

Ermittlung neuer Zuordnungswerte zur Einteilung bindiger Böden in Fest- und Lockergesteine

FA 5.178

Forschungsstelle: Technische Universität München, Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau (Prof. Dr.-Ing. N. Vogt)
 Bearbeiter: Heyer, D. / Birle, E. / Möller, P. / Bundschuh, M.
 Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn
 Abschluss: Juni 2015

1 Aufgabenstellung

Im Zuge der Überarbeitung der DIN 18300, die einen wesentlichen Bestandteil bei der Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB) darstellt, soll in Zukunft die bisherige Einstufung von Boden und Fels entsprechend des Zustands beim Lösen in Boden- und Felsklassen durch eine Einteilung entsprechend ihrem Zustand vor dem Lösen in Homogenbereiche ersetzt werden. Die Beschreibung der Homogenbereiche mittels festgelegter Parameter soll dem Bieter eine fundierte und detaillierte Grundlage liefern, um die erforderlichen Bauverfahren ermitteln und deren Preise kalkulieren zu können. Dadurch sollen Streitfälle vermieden werden, die sich häufig durch fehlerhafte Einstufungen bei den Boden- und Felsklassen ergeben haben.

Bei der Anwendung der Homogenbereiche müssen zukünftig für Boden andere Eigenschaften und Kennwerte ermittelt werden als für Fels. In der Baupraxis treten jedoch oftmals natürliche Übergangsbereiche zwischen Boden/Lockergestein und Fels/Festgestein auf. Im Rahmen von Pilotprojekten wurde festgestellt, dass noch ein geeignetes Kriterium für eine Zuordnung zu Boden oder Fels fehlt.

Im Rahmen einer vorhergehenden Forschungsarbeit wurde außerdem festgestellt, dass der ermittelte Wassergehalt an der Schrumpfgrenze nicht geeignet ist zur Unterscheidung zwischen halbfester und fester Konsistenz bindiger Böden. Eine Einteilung mittels einaxialer Druckfestigkeit war bei den untersuchten bindigen Böden ebenso bedingt geeignet, da die Prüfkörper bei der Herstellung zerbrachen. Vor diesem Hintergrund wurde der Eindringversuch mittels Konusspitze und Proctornadel entwickelt. Die einfache Durchführung und Anwendbarkeit wurde bereits an künstlich hergestellten Proben bewiesen. Es fehlen jedoch sowohl Versuche an natürlichen, ungestörten Bodenproben sowie konkrete Werte für die Zuordnung von Übergangsböden und -gesteinen zu Boden oder Fels.

2 Untersuchungsmethodik

Im ersten Schritt wurden anhand einer Literaturstudie die in der Fachliteratur sowie in Normen und Regelwerken bestehenden qualitativen und quantitativen Abgrenzungen zwischen Boden/Lockergestein und Fels/Festgestein zusammengestellt. Insbesondere wurde auf bereits bestehende Einstufungskriterien beziehungsweise Boden- und Gesteinsparameter eingegangen, um zwischen Boden und Fels zu unterscheiden.

Im zweiten Schritt wurden für die Laboruntersuchungen über 25 Versuchsböden unterschiedlichster geologischer Formationen Deutschlands aus Lagerstätten, im Rahmen von Bauprojekten sowie aus Rückstellproben vergangener Projekte gewonnen. Außerdem wurden bei der Probengewinnung in Anlehnung an die Literaturrecherche alle verfügbaren Informationen über die Vor-Ort-Verhältnisse dokumentiert. Insbesondere wurde auf die Beschreibung löserelevanter Boden- und Felsstrukturen (zum Beispiel Trennflächengefüge) nach DIN EN ISO 14688-1 beziehungsweise 14689-1 geachtet. Zudem wurden die Lösewerkzeuge sowie das Löseverhalten des anstehenden Bodens/Fels, sofern möglich, dokumentiert.

Im dritten Schritt erfolgten die bodenmechanischen Untersuchungen. Um Zuordnungswerte für die zukünftige Unterscheidung zwischen Boden/Lockergestein und Fels/Festgestein festzulegen, wurden insbesondere Zusammenhänge zwischen den experimentell ermittelten Parametern Konsistenz, Festigkeit und Eindringwiderstand untersucht. Dazu wurden an jedem Versuchsboden, sofern möglich und auch erforderlich, die nachfolgend aufgeführten Laborversuche durchgeführt:

- Benennung und Beschreibung nach DIN EN ISO 14688-1 beziehungsweise 14689-1,
- Beurteilung nach DIN 18196,
- Korngrößenverteilung nach DIN 18123,
- Wassergehalt nach DIN 18121-1,
- Fließ- und Ausrollgrenzen nach DIN 18122-1,
- Schrumpfgrenze nach DIN 18122-2,
- Glühverlust nach DIN 18128 (bei Bedarf),
- Kalkgehalt nach DIN 18129 (bei Bedarf),
- einaxiale Druckversuche nach DIN 18136,
- Eindringversuche mit der Proctornadel und Konusspitze nach Etz et al. (2012),
- Eindringung mittels Taschenpenetrometer.

Im Allgemeinen wurden je Boden- beziehungsweise Gesteinsart sowohl ein Konus- als auch ein Proctornadel-Versuch durchgeführt. Im Gegensatz zur Proctornadel kann der Konus, bedingt durch seine Geometrie, bei festeren Böden und weichem Fels eingesetzt werden. Um eine obere Festigkeitsgrenze des Eindringversuchs zu ermitteln, wurden daher auch Felsarten mit einbezogen, bei denen meist nur noch Versuche mit dem Konus möglich waren. Insgesamt wurden über 65 Eindringversuche mittels Konusspitze und ca. 25 Versuche mit der Proctornadel durchgeführt. In der Regel wurden die Prüfkörper zentrisch belastet. Abweichungen davon ergaben sich aufgrund von sichtbaren Inhomogenitäten (Kalkeinschlüsse o. ä.) innerhalb des Probenquerschnitts.

3 Untersuchungsergebnisse

Insgesamt war die Durchführung der Eindringversuche einfach. Im Gegensatz zu den einaxialen Druckversuchen waren auch bei leicht zerbrechlichen Proben, an denen aus diesem Grund keine einaxialen Druckversuche möglich waren, gerade noch Probekörper herstellbar, um die Festigkeit mithilfe des Eindringversuchs abzuschätzen. Zudem müssen bei Eindringversuchen keine genauen Abmessungen eingehalten werden wie bei den einaxialen Druckversuchen (Höhe-Breite-Verhältnis). Vielmehr können zugeschnittene Blockproben in den Zylinderding durch zusätzliches Einzementieren eingefasst werden.

Allerdings können bei beiden Versuchsarten (einaxiale Druckversuche und Eindringversuche) in der Praxis Fälle auftreten, bei denen Böden und Gesteine im Übergangsbereich liegen, aber bereits so stark verwittert oder geschichtet sind, dass keine Prüfkörper hergestellt werden können. Für diese Übergangsbereiche müssten grundsätzlich andere Zuordnungswerte als die einaxiale Druckfestigkeit beziehungsweise als der Eindringwert gefunden werden.

Bei den Eindringversuchen ist zu beachten, dass je Probenquerschnitt entweder nur ein Konus- oder ein Proctornadel-Versuch durchgeführt werden sollte, um eine gegenseitige Beeinflussung der Versuchsansatzpunkte zu vermeiden. Darüber hinaus ist zu beachten, dass beim Eindringversuch nur ein geringes Probenvolumen geprüft wird und damit überwiegend die Gesteinsfestigkeit und nicht die Festigkeit des Gesteinsverbands ermittelt wird. Dies gilt auch für die punktuellen Messungen mittels Taschenpenetrometer. Zudem kann die Festigkeit zwischen einzelnen Probestücken trotz einer Entnahme aus der gleichen Schicht und unmittelbar nebeneinander stark variieren.

Die Auswertung der Laborversuche hat gezeigt, dass keine exakte Grenze zwischen Boden und Fels definiert werden kann. Vielmehr ist die Definition eines Übergangsbereichs erforderlich, für den sowohl Boden- als auch Felsparameter bestimmt werden müssen. Unter Berücksichtigung der mit den Versuchen ermittelten Näherungsformel ($\sigma_{20} \approx 10 \cdot q_u$) können Eindringversuche als Alternative zum einaxialen Druckversuch beziehungsweise bei leicht zerbrechlichen oder stark zerklüfteten Proben, bei denen kein einaxialer Druckversuch möglich ist, zur Abschätzung der einaxialen Druckfestigkeit herangezogen werden. Für Festgesteine beziehungsweise Felsarten, bei denen eine einaxiale Druckfestigkeit von ca. $q_u < 1$ MPa beziehungsweise eine Eindringspannung von ca. $\sigma_{20} < 10$ MPa ermittelt wird, sollten neben den Felsparametern auch die Bodenkennwerte bestimmt werden. Dagegen sollten für Böden mit einer Konsistenzzahl von ca. $I_c > 1,15$ ergänzend die Felsparameter ermittelt werden. Bei hohen Festigkeiten sind dann in der Regel nur Versuche mit der Konusspitze möglich.

Die ermittelte Näherungslösung ($\sigma_{20} \approx 10 \cdot q_u$) ist nur bei homogenen Böden zu erwarten, wie zum Beispiel bei Tonen in halbfester bis fester Konsistenz ohne Verfestigungen, Inhomogenitäten oder Trennflächen, oder zum Beispiel bei Dichtwandmassen. Für Böden und Gesteine mit Trennflächengefüge und Inhomogenitäten gilt dieser allgemeine Zusammenhang nicht mehr. Für einen Korrelationsansatz, der auch für heterogene Böden gilt, müssen neben der einaxialen Druckfestigkeit und dem Eindringwert weitere Einflussfaktoren, wie beispielsweise die Probenzusammensetzung, mit einbezogen werden.

Weiterhin konnte eine ungefähre obere Festigkeitsgrenze ermittelt werden, ab der die Eindringversuche nicht mehr möglich waren und nur zu einem Verbiegen der Konusspitze führen würden. Die maximal aufnehmbaren Kräfte der Prüfkörper sind nicht nur aufgrund der Geometrie begrenzt, sondern hängen auch von der Scherfestigkeit des Gesteins ab. Daher ist die obere Festigkeitsgrenze nicht für jedes Gestein gleich. Tendenziell ist aber ab ca. 20 MPa die Durchführung eines Eindringversuchs nicht mehr möglich.

Für einen eindeutigen Zusammenhang der Werte aus den Taschenpenetrometer-Versuchen mit den einaxialen Druckfestigkeiten sowie Spannungen aus dem Eindringversuch nach 5 mm Eindringweg war die Anzahl der Ergebnisse zu gering. Bei einem Großteil der Proben konnten keine Werte mittels Taschenpenetrometer ermittelt werden, da die Probekörper entweder zu fest oder aufgrund ihrer starken Klüftung und Schichtung nicht geeignet waren. Anhand der Ergebnisse zeigte sich aber, dass die zum Zusammendrücken des Taschenpenetrometers erforderliche Spannung in einer ähnlichen Größenordnung liegt wie die aus dem Eindringversuch mit der Proctornadel ermittelte Spannung nach 5 mm Eindringweg.

Tendenziell war ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der einaxialen Spannung σ_{UP} aus dem Taschenpenetrometer-Versuch und der Spannung σ_5 aus dem Proctornadel-Versuch beziehungsweise der einaxialen Druckfestigkeit q_u zu erkennen. Bis auf einige Ausnahmen wurden jeweils ähnliche Spannungen ermittelt.

Zusammenfassend war die Durchführung der Eindringversuche einfach. Bedingung war analog zu den einaxialen Druckversuchen, dass Probekörper herstellbar sind. Bedingt durch die "grobe" Prüfkörperform, deren Abmessungen nicht exakt eingehalten werden musste wie bei den einaxialen Druckversuchen, blieben bei leicht zerbrechlichen Proben, bei denen keine einaxialen Druckversuche möglich waren, die Eindringversuche als einzige Möglichkeit zur Ermittlung einer vergleichbaren einaxialen Festigkeit des Boden- oder Gesteinskörpers. Darüber hinaus kann der Eindringversuch bei bindigen Böden als Alternative zur Konsistenzbestimmung eingesetzt werden.

4 Ausblick

Da sowohl der Eindring- als auch der einaxiale Druckversuch allerdings nicht immer möglich sind, müssen auch weitere Zuordnungswerte für den Übergangsbereich Boden/Fels mit herangezogen werden. Dabei kann eine weitere Unterscheidung zwischen Boden und Fels zusätzlich anhand des Trennflächengefüges nach DIN EN ISO 14689 beziehungsweise nach dem Merkblatt der Felsbeschreibung über die Klüftung (Kluftabstände) und Schichtung (Schichtflächenabstände) erfolgen. Außerdem wird das Löseverhalten von der Größe der löslichen Brocken im Gefüge bestimmt und muss bei der Beurteilung berücksichtigt werden. Ab welcher Größe noch ein Boden oder bereits ein Fels vorliegt, müsste genauer definiert werden. In der Praxis müssen größere Blöcke (in der Regel > 2 m) durch Sprengarbeiten abgebaut werden. Auch der RQD-Index könnte als sinnvolle Ergänzung Hinweise zur Zerklüftung liefern. Hinweise für einen Übergangsbereich kann auch die Art der Bohrung (Rammkern- oder Rotationskernbohrung) geben. Ferner

könnten geophysikalische Messmethoden zur Bestimmung von Übergangsbereichen mit herangezogen werden.

Da das Taschenpenetrometer aufgrund des Messbereichs nur bedingt geeignet war, könnten Feldversuche mit größeren Aufsätzen sinnvolle Messergebnisse liefern. Gemäß DIN 19662 sind bereits größere Handpenetrometer im Einsatz. Es müsste allerdings geprüft werden, ob dieses Verfahren auch bei Proben aus Erkundungsbohrungen angewendet werden kann. Im Allgemeinen wird jedoch jede Penetrometer-Messung nur punktuelle Werte wiedergeben.