

Entwicklung von Vorgaben für die Aufbereitung und den Einbau von veränderlich festen Gesteinen

FA 5.129

Forschungsstelle: Technische Universität München, Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik (Prof. Dr. Ing. N. Vogt)
 Bearbeiter: Stiegeler, R. / Heyer, D. / Baumgärtel, T.
 Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn
 Abschluss: November 2004

1. Aufgabenstellung

Veränderlich feste Gesteine zerfallen aufgrund ihrer Empfindlichkeit gegenüber Witterungseinflüssen in Abhängigkeit von ihrer Zusammensetzung, der inneren Bindung und dem jeweils angetroffenen Verwitterungsgrad unterschiedlich stark und schnell in kleinere Kornfraktionen mit veränderlicher Kornfestigkeit, was zu anhaltenden veränderlichen Festigkeits- und Tragfähigkeitseigenschaften führt. Zudem weisen aus veränderlich festen Gesteinen geschüttete Dämme Anteile feinkörniger, bindiger Kornfraktionen auf, deren Konsistenz bei Wassereinwirkung abnimmt, was zu Tragfähigkeitsverminderungen führen kann. Entsprechend schwierig ist die Beurteilung des geotechnischen Verhaltens veränderlich fester Gesteine beim Einsatz im Erd- und Straßenbau. Folglich stellen veränderlich feste Gesteine besonders hohe Anforderungen an die Erdbautechnik, um unzulässige Verformungen oder gar Standsicherheitsprobleme bei aus veränderlich festen Gesteinen geschütteten Dämmen zu verhindern.

Da das straßenbautechnische Regelwerk in seiner jetzigen Form nur wenige konkrete Vorgaben oder Hinweise zur Eignung und Verwendung veränderlich fester Gesteine aufweist, war es Ziel dieses Forschungsprojektes, baupraktische Vorgaben, Empfehlungen und Hinweise für die Aufbereitung und den Einbau veränderlich fester Gesteine zu erarbeiten, um negative Veränderungen der geotechnischen Eigenschaften verdichteter veränderlich fester Gesteine zu minimieren. Insbesondere muss durch die Vorgabe geeigneter Einbaubedingungen einer Verminderung der Steifigkeit und der Scherfestigkeit der eingebauten veränderlich festen Gesteine bei Wassereinwirkung entgegengewirkt werden. Ein Verwittern veränderlich fester Gesteine muss nach Möglichkeit unterbunden werden oder zumindest unverträgliche negative Veränderungen der Tragfähigkeit durch Verwitterung minimiert werden. Die Gebrauchstauglichkeit von Verkehrswegen auf Dämmen aus veränderlich festen Gesteinen muss während der gesamten Nutzungsdauer gewährleistet werden.

2. Untersuchungsmethodik

Für die Untersuchungen wurden mit einem Mergel-Kalkstein und zwei Tonsteinen, Opalinustonstein und Roter Letten Tonstein, drei veränderlich feste Gesteine ausgewählt, die unterschiedlichen geologischen Formationen entstammen und typische, in einigen Regionen Deutschlands flächenhaft weit verbreitet anstehende veränderlich feste Gesteine repräsentieren. Zudem unterscheiden sie sich in ihrer Empfindlichkeit gegenüber Veränderungen der Festigkeit durch Verwitterung und Wassereinwirkung.

Ein für veränderlich feste Gesteine entscheidendes, und damit auch für baupraktische Fragestellungen wesentliches Klassifi-

kationsmerkmal ist deren Verwitterungsneigung. Die drei veränderlich festen Gesteine wurden durch Trocken-Nass-Wechselversuche und Frost-Tau-Wechselversuche untersucht, mit dem Ziel, die ablaufenden Entfestigungsvorgänge nicht nur qualitativ zu beschreiben, sondern die Verwitterung von veränderlich festen Gesteinen quantifizierbar zu machen. Eine quantifizierte Beschreibung und das Erkennen der Entfestigungsneigung veränderlich fester Gesteine sind die Basis zur Entwicklung von Einbauvorgaben.

Die Entwicklung der Einbauvorgaben basierte auf vergleichenden Untersuchungen zur Tragfähigkeit der verdichteten veränderlich festen Gesteine in erdbautechnisch praktikablen Einbauständen. Aufbauend auf Untersuchungen im Bereich der Proctordichte und der modifizierten Proctordichte wurden weitere Untersuchungsbereiche definiert, die eine systematische Beurteilung der Tragfähigkeit bei Verdichtung mit konstantem Einbauwassergehalt und gesteigerter Einbautrockendichte als auch bei vorgegebener Einbautrockendichte variierenden Einbauwassergehalten ermöglichten.

Die Veränderung der Tragfähigkeit bei Wassereinwirkung wurde systematisch durch CBR-Versuche vor und nach Wasserlagerung untersucht. Veränderlich feste Gesteine, bei denen die CBR-Werte nach einer Wasserlagerung nach TP BF-StB Teil 7.1 besonders stark abfielen, wurden in modifizierten CBR-Versuchen untersucht. In diesen modifizierten Versuchen wurden die Probekörper während der Wasserlagerung mit einer axialen Spannung $p = 60 \text{ kN/m}^2$ beaufschlagt, die den Spannungsverhältnissen im Inneren eines verdichteten Erdkörpers nennenswerter Größe entsprechen. Ergänzend wurden in weiteren Versuchen die Volumenzunahme während der Wasserlagerung unterbunden und die dabei auftretenden Quelldrücke ermittelt.

Zur fundierten bodenmechanischen Untersuchung der Steifigkeit waren Oedometerversuche an großformatigen Probekörpern (Durchmesser $d = 30 \text{ cm}$) nötig. Es wurden sowohl Einbaubedingungen, in denen die veränderlich festen Gesteine bei den CBR-Versuchen nur mit geringen Tragfähigkeitsverlusten auf Wassereinwirkung reagierten, als auch Einbaubedingungen, bei denen nach Wasserlagerung die CBR-Werte stark zurückgingen, untersucht. Die Steifigkeit in den jeweiligen Einbauständen wurde an teilgesättigten Probekörpern ermittelt. Eine Wasserzugabe erfolgte nach Abklingen der Setzungen in der letzten Laststufe, um einen möglichen Tragfähigkeitsverlust bei Wassereinwirkung im belasteten Zustand zu untersuchen.

In reduziertem Umfang wurde abschließend die Scherfestigkeit an teilgesättigten Probekörpern in Triaxialversuchen untersucht.

Anhand der Ergebnisse der verschiedenen Laborversuche wurden Vorgaben für die Aufbereitung und den Einbau veränderlich fester Gesteine abgeleitet und mit bestehenden Vorgaben in straßenbautechnischen Regelwerken verglichen, um veränderlich feste Gesteine zukünftig erdbautechnisch und bodenmechanisch sinnvoll einsetzen und dauerhaft tragfähig, gebrauchstaugliche Erdbauwerke gewährleisten zu können.

3. Untersuchungsergebnisse

Ein Wasserlagerungsversuch nach DIN 4022, Teil 1, Abschnitt 10.7, wie in den straßenbautechnischen Regelwerken empfohlen, ist kein hinreichender Test zum Erkennen einer veränderlichen Festigkeit. Bei einer Wassereinwirkung im bergfrischen Ausgangszustand zerfielen ungestörte Probestücke der drei untersuchten veränderlich festen Gesteine nicht. Erst nach einer

teilweisen Trocknung und anschließender Wiederbefeuchtung oder nach Frost-Tau-Wechselversuchen unter Wasserzugabe zerfielen die untersuchten veränderlich festen Gesteine.

Bei Verwitterungsversuchen durch Trocken-Nass bzw. Frost-Tau-Wechselbeanspruchung konnte der zunehmende Zerfall von Gesteinsproben gut beobachtet und beschrieben werden. Auch Unterschiede im Zerfall der Gesteine bei variierenden Versuchsdurchführungen (unterschiedliche Trocknungsintensität bzw. variierende Frost-Tau-Einflüsse) waren visuell gut zu erkennen. Allerdings stehen zur Dokumentation dieser Art der Versuche vornehmlich fotografische Aufnahmen und die Ermittlung der Korngrößenverteilung, die bei veränderlich festen Gesteinen meist auch selbst zu einer erheblichen Veränderung der Probe führt, nach Versuchsende zur Verfügung, wodurch der Verlauf des Gesteinszerfalls durch diese Versuche nicht eindeutig belegt werden konnte. Die Ergebnisse waren zudem weder reproduzierbar noch eindeutig quantifizierbar, sodass nur eine qualitative Beurteilung des Zerfalls der jeweiligen veränderlich festen Gesteine möglich war.

Eine quantifizierbare Beschreibung der Verwitterungsneigung veränderlich fester Gesteine ermöglichte der Siebtrommelversuch. Bei diesem Versuch werden die veränderlich festen Gesteine hinsichtlich ihrer Beständigkeit gegen mechanischen Abrieb, Wassergehalts- und Temperaturänderungen nach einem standardisierten Versuchsablauf in mehreren Zyklen untersucht. Der infolge des Gesteinszerfalls nach jedem Zyklus ermittelte Masseverlust der Ausgangsprobe und der daraus errechnete Zerfallsbeständigkeitsindex ermöglicht eine quantifizierte Klassifizierung des untersuchten veränderlich festen Gesteins und dessen Zuordnung in verschiedene Resistenzgruppen. Entsprechend dieser Klassifikation war der untersuchte Mergel-Kalkstein, der sowohl aus zerfallsresistenten Kalksteinen als auch aus unterschiedlich stark entfestigenden Mergelsteinen besteht, mittel- bis hochzerfallsresistent. Der Opalinustonstein und der Tonstein des Roten Lettens zerfielen sehr schnell und hatten eine sehr niedrige Zerfallsbeständigkeit. Der Verlauf der Gesteinsentfestigung beim Siebtrommelversuch deckte sich bei den drei untersuchten veränderlich festen Gesteinen mit den visuell beobachteten und als repräsentativ bewerteten qualitativen Trocken-Nass-Wechselversuchen und Frost-Tau-Wechselversuchen.

Die Beurteilung des Tragverhaltens durch CBR-Versuche ergab bei allen drei veränderlich festen Gesteinen im Zustand vor Wassereinwirkung eine eindeutige Abhängigkeit der ermittelten CBR_0 -Werte vom Einbauwassergehalt. Mit zunehmendem Einbauwassergehalt kam es zu einer Konsistenzverringering der feinkörnigen Bodenanteile, was zu einem Rückgang der CBR_0 -Werte führte. Hingegen bestand kein genereller Zusammenhang zwischen CBR_0 -Werten und Einbautrockendichten. Zwar wurde bereichsweise bei Probekörpern gleichen Einbauwassergehaltes ein Anstieg der CBR_0 -Werte mit steigender Einbautrockendichte festgestellt, dieser Effekt wurde aber von der grundsätzlichen Abhängigkeit der CBR_0 -Werte vom Einbauwassergehalt überlagert. Aufgrund der fehlenden Abhängigkeit der CBR_0 -Werte von der Einbautrockendichte konnte auch kein allgemeiner Zusammenhang von CBR_0 -Werten und Luftporenanteil sowie CBR_0 -Werten und Gesamtporenanteil festgestellt werden.

Nach Wassereinwirkung unterschied sich das Tragverhalten der drei untersuchten veränderlich festen Gesteine deutlich. Beim Mergel-Kalkstein blieb die generelle Abhängigkeit der CBR_W -Werte nach Wasserlagerung vom Einbauwassergehalt erhalten. Die ermittelten Quellhebungen waren gering und gingen mit sinkenden Luftporenanteilen und sinkenden Gesamtporenanteilen weiter zurück. Der ermittelte prozentuale Rückgang der CBR_W -Werte im Vergleich zu den CBR_0 -Werten war im Bereich des Optimums der Proctordichte und der modifizierten

Proctordichte mit ca. 30 % deutlich geringer als bei Einbauzuständen auf der trockenen Seite der beiden Verdichtungskurven, wo die prozentuale Abnahme bei ca. 40 % lag. Dennoch lagen die CBR_W -Werte auf der trockenen Seite der modifizierten Proctorkurve trotz wesentlich höherer Luft- und Gesamtporenanteile noch über den CBR_0 -Werten im Optimum der modifizierten Proctorkurve.

Bei den Probekörpern der beiden untersuchten Tonsteine führte die Wasserlagerung der CBR-Versuche nach Prüfstandard zu hohen Wassergehaltszunahmen. Diese nahmen grundsätzlich mit steigenden Luftporenanteilen und steigenden Gesamtporenanteilen der Probekörper zu. Gleichzeitig führte die Wasseraufnahme bei diesen beiden veränderlich festen Gesteinen zu teils erheblichen Quellhebungen, die aber mit abnehmenden Luftporenanteilen und abnehmenden Gesamtporenanteilen deutlich zurückgingen. Folglich kam es zu teils erheblichen Konsistenzverringeringen der untersuchten Probekörper, so dass die CBR_W -Wert der Opalinustonprobekörper versuchs-technisch kaum ermittelbar waren und Abhängigkeiten der CBR_W -Werte von Einbauparametern nicht mehr bestimmt werden konnten. Die CBR_W -Werte des Roten Lettens lagen in allen Untersuchungsbereichen deutlich unter den CBR_0 -Werten, wobei der prozentuale Rückgang gegenüber CBR_0 -Werten mit abnehmenden Einbauwassergehalten relativ unabhängig von den Einbautrockendichten anstieg. Tendenziell günstiger waren Probekörper mit geringen Luftporenanteilen zu bewerten.

Die Beurteilung der Tragfähigkeit der beiden Tonsteine nach Wassereinwirkung unter realistischen axialen Spannungen ($p = 60 \text{ kN/m}^2$) führte zu einer deutlichen Steigerung der ermittelten CBR_{60} -Werte gegenüber den CBR_W -Werten. So wurden bei Probekörpern des Roten Lettens im Bereich des Optimums der modifizierten Proctordichte und bei Probekörpern des Opalinustons im Optimum der Proctordichte keine nennenswerten Unterschiede zwischen den CBR_0 -Werten und den CBR_{60} -Werten mehr festgestellt. Hingegen lagen die CBR_{60} -Werte der beiden Tonsteine in Untersuchungsbereichen mit hohen Luftporenanteilen (trockene Seite der Verdichtungskurve) immer noch deutlich unter den CBR_0 -Werten.

Die erhöhten axialen Spannungen führten zudem zu einer Reduktion der Wasseraufnahme und der Quellhebungen. Zusammen mit den Ergebnissen der Quelldruckermittlung im CBR-Topf konnten die Quellerscheinungen der beiden Tonsteine in Anhängigkeit vom Einbauzustand spannungsabhängig beschrieben werden. Dabei ist zu beachten, dass auch bei einer unterbundenen Quellhebung bei Tonsteinen, in besonderem Maße bei Probekörpern mit hohen Luftporen- und hohen Gesamtporenanteilen, es zu starken Wassergehaltszunahmen kam. Folglich lagen in diesen Einbaubereichen die CBR_{Quell} -Werte kaum über den CBR_{60} -Werten, wohingegen sich die CBR_{Quell} -Werte im Optimum der Verdichtungskurven nicht nennenswert von den CBR_0 -Werten unterschieden.

Die eindimensionalen Kompressionsversuche bestätigten prinzipiell die Ergebnisse der CBR-Versuche. Die Steifigkeiten nahmen mit abnehmenden Einbauwassergehalten zu.

Eine Wasserzugabe in der höchsten Laststufe führte bei den Probekörpern des Mergel-Kalksteins weder im Bereich des Optimums der modifizierten Proctordichte und des Optimums der Proctordichte noch auf der trockenen Seite der modifizierten Proctordichte zu einem Steifigkeitsrückgang.

Beim Roten Letten Tonstein führte die Wasserzugabe bei hoher axialer Belastung in einem Einbauzustand mit hohen Luftporenanteilen und hohen Gesamtporenanteilen zu einem hohen Steifigkeitsverlust. Hingegen wurden unter gleichen Versuchsbedingungen bei Probekörpern mit wesentlich geringeren Luftporenanteilen kaum Steifigkeitsverluste ermittelt.

Bei der stufenweisen Entlastung konnten an den Kompressionsprobekörpern des Roten Lettens und des Opalinustons deutliche Quellhebungen ermittelt werden. Eine exakte Quelldruckermittlung war allerdings nicht möglich, doch wurden die im CBR-Topf ermittelten Quelldrücke in Abhängigkeit des Einbauzustandes näherungsweise bestätigt.

Die abschließend an Probekörpern des Mergel-Kalksteins und des Roten Lettens mittels Triaxialversuchen ermittelten Scherfestigkeiten spiegelten die aus den vorherigen Versuchen bekannten Zusammenhänge zwischen Einbauwassergehalt und Tragfähigkeit wider. Dabei muss beachtet werden, dass die prozentualen Unterschiede der Scherfestigkeit zwischen den einzelnen Einbauzuständen wesentlich geringer waren, als dies die Ergebnisse der CBR-Versuche zeigten.

4. Folgerungen für die Praxis

Zur Beurteilung, Einordnung und Erkennung einer veränderlichen Festigkeit von Gesteinen sind Frost-Tau-Wechselversuche oder Trocken-Befeuchtungs-Wechselversuche zwingend erforderlich. Die Ergebnisse der Verwitterungsversuche dieser Arbeit haben gezeigt, dass dazu der Siebtrommelversuch nach E 20, AK 3.3 DGGT in besonderer Art geeignet ist.

Die in den Laborversuchen untersuchten Einbaubedingungen wären nach den Vorgaben der ZTVE StB 94, Fassung 97 für das jeweilige Gestein beim Einsatz als Dammbaustoff zulässig gewesen. Dennoch wurde deutlich, dass vor allem bei den beiden untersuchten Tonsteinen erhebliche Tragfähigkeitsverluste infolge Wassereinwirkung auftraten. Erst bei sehr geringen Luftporenanteilen $n_a \approx 2\%$ konnte, u. a. bei Simulation von praxisähnlichen Spannungsverhältnissen in den Probekörpern, der Tragfähigkeitsabfall infolge Wassereinwirkung deutlich reduziert bzw. ganz verhindert werden. Folglich müssen die gültigen Verdichtungsanforderungen verschärft werden, um eine nachträgliche Reduktion der Steifigkeit und Scherfestigkeit bei Wassereinwirkung zu reduzieren. Nur so ist eine dauerhafte Gebrauchstauglichkeit von Dämmen aus veränderlich festen Gesteinen zu gewährleisten.

Auch die Verwitterungsneigung veränderlich fester Gesteine erfordert möglichst geringe Luftporen- und niedrige Gesamtporenanteile. Die Laborversuche zeigten, dass Probekörper mit hohen Luftporen- und hohen Gesamtporenanteilen wesentlich leichter und mehr Wasser aufnehmen. Folglich können Trocken-Befeuchtungs-Wechsel schneller vonstatten gehen. Zudem ermöglicht ein hoher Gesamtporenanteil das Füllen der Hohlräume mit zerfallenen Gesteinsbröckchen, was zu einem Verlust an Scherfestigkeit und Sackungen führen kann.

Praktikable, aber sicher auch baupraktisch aufwändige Einbauvorgaben, stellen Luftporengehalte n_a zwischen $n_a = 3\%$ und 5% dar. Zur gleichzeitig erforderlichen Reduktion des Gesamtporenanteils n ist ein Verdichtungsgrad vorzugeben, der über dem Optimum der Proctordichte liegt. Die Verdichtungsanforderungen sollten wie folgt formuliert werden:

- Bezug der Verdichtungsanforderungen nach ZTVE StB 94/97, Tab. 2 und 3 unter Einhaltung zulässiger Luftporenanteile auf die modifizierte Proctordichte,
- zulässige Luftporenanteile zwischen $n_a = 3\%$ und 5%
 - $n_a = 5\%$, bei Gesteinen, die im Siebtrommelversuch zu einem feinkörnigen Boden zerfallen,
 - $n_a = 3\%$, bei Gesteinen, die im Siebtrommelversuch zu einem gemischtkörnigen Boden zerfallen.

Zur baupraktischen Umsetzung strenger Verdichtungsanforderungen müssen veränderlich feste Gesteine in einer guten Kornabstufung verdichtet werden. Dazu wird es in der Regel erforderlich sein, den Größtkorndurchmesser zu beschränken.

Vorgaben zur Homogenisierungsdauer sind vom Wasseraufnahmevermögen, dem Massenanteil an Feinkorn sowie vom Quellverhalten der Gesteine abhängig. Vor allem bei quellfähigen veränderlich festen Gesteinen sollte die Volumenzunahme des Schüttmaterials nach Wasserzugabe vor dem Verdichten abgeschlossen sein.

Bei quellfähigen veränderlich festen Gesteinen kann zudem eine Beurteilung der spannungsabhängigen Quellhebungen in Abhängigkeit vom Einbauzustand erforderlich werden. So könnten Dammbereiche festgelegt werden, in denen Quellhebungen bei Wasserzutritt minimiert bzw. verhindert werden können. □