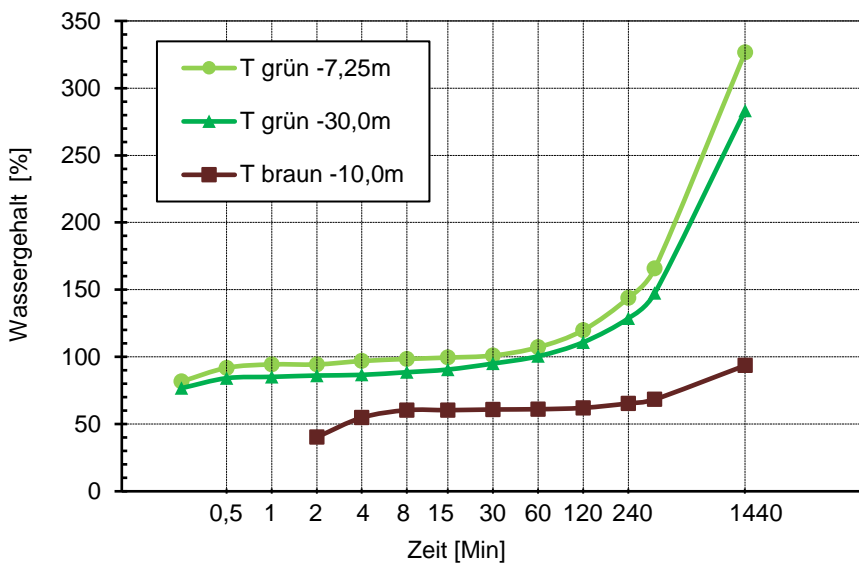


Bild 6. Wasseraufnahmeverhalten der bei 60°C getrockneten Proben (entionisiertes Wasser)

Fig. 6. Water absorption behavior of dried clay samples (dried at 60°C, deionised water added)

4.2 Quellversuch nach Huder & Amberg

Als letzter und zugleich aufwendigster Versuch in Bezug auf das Quellverhalten wurde an jeder Tonart ein Ödometerversuch zur Bestimmung des Quelldrucks nach *Huder & Amberg* durchgeführt. Dabei wurden die Proben zunächst bei ihrem in-situ Wassergehalt von 25 kPa auf 400 kPa schrittweise belastet, anschließend auf 50 kPa entlastet und wieder belastet. Um oberhalb der erwarteten Quelldrücke zu liegen und auf diese Weise deren Berechnung zu verbessern, wurde die maximale Laststufe mit 800 kPa gewählt. Ab diesem Punkt wurde den Proben nach ihrer Auskonsolidierung Wasser zugegeben, sodass ein Quellen möglich ist. Anschließend wurden die Proben feucht gehalten und schrittweise wieder entlastet.

Die Anfangsporenzahl wurde unter der Annahme bestimmt, dass die Korndichte aller drei Tonarten $2,7 \text{ g/cm}^3$ beträgt. Eine Abschätzung wurde in diesem Fall als sinnvoller erachtet als die Bestimmung mit einem Kapillarpyknometer, da diese bei quellfähigen Tonarten oft fehlerhaft ist. Es fällt auf, dass die Anfangsporenzahlen allesamt recht hoch sind (s. Tabelle 3). Der obere grüne Ton verfügt über eine höhere Porosität und eine dementsprechend niedrigere Feuchtdichte als der untere grüne Ton, was auf seine geringere Auflast in-situ zurückzuführen ist. Beim braunen Ton ist keine höhere Auflast vorhanden, trotzdem ist die Anfangsporenzahl deutlich niedriger als beim oberen grünen Ton, was die These einer insgesamt kompakteren Lagerung stützt. Anfangs- und Endwassergehalt werden jeweils nach DIN 18121-1 bestimmt. Der Sättigungsgrad liegt vor dem Versuch bei allen Proben nahe 1. Trotzdem zeigt sich, dass die

Wassergehalte der grünen Tonproben im Laufe des Versuchs zugenommen haben (s. Tabelle 3). Sie haben demnach im Zuge des Quellprozesses mehr Wasser aufgenommen als zuvor verloren. Dies lässt bereits auf einen ausgeprägten Quellvorgang schließen. Insbesondere beim unteren grünen Ton ist der Wassergehalt mit einem Zuwachs um 9% gegenüber dem Anfangszustand deutlich angestiegen. Der braune Ton hat hingegen ähnlich viel Wasser verloren wie aufgenommen.

Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme in Bild 7 zeigen zunächst einen Anstieg der Steifemoduli (Tangentenmodul) des oberen grünen Tons im unteren Lastbereich (25 bis 200 kN/m²) von 6.350 auf bis 17.650 kN/m². Bei weiterer Belastung auf bis zu 800 kN/m² nimmt der Steifemodul wieder ab auf bis zu 8.700 kN/m². Während der Entlastungsphase von 400 auf 50 kN/m² beträgt er im Schnitt 28.200 kN/m². Beim unteren grünen Ton steigt der Steifemodul zunächst von 4.100 auf 14.000 kN/m² an, verhält sich zwischen 100 und 400 kN/m² Auflast nahezu konstant, um dann im letzten Lastschritt auf 45.000 kN/m² anzusteigen. Während der Entlastungsphase verhält sich der untere grüne Ton extrem steif, hier ergibt sich ein durchschnittlicher Steifemodul von 106.000 kN/m². Dies ist genauso wie die geringere Gesamtdehnung darauf zurückzuführen, dass die Vorbelastung in-situ im Vergleich zu den Versuchsspannungen höher ausfällt. Der braune Ton zeigt ein ähnliches Spannungs-Dehnungs-Verhalten wie der obere grüne Ton: Im unteren Lastbereich steigt der Steifemodul von 7.500 auf 12.500 kN/m² an und sinkt zwischen 200 und 400 kN/m² Auflast auf 10.700 kN/m² ab, um anschließend wieder auf 14.200 kN/m² anzusteigen. Während der Entlastungsphase beträgt er durchschnittlich 27.900 kN/m². Die Kompressionsbeiwerte liegen zwischen 0,05 und 0,3; die Schwellbeiwerte zwischen 0,005 und 0,03 (s. Tabelle 3). Damit handelt es sich bei allen drei Tonarten um vergleichsweise kompressible Böden. Das Zeit-Setzungs-Diagramm zeigt jedoch, dass die Konsolidierung beim braunen Ton deutlich schneller voranschreitet als beim grünen Ton (s. Bild 7). Dies spricht für eine erhöhte Permeabilität und stützt die These von einem geringeren Anteil an Mikroporen beim braunen Ton. Insbesondere in der Entlastungsphase, in der die Quellprozesse stattfinden, sind dessen Hebungen nicht nur früher abgeschlossen, sondern auch deutlich schwächer ausgeprägt. Fallen sie beim grünen Ton erheblich höher aus als die zuvor erfolgten Setzungen, erreicht der braune Ton auch bei vollständiger Entlastung nicht die Anfangsprobenhöhe.

Die Quelldrücke der drei Tonproben wurden nach *Paul* [14] berechnet. Dazu wird der Entlastungspfad nach Wasserzugabe linearisiert, indem eine Gerade durch die Punkte bei 400 kN/m² und 25 kN/m² gelegt wird. Anschließend wird der Wiederbelastungspfad zwischen den Laststufen 200 kN/m² und 400 kN/m² ebenfalls linearisiert und soweit verschoben, dass er durch den Punkt bei 800 kN/m² verläuft. Der Punkt, an dem sich die beiden Geraden schneiden, markiert die Höhe des Quelldrucks. Er beträgt beim braunen Ton rund 140 kN/m² und liegt damit im Bereich der Spannungen, die in der Tiefe der Entnahmestelle herrschen. Für den grünen Ton hingegen ergeben sich Quelldrücke in Höhe von 550 bzw. 900 kN/m² (s. Tabelle 3). Damit liegen sie in beiden Fällen mindestens 300 bis 400 kN/m² oberhalb der Spannungen, denen sie in der jeweiligen Tiefe ausgesetzt sind. In der Natur wird der Quellvorgang also nicht etwa durch zu hohe Auflasten verhindert, sondern weil offenbar nicht ausreichend Wasser zur Verfügung steht.

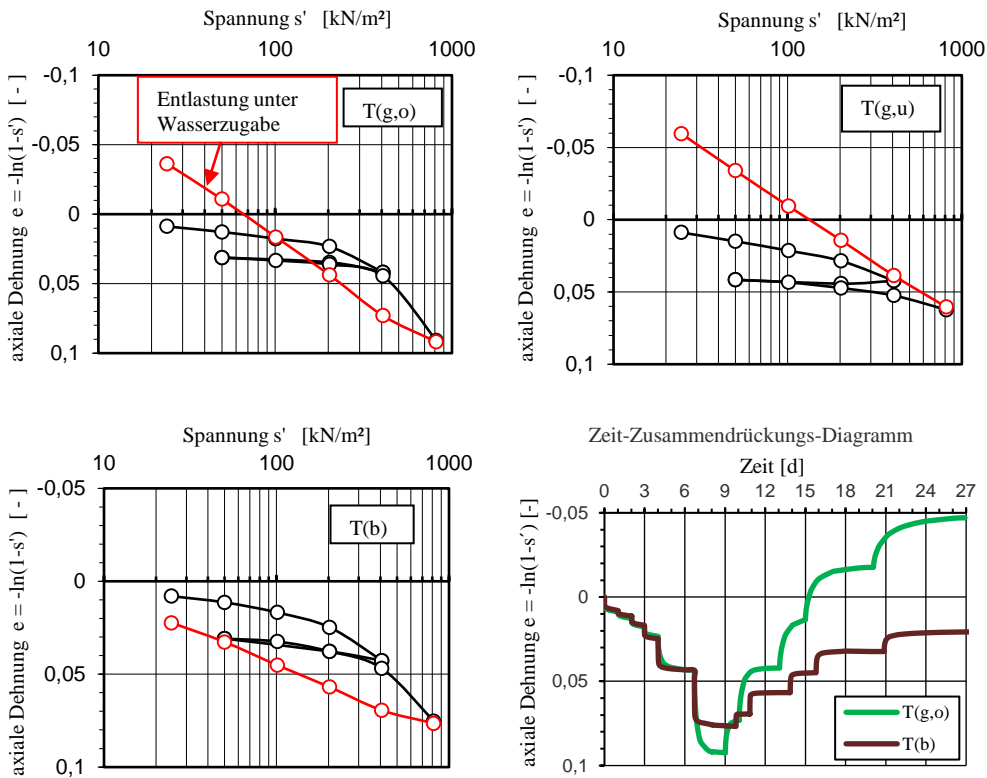


Bild 7. Spannungs-Dehnungs-Diagramme und Zeit-Zusammendrücks-Diagramm für grünen und braunen Ton

Fig. 7. Stress-strain-curves and Time-settlement-curves of the clay samples

5 Diskussion der Ergebnisse

5.1 Ursachen des Quellverhaltens

Die Ergebnisse des Quellversuchs passen insgesamt gut zu denen der übrigen Versuche. So stufen *Jones* und *Terrington* [15] den London Clay in Abhängigkeit seiner Plastizitätszahl in mittelmäßig quellfähig (20-40%), stark quellfähig (40-60%) und sehr stark quellfähig (>60%) ein. *Taylor* und *Smith* [16] berücksichtigen zusätzlich den Tongehalt des Bodens. Angewendet auf die Ergebnisse in Abschnitt 3.1 müsste es sich bei dem grünen Ton um einen stark bis sehr stark quellfähigen Boden handeln, während der braune Ton als gering bis mittelmäßig quellfähig einzustufen ist. Diese Einstufungen konnten durch den Quellversuch bestätigt werden. Die Plastizität scheint somit recht zuverlässige Aussagen über die Quellfähigkeit eines Bodens zu ermöglichen, während Kornverteilung oder Tonmineralogie in allen drei Fällen zu einer ähnlichen – und damit falschen – Einstufung geführt hätten.

Da sowohl grüner als auch brauner Ton vor dem Versuch einen Sättigungsgrad von nahezu eins aufwiesen, scheiden verschiedene Anfangszustände als Ursache für das unterschiedliche Quellverhalten aus. Gegen eine solche Erklärung spricht auch das stark abweichende Wasseraufnahmevermögen, welches in getrocknetem Zustand, also unter gleichen Anfangsbedingungen, ermittelt wurde. Auch dieser Versuch hatte für den grünen Ton eine sehr hohe, für den braunen hingegen nur eine durchschnittliche Quellbereitschaft prognostiziert und kann somit als zuverlässiger Indikator gelten.

In jedem Fall kann der grüne Ton sicher als Tarraston eingestuft werden, während der hier untersuchte braune Ton aufgrund seines hohen Kalkgehalts sowie der niedrigen Werte für Plastizität und Quellfähigkeit nicht als solcher einzustufen ist. Welche Ursachen für das unterschiedliche Quellverhalten der beiden Tonarten infrage kommen, die sich in Bezug auf Kornverteilung, Tonmineralogie, Organikgehalt und Spannungs-Dehnungs-Verhalten eigentlich stark ähneln, wird im Folgenden näher diskutiert.

Am auffälligsten ist der höhere Kalkgehalt des braunen Tons, der laut *Lutenegger* [17] jedoch keinen Einfluss auf die Quellfähigkeit eines Tons haben sollte. Die 16% Massenanteil könnten jedoch beim Tongehalt und damit der spezifischen Oberfläche fehlen, auch die Austauschaktionen des Tons werden durch den Kalk möglicherweise verändert. Beides kann das Quellverhalten erheblich beeinflussen.

Der hohe Kalkgehalt spricht außerdem für eine andere Entstehungs- bzw. Entwicklungsgeschichte gegenüber dem grünen Ton. Zusammen mit den etwas höheren und ungleichförmigeren Beimengungen aus Sand deutet er auf eine teilweise Durchmischung oder eine spätere Ablagerung zusammen mit dem Geschiebemergel hin. In diesem Fall wäre u.a. von einer deutlich geringeren Vorbelastung auszugehen, welche ebenfalls das Quellverhalten beeinflusst.

Das fehlende Polygongefüge unterstützt die These von verschiedenen Entstehungsgeschichten. Die Aufnahmen der Mikrostruktur haben zudem gezeigt, dass der braune Ton weniger Mikroporen und keine Kartenhausstruktur besitzt, sondern stattdessen über eine kompakte Lagerung mit mehr Makroporen verfügt, was sich in einer höheren Dichte und Permeabilität ausdrückt. Ob die Mikrostruktur bei sonst gleichen Eigenschaften einen Einfluss auf das Quellverhalten hat, kann an dieser Stelle nicht abschließend geklärt werden. Dagegen spricht, dass die pulverisierten Proben des grünen und des braunen Tons ein unterschiedliches Wasseraufnahmevermögen zeigten, obwohl die Kartenhausstruktur in diesem Fall weitgehend zerstört sein sollte.

5.2 Vergleich mit London Clay

Der London Clay wird in der Literatur als ein mittel bis stark schluffiger Ton beschrieben [18], der ebenso wie der Tarraston vor rund 50 Millionen Jahren im Nordseebecken abgelagert wurde. Tonmineralogisch besteht er hauptsächlich aus Illit und Smectit [5], Kalk und Organik hingegen sind üblicherweise nicht enthalten. Das Quellverhalten variiert je nach Region; Gebiete mit stark quellfähigem London Clay treten vor allem im Südosten Großbritanniens auf [19]. Untersuchungen an verschiedenen Formen des London Clay zeigen eine starke Korrelation zwischen den Quelldehnungen und der Plastizität bzw. dem Tongehalt [17]. Es wurden jedoch auch Formen mit relativ geringem Tonanteil und dennoch hoher Plastizität und Quelldehnung angetroffen [19]. Der Fall eines hohen Tonanteils (>70%) und niedriger Plastizität findet sich in den oben genannten Untersuchungen hingegen nicht. Die Entnahmetiefe spielt keine wesentliche Rolle für das Quellverhalten [15].

Vergleichbar mit einem polygonalen Bruchgefüge weisen Proben des London Clay oft Unregelmäßigkeiten in Form von Zerklüftungen auf, die scheinbar zufällig angeordnet sind [2]. Als Ursache werden je nach Ausrichtung die Spannungen infolge geologischer Verfaltungen genannt oder auch Unterschiede bei der Ablagerung. Bei elektronenmikroskopischen Aufnahmen zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen Proben mit hohem Tonanteil und eher schluffig-sandigen Exemplaren [20]. Im letzteren Fall sind die Tonplättchen vermehrt um Quarzeinschlüsse angeordnet und Mikroporen tendenziell seltener. Eine lokale Ausrichtung der Tonplättchen tritt vor allem bei Proben mit weniger Einschlüssen auf [2], [20]. Eindeutige Zusammenhänge zwischen der Tonstruktur und dem Quellverhalten konnten beim London Clay bisher nicht festgestellt werden.

In Bezug auf Zusammensetzung, Tonmineralogie, Mikrostruktur und Quellverhalten ergibt sich eine hohe Übereinstimmung zwischen den hier untersuchten Proben des grünen Tarrastons und einigen besonders quellfähigen Formen des London Clay im Südosten Englands. Diese Formen mit hohem Tonanteil sind vor allem im London-Becken anzutreffen; Plastizität und Quelldehnung weisen ähnliche Werte auf wie beim grünen Tarraston. Die Übereinstimmung der Versuchsergebnisse des braunen Tons mit den Literaturwerten des London Clay ist hingegen gering. Zwar existieren im Hampshire-Becken im Süden Englands Formen mit ähnlich niedriger Plastizität und Quelldehnung, ihr Tonanteil ist mit 20-50% jedoch deutlich

niedriger als beim braunen Ton. Dessen hoher Kalkgehalt widerspricht zudem der These, die Entstehungsgeschichte des braunen Tons sei dieselbe wie beim London Clay.

5.3 Folgen für Baumaßnahmen

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten ist bei grünem und braunem Ton ähnlich. Aufgrund ihrer geringen Steifigkeit, der damit verbundenen hohen Dehnungen sowie der geringen Durchlässigkeit sind beide als kritischer Baugrund einzustufen. Zwar ist die Bearbeitbarkeit bei natürlichem Wassergehalt möglich, bei einer Veränderung ist jedoch mit erheblichen Schrumpfungen bzw. Quelldehnungen zu rechnen. Letztere sind beim grünen Ton sehr viel stärker ausgeprägt. Hier kann der Kontakt mit Wasser dazu führen, dass extreme Quelldrücke entstehen, die durch die natürliche Auflast nicht ausgeglichen werden können. Beim braunen Ton hingegen sind die maximalen Quelldrücke geringer, sodass die derzeitige Auflast ausreicht, um Quellvorgänge weitgehend zu unterbinden. Die resultierenden Hebungen wären zudem deutlich geringer als beim grünen Ton.

6 Fazit

6.1 Erkenntnisse zum Quellverhalten

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass das Quellverhalten der im Fehmarnsund angebotenen Tonarten stark variiert. Die Entnahmetiefe ist dabei nicht entscheidend; der als stark quellfähig eingestufte grüne Tarraston wurde in Tiefen von unter 10 m bis über 30 m angetroffen. Die für ihn berechneten Quelldrücke waren mit 550 bis 900 kN/m² deutlich höher als die aktuellen Überlagerungsspannungen; bei zusätzlichem Wasserkontakt ist mit starken Quellhebungen zu rechnen. Der Salzgehalt des Wassers spielt dabei offenbar nur eine untergeordnete Rolle. So wurde für jede der drei Tonarten ein zweiter Quellversuch an Proben desselben Bohrkerns durchgeführt, wobei die zweite Probe während der Entlastungsphase mit 1,2%-igem Salzwasser beaufschlagt wurde. Dabei ergaben sich tendenziell höhere Quelldrücke, eindeutige Zusammenhänge waren jedoch nicht erkennbar.

Die Entstehungsgeschichte des Tarrastons stimmt höchstwahrscheinlich mit der des London Clay überein. So konnten nicht nur beim Quellverhalten, sondern auch bei der Tonmineralogie, dem Kalk- und Organikgehalt sowie der Mikrostruktur weite Übereinstimmungen festgestellt werden.

Während beim London Clay eine gute Korrelation zwischen Tongehalt und Quelldehnungen besteht, wurde im Fehmarnsund ein brauner Ton angetroffen, der trotz hohem Tongehalt nicht als Tarraston eingestuft werden konnte. Er ist in Tiefen von ca. 10 m anzutreffen und weist eine sehr ähnliche Kornverteilung und Tonmineralogie auf wie der grüne Tarraston. Seine Quellfähigkeit ist jedoch deutlich geringer, was niedrige Werte bei Plastizität und Wasseraufnahmevermögen bereits andeuten. In Bezug auf das Quellverhalten bieten diese Laborversuche somit weit zuverlässigere Indikatoren als die Kornverteilung.

Als Ursache für die unterschiedlichen Quelldehnungen und -drücke wurden verschiedene Thesen diskutiert. So deutet der hohe Kalkgehalt des braunen Tons auf eine andere Entstehungs- und Lastgeschichte hin. Sein Verformungsverhalten ist dem des grünen Tons jedoch sehr ähnlich. Ob die rund 16 % Kalk ausreichen, das deutlich abweichende Quellverhalten allein über einen verringerten Tongehalt zu erklären, ist fraglich. So werden in der Literatur Formen des London Clay genannt, die trotz Tonanteilen um die 50% eine deutlich höhere Plastizität und Quelldehnung aufweisen als der braune Ton. Unterschiede gegenüber dem grünen Ton konnten zudem bei der Makro- und Mikrostruktur festgestellt werden. So verfügt der grüne Ton über ein polygonales Bruchgefüge mit diversen kleinen Harnischflächen, bei welchen alle Tonplättchen in einer Ebene angeordnet sind, sowie eine weitgehend ungestörte Kartenhausstruktur. Beides ist beim braunen Ton nicht oder nur ansatzweise vorhanden. Ob und inwiefern dies das Quellverhalten beeinflusst, konnte nicht abschließend geklärt werden. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig.

6.2 Weiterer Forschungsbedarf

Die Ergebnisse der Untersuchungen werfen die Frage auf, durch welche Faktoren die Quellfähigkeit eines Bodens so entscheidend beeinflusst wird, dass sich die Unterschiede zwischen grünem und braunem Ton trotz ähnlichem Tonanteil erklären lassen. Um die Tonmineralogie als Ursache sicher auszuschließen, wäre eine genaue qualitative und quantitative Bestimmung der Tonminerale nötig. Zudem wäre ein Vergleich der spezifischen Oberfläche beider Tonarten sinnvoll. Um den Einfluss der Mikrostruktur auf das Quellverhalten zu untersuchen, ist ein umfangreicher Vergleich von Proben des grünen Tarrastons mit dem braunen Ton erforderlich. Dabei sollten sowohl intakte als auch pulverisierte Proben untersucht und verschiedene Sättigungsstufen betrachtet werden. Interessant sind außerdem die Frage nach der Entstehung der Polygonstruktur des Tarrastons sowie die Entstehungsgeschichte des kalkreichen, braunen Tons.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Bahn und dem Ingenieurbüro BBI für die Zurverfügungstellung von Tarrasproben im Zuge der Bohrkampagne zum Fehmarnsundprojekt.

Literatur

- [1] Kammer, J.; Frederiksen, J.K.; Hansen, G.L.; Hammami, R.; Morrison, P.; Mortensen, N.; Skjellerup, P.: Fehmarnbelt Fixed Link. Geotechnical Investigations. 12th Baltic Sea Conference Germany, 2012.
- [2] Gasparre, A.: Advanced Laboratory Characterisation of London Clay. Imperial College London, Department of Civil and Environmental Engineering, 2005.
- [3] Pour-Naghshband, G. R.: Tonmineralbestand und Baugrundeigenschaften der Tarrastone, Beckentone und des Geschiebemergels in Teilgebieten Schleswig-Holsteins. Dissertation Christian-Albrechts-Universität Kiel, 1977.
- [4] Jasmund, K.; Lagaly, G.: Tonminerale und Tone. Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt. Darmstadt: Steinkopff Verlag, 1993.
- [5] Gasparre, A.; Nishimura, S.; Coop, M.R.; Jardine, R.J.: The influence of structure on the behaviour of London Clay. *Geotechnique* 57 (1) (2007), S. 19-31.
- [6] Takahashi, A.; Jardine, R.J.; Fung, D.W.H.: Swelling effects on mechanical behaviour of natural London Clay. *Proc. 16th Int. Conf. Soil Mech. Osaka* (2005), S. 443-446.
- [7] Duphorn, K.; Kliewe, H.; Niedermeyer, R.; Janke, W.; Werner, F.: Sammlung Geologischer Führer 88. Die deutsche Ostseeküste. Berlin-Stuttgart: Gebr. Bornträger, 1995.
- [8] Stephan, H.-J.: Zur Entstehung der eiszeitlichen Landschaften Schleswig-Holsteins. *Schriften des Naturwissenschaftlichen Vereins für Schleswig-Holstein* 68 (2003), S.101-118.
- [9] Mattheß, G.; Ubell, K.: Allgemeine Hydrogeologie Grundwasserhaushalt. Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 1. Gebr. Bornträger, 1992.
- [10] Matthes, S.: Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. Springer-Lehrbuch, 1993.
- [11] Schachtschabel, P.; Blume, H.-P.; Brümmer, G.W.; Hartge, K.H.; Schwertmann, U.: Scheffer/Schachtschabel. Lehrbuch der Bodenkunde. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1997.
- [12] Sorensen, K.K.; Okkels, N.: Correlation between drained shear strength and plasticity index of undisturbed overconsolidated clays. *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Innovations in Geotechnics* (1) (2013), S. 423-428.
- [13] Kemp, S.J.; Wagner, D.: The mineralogy, geochemistry and surface area of mudrocks from the London Clay Formation of southern England. *British Geological Survey Internal Report, IR/06/060* (2006).
- [14] Paul, A.: Empfehlung Nr. 11 des Arbeitskreises 19 - Versuchstechnik Fels - der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. Quellversuche an Gesteinsproben. *Bautechnik* 3 (1986). S. 100-105. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften.
- [15] Jones, L.D.; Terrington, R.: Modelling volume change potential in the London clay. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 44 (1) (2011), S. 109-122.
- [16] Taylor, R.K.; Smith, T.J.: The engineering geology of clay minerals; swelling, shrinking and mudrock breakdown. *Clay Minerals* 21 (3) (1985), S. 235-260.
- [17] Lutenecker, A.J.: Geochemistry and Geotechnical Characteristics of London Clay from Heathrow Airport. *Proceedings of the TC105 ISSMGE International Symposium on Geomechanics from Micro to Macro, Vol. 2* (2014), S. 1261-1266.
- [18] Zhang, X.; Mavroulidou, M.; Gunn, M. J.: A study of the water retention curve of lime-treated London

Clay. *Acta Geotechnica* 12 (2016), S. 23–45.

[19] *Freeborough, K. A.; Jones, L. D.*: Determination of the shrinking & swelling properties of the London Clay Formation. British Geological Survey Internal Report, IR/06/058 (2006).

[20] *Bouch, J.E.*: SEM petrography of samples of the London Clay of Southern England. British Geological Survey 42 pp., IR/05/126 (2005).

Tabellen

Tabelle 1. Zustandsgrenzen und Bodenklassifikation der Tonproben

Table 1. State boundaries and soil classification of the clays investigated

Bodenprobe	T (g,o)	T (g,u)	T (b)
Fließgrenze w_L	105,2%	91,6%	43,3%
Ausrollgrenze w_P	43,4%	35,2%	19,7%
Schrumpfgrenze w_S	21,1%	18,8%	14,7%
Plastizitätszahl I_p	61,8%	56,4%	23,6%
Schrumpfmaß V_s	38,2%	30,4%	20,9%
natürlicher Wassergehalt w_N	43,0%	38,1%	24,7%
Konsistenzzahl I_C	1,01	0,95	0,79
Konsistenz	halbfest	steif	steif
Klassifikation	ausgeprägt plastischer Ton	ausgeprägt plastischer Ton	mittelplastischer Ton

Tabelle 2. Bestandteile der Tonproben

Table 2. Mineral components of the clay samples

Mineral	Chemische Formel
Illit	$(K, H_3O) Al_2Si_3AlO_{10} (OH)_2$
Kaolinit-Montmorillonit	$Na_{0,3}Al_4Si_6O_{15} (OH)_6 \cdot 4H_2O$
Tiefquarz	Si_3O_6
Magnesium-Calciumcarbonat	$(Mg_{0,03}Ca_{0,97}) (CO_3)$

Tabelle 3. Dichte, Wassergehalt und Quelldruck der Ödometerproben

Table 3. Density, water content and swelling pressure of oedometer samples

Bodenart	T(g,o)	T(g,u)	T(b)
Anfangsporenzahl [-]	1,065	0,874	0,817
Anfangsfeuchtdichte [g/cm ³]	1,837	1,910	1,982
Anfangswassergehalt [%]	40,5	32,5	33,4
Anfangs sättigungsgrad [-]	1,027	1,006	1,103
Endwassergehalt [%]	46,9	41,3	31,2
Kompressionsbeiwert C_c [-]	0,293	0,052	0,160
Schwellbeiwert C_s [-]	0,027	0,006	0,024
Quelldruck [kN/m ²]	550	900	140

Autoren

Svenja Steding, M.Sc.

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ

Sektion 3.4 – Fluidsystemmodellierung

Telegrafenberg

14473 Potsdam

ssteding@gfz-potsdam.de

Dipl.-Geol. Göta Bürkner

Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH)

Institut für Geotechnik und Baubetrieb

Harburger Schloßstraße 20

21079 Hamburg

buerkner@tuhh.de

Tom Törzs, M.Sc.

Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH)

Institut für Geotechnik und Baubetrieb

Harburger Schloßstraße 20

21079 Hamburg

tom.toerzs@tuhh.de

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Grabe

Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH)

Institut für Geotechnik und Baubetrieb

Harburger Schloßstraße 20

21079 Hamburg

grabe@tuhh.de