

Untersuchung der Quellempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine bei der Verwendung als Erdbaustoff

FA 5.190

Forschungsstelle: Technische Universität München, Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm), MPA BAU (Prof. Dr.-Ing. C. Gehlen)
 Bearbeiter: Heyer, D. / Birle, E. / Möller, P.
 Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn
 Abschluss: November 2018

1 Aufgabenstellung

Um die Entnahme und Nutzung natürlicher Rohstoffe nachhaltiger zu gestalten und damit die Umweltbelastungen zu reduzieren, soll die Verwendung bautechnisch weniger geeigneter und bereits vor Ort anstehender Erdbaustoffe vorangetrieben werden. Zu diesen Baustoffen zählen auch die veränderlich festen Gesteine, die vor allem in Süd- und Mitteldeutschland in nicht unerheblichem Umfang oberflächennah anstehen und damit einen wesentlichen Teil der verfügbaren Erdbaustoffe darstellen. Ihr Einsatz ist aufgrund fehlender Erfahrungen sowohl zum Trag- und Verformungsverhalten als auch zum Quellverhalten noch zögerlich, sodass bisweilen eine Deponierung oder Grubenverfüllung vorgezogen wird.

Die Problematik veränderlich fester Gesteine besteht darin, dass sich ihre bodenmechanischen Eigenschaften nach dem Lösen aus dem Gebirgsverband unter Witterungseinflüssen unterschiedlich stark verändern können. Bereits wenige Wechselvorgänge zwischen Austrocknung und Befeuchtung, die während der Bauzeit und den damit verbundenen Erdbauprozessen (Lösen, Laden, Fördern, Zwischenlagern, Einbauen und Verdichten) stattfinden können und oft nicht zu vermeiden sind, führen zu veränderlichen Festigkeitseigenschaften, die einen mehr oder weniger starken Zerfall derartiger Gesteine bewirken. Diese Änderungsprozesse können während einer jahrzehntelangen Nutzung zunächst zu Sackungen beziehungsweise Quellhebungen und infolge fortschreitender Verwitterung zu anhaltenden Verformungen in Erdbauwerken führen.

Bereits in vorhergehenden Forschungsuntersuchungen (unter anderem Stiegeler et al., 2006; Möller und Heyer, 2014; Bönsch, 2006) wurde festgestellt, dass die bodenmechanischen Eigenschaften stark von ihrer Zusammensetzung und den inneren Bindungskräften sowie vom Einbauzustand (Einbauwassergehalt, Einbaudichte) und dem vorliegenden Verwitterungszustand abhängen. Zum anderen wurde festgestellt, dass bei veränderlich festen Gesteinen das Quellvermögen sogar erst durch eine Lösung der diagenetischen Verbindungen, zum Beispiel infolge von Rissbildung durch Austrocknung, durch Zerfall infolge von Verwitterungsvorgängen (Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel) und durch mechanische Einwirkung (Entlastung bei Freilegung, Aufbereitung und Verdichtung) aktiviert werden kann. Um veränderlich feste Gesteine im Erdbau oberflächennah einsetzen zu können, sollte demnach auch ein mögliches Quellpotenzial berücksichtigt werden. Insbesondere können die mit erheblichen Volumenvergrößerungen verbundenen Quellvorgänge bei veränderlich festen Gesteinen zu Schäden an Erdbauwerken und damit zu einer Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit führen.

Ursächlich für die mit erheblichen Volumenvergrößerungen verbundenen Quellvorgänge bei veränderlich festen Gesteinen sind Anteile an quellfähigen Tonmineralen oder chemische Quellprozesse, wie zum Beispiel die Umwandlung von Anhydrit zu Gips. Es gibt eine Vielzahl von Publikationen, die sich mit dem Quellverhalten quellfähiger Böden und Gesteine, vor allem im Bereich des Tunnelbaus (zum Beispiel Rauh, 2009) aber auch bei anstehenden Gesteinen (zum Beispiel Pimentel, 1996), beschäftigen. Allerdings fehlen für veränderlich feste Gesteine, die als Erdbaustoff wieder eingebaut und verdichtet werden sollen, systematische Untersuchungen zum Quellvermögen in Abhängigkeit vom Einbauzustand und Verwitterungsgrad.

Um eine erdbautechnische Verwendung zu ermöglichen, soll daher mithilfe der durchgeführten Forschungsarbeiten (STIEGELER et al., 2006 sowie Möller und Heyer, 2014) und der in der Arbeit vorgestellten Untersuchungen aufgezeigt werden, dass eine Verwendung veränderlich fester Gesteine als Erdbaustoff grundsätzlich möglich ist. Die Arbeit soll Klassifikationsmöglichkeiten zur Beschreibung der spezifischen Veränderlichkeit als auch erdbautechnische Anforderungen zur Verwendung derartiger Gesteine und Böden aufzeigen.

2 Untersuchungsmethodik

Die Zielsetzung des Forschungsvorhabens war es, das Quellvermögen von ausgewählten veränderlich festen Gesteinen in Abhängigkeit vom Einbauzustand (Einbauwassergehalt und Einbaudichte) und Verwitterungszustand zu untersuchen.

Für die Quelluntersuchungen wurden zunächst fünf Böden aus Bauvorhaben oder Lagerstätten gewonnen: Opalinustonstein, Bentonit, dunkelroter Mergel, Emscher Mergel und Feuerletten-Zersatz. An den Böden wurde jeweils eine bodenmechanische Klassifizierung mit Bestimmung der Korngrößenverteilung, der Plastizitätsgrenzen, des Wasseraufnahmevermögens, der Korndichte sowie eine Analyse der tonmineralogischen Eigenschaften durchgeführt. Zur Charakterisierung der Veränderlichkeit der Böden wurden qualitative Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel sowie quantitative Versuche wie der Siebtrommelversuch nach TP BF-StB, Teil C 20 sowie der Trocknungs-Befeuchtungs-Versuch nach Nickmann durchgeführt. Auf Basis der Klassifikationsuntersuchungen und den Verwitterungsversuchen wurden für die Quellversuche Opalinustonstein, Bentonit, dunkelroter Mergel und Feuerletten-Zersatz ausgewählt.

An diesen vier neuen Böden sowie den zwei weiteren Böden Tonmergelstein und tertiärer Ton aus der Forschungsarbeit von Möller und Heyer (2014) wurden zunächst die Proctorkurven für die vorhandenen Verwitterungszustände ermittelt, um die zwei Einbauzustände (Proctoroptimum und Verdichtungsgrad $D_{Pr} = 97\%$ auf der trockenen Seite des Proctoroptimums) festzulegen. Verwitterungszustand 1 (VZ 1) definiert den unverwitterten Ausgangszustand beziehungsweise Zustand bei Probenentnahme. Verwitterungszustand 2 nach Möller und Heyer (2014) blieb hier unberücksichtigt. Für die Verwitterungszustände 3 (VZ 3) und 4 (VZ 4) sollte der Zerfallsverlauf des Bodens bis zu einer Grenzkurve, wo der Zerfall weitgehend abgeschlossen ist, ermittelt werden. Hierzu wurden die Materialien im

Labor künstlich verwittert, indem sie einem beziehungsweise mehreren Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln unterzogen wurden. Die Vorgehensweise wurde bereits in den Untersuchungen nach Möller und Heyer (2014) angewendet. Für VZ 3 sollten ca. 50 % des zu erwartenden Zerfalls eingetreten sein. Damit sollte der Zerfall eines veränderlich festen Gesteins durch Zwischenlagerung simuliert werden. Für VZ 4 sollten ca. 90 % des zu erwartenden Zerfalls eingetreten sein, was den Grenzzustand eines fast vollständig verwitterten Materials entspricht.

Zur Ermittlung der Beziehung zwischen Quelldruck und Quelldehnung wurden für VZ 1 und VZ 3 kombinierte Quelldruck-Quellhebungs-Versuche in Großödometern mit einem Durchmesser von 30 cm und einer Probenhöhe von 6 cm durchgeführt. Dazu wurde zunächst der Quelldruck bei behinderter axialer Dehnung gemessen. Anschließend wurde die Probe stufenweise entlastet, wobei die Quelldehnungen unter dem jeweiligen Druck ermittelt wurden. Die Druckspannungen für die zu ermittelnden Quelldehnungen wurden in Abhängigkeit des maximalen Quelldrucks gewählt.

Da die Proben im VZ 4 aufgrund des hohen Feinkornanteils oft zu undurchlässig waren und eine Quelldruckentwicklung mit Auf-sättigung einer 6 cm hohen Probe auch nach Wochen nicht abgeschlossen war, mussten die Versuche in Standard-Ödometern mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Probenhöhe von 2 cm durchgeführt werden. Die Regelungstechnik der softwaregesteuerten Pressengeräte war auf die kleineren Kräfte nicht ausgerichtet, sodass mechanische Belastungsbänke zum Einsatz kamen. Eine direkte Beziehung zwischen Quelldruck und Quelldehnung konnte daher für diese Versuche nicht eindeutig ermittelt werden, da beide Kenngrößen an zwei statt an einer Probe ermittelt wurden. Um beide Verfahren zu vergleichen, wurden am VZ 4 des tertiären Tons und Feuerletten-Zersetztes beide Versuchsarten durchgeführt.

Der Einfluss von Verwitterungsvorgängen im verdichteten Zustand auf die Quelldehnungen wurde an zwei Böden mit vergleichbaren Einbaubedingungen (Tonmergelstein, Opalinustonstein) untersucht. Dazu wurden die Proben im Großödometer unter konstanter Auflastspannung von 50 kN/m² sechs Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln unterzogen, wobei die Trocknung mittels Druckluft und die Befeuchtung durch Wasserzugabe über die Basis der Probe erfolgte. Die beiden Versuche dauerten jeweils ca. drei Monate.

3 Untersuchungsergebnisse

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit hat sich aus den kombinierten Quelldruck-Quellhebungs-Versuchen ein linearer Zusammenhang zwischen Quelldruck und Quelldehnung ergeben. Mit zunehmendem Quelldruck nehmen auch die Quelldehnungen zu, wobei der Quelldruck maßgeblich von den beiden Faktoren Einbau- und Verwitterungszustand abhängt.

Die Höhe des Quelldrucks wird durch den Porenraum und die spezifische Oberfläche der Tonminerale bestimmt. Je höher der Luftporenanteil im Boden ist, desto mehr Wasser kann in den Porenraum aufgenommen werden. Damit zeigte sich wie bereits bei den Kompressionsversuchen von Möller und Heyer (2014), dass die trockenen Einbaubedingungen und damit großen

Porenanteile den Wasserzutritt und somit das Potenzial zum Quellen und Sacken begünstigen. Schlussfolgernd wäre eine Begrenzung des Luftporenanteils von $n_a < 6$ Vol.-% zur Reduzierung von Verformungen weiterhin anzustreben. Eine Zunahme der Quelldrücke und damit Quellhebungen wurde auch bei Zunahme des Verwitterungszustands und damit bei Zunahme des Feinkornanteils festgestellt. Denn je höher der Feinkornanteil eines Bodens und damit seine spezifische Oberfläche ist, desto mehr Wasser kann an die Oberfläche der zugänglichen Tonminerale angelagert werden. Um also Quellhebungen zu vermeiden, ist eine Vorverwitterung im Sinne einer Zwischenlagerung ohne Schutzmaßnahmen nicht zielführend, wenn dabei der Feinkornanteil erhöht wird.

Da ein linearer Zusammenhang zwischen Quelldruck und Quelldehnungen besteht, kann zunächst mithilfe des Quelldruckversuchs beurteilt werden, ob überhaupt Quelldehnungsversuche erforderlich sind. Bei Bodengruppen mit einem höheren Feinkornanteil ($d < 0,06$ mm) > 15 M.-%, das vermutlich zu einer geringeren Proctordichte $\rho_{Pr} < 1,90$ g/cm³ sowie einer höheren Plastizitätszahl $I_p > 21$ % führt sowie bei Böden, die schnell zu einem feinkörnigen Boden zerfallen können ($I_{d2} < 60$ %) kann ein mögliches Quellpotenzial vorliegen. Hier sollten in jedem Fall zunächst Quelldruckversuche durchgeführt werden. Liegen zu den beschriebenen Grenzen der Klassifikationsparameter die maximalen Quelldrücke $\sigma > 100$ kPa, sind zusätzlich Quelldehnungsversuche und eine Tonmineralanalyse zur Erfassung quellfähiger Tonminerale zu ergänzen.

Zusammenfassend können veränderlich feste Gesteine grundsätzlich als Erdbaustoff eingesetzt werden. Entscheidend ist zunächst das Erkennen ihrer Veränderlichkeit im Rahmen von Verwitterungsversuchen (Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel, Siebtrommelversuch, Trocknungs-Befeuchtungs-Versuch nach NICKMANN), um insbesondere die Ergebnisse klassifizierender Untersuchungen richtig beurteilen und die höheren Anforderungen bei den einzelnen Erdbauprozessen (Lösen, Laden, Fördern, Zwischenlagern, Einbauen und Verdichten) richtig festlegen zu können. Da eine Beschreibung nach DIN EN ISO 14688-1 beziehungsweise Einteilung in Bodengruppen nach DIN 18196 auf Grundlage der Korngrößenverteilung nicht möglich ist, sollten sie als eigenständige Bodengruppe angesehen werden. Weitere klassifizierende Untersuchungen (Proctorversuch, Quelldruckversuch) sollten immer am einzubauenden Material bestimmt werden, da verwitterungsbedingte Änderungen zwischen dem Lösen und Verdichten nicht ausgeschlossen werden können. Eine Zwischenlagerung sollte wegen der Erhöhung des Feinkornanteils vermieden werden. Der Einbau sollte wegen ihrer Witterungsanfälligkeit mindestens 1 m unterhalb der Böschungsoberfläche beziehungsweise Planum erfolgen. Um das Sackungs- und Quellpotenzial zu reduzieren, sind Luftporenanteile ≤ 6 Vol.-% anzustreben. Zur Überprüfung der Einbau- und Verdichtungsvorgaben sind jedoch bei veränderlich festen Gesteinen aufgrund ihrer Heterogenität Probefelder zwingend erforderlich.