

Entwicklung einer neuen Versuchstechnik zur Bestimmung der Grenze zwischen halbfestem und festem Boden

FA 5.146

Forschungsstelle: Technische Universität München, Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau (Prof. Dr.-Ing. N. Vogt)

Bearbeiter: Heyer, D./ Birle, E./ Etz, A.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Mai 2012

1 Aufgabenstellung

Im Hinblick auf das Lösen, Laden, Fördern, Einbauen und Verdichten werden Boden und Fels nach DIN 18300 beschrieben. In Abhängigkeit von ihrer Konsistenz werden bindige Böden dabei in unterschiedliche Bodenklassen unterteilt. Bodenarten von leichter bis mittlerer Plastizität und weicher bis halbfester Konsistenz werden der Bodenklasse 4 zugeordnet. Ausgeprägt plastische Tone in weicher bis halbfester Konsistenz gehören der Bodenklasse 5 an. Bindige Bodenarten fester Konsistenz sind der Bodenklasse 6 zuzuordnen. Die Grenze zwischen halbfester und fester Konsistenz ist dabei über die Schrumpfgrenze definiert, die nach DIN 18122-2 bestimmt wird.

Entsprechend dem Konzept der Konsistenzgrenzen nach Atterberg sollte der Wassergehalt an der Schrumpfgrenze unterhalb des Wassergehalts an der Fließgrenze (Übergang zwischen flüssiger und breiiger Konsistenz) und des Wassergehalts an der Ausrollgrenze (Übergang zwischen steifer und halbfester Konsistenz) liegen. Dies ist jedoch in der Realität nicht immer der Fall. Der Wassergehalt an der Ausrollgrenze liegt vor allem bei leichtplastischen Böden häufig unterhalb des Wassergehalts an der Schrumpfgrenze. Dies führt aufgrund einer unpräzisen Zuordnung der Bodenklassen häufig zu Streitfällen zwischen Auftragnehmer und Auftraggeber.

Das Ziel des Forschungsvorhabens war es deshalb, ein geeigneteres Kriterium zur Einordnung bindiger halbfester und fester Böden in die Bodenklassen der DIN 18300 zu erarbeiten und dazu eine Versuchstechnik zu entwickeln. In einem ersten Schritt wurden das Schrumpfverhalten bindiger Böden analysiert und die Methoden zur Bestimmung der Schrumpfgrenze untersucht. In einem nächsten Schritt sollte untersucht werden, inwieweit andere Parameter, die die Festigkeit des Bodens beschreiben, z. B. die einaxiale Druckfestigkeit, für die Einordnung bindiger Böden nach DIN 18300 herangezogen werden können. Hierzu wurden zunächst Untersuchungen zur einaxialen Druckfestigkeit durchgeführt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden im weiteren Verlauf Untersuchungen zu einem einfach durchzuführenden Versuch durchgeführt, der eine Unterscheidung von halbfestem und festem bindigen Boden auf Grundlage der Festigkeit ermöglicht. Dazu wurden an aufbereiteten Böden Eindringversuche mit einer Proctornadel und einer Konusspitze durchgeführt.

2 Untersuchungsmethodik

Aufgrund der oben dargestellten Fragestellungen ergaben sich für die vorliegende Forschungsarbeit zwei Schwerpunkte. Zum einen wurde die Anwendbarkeit der Schrumpfgrenze zur Abgrenzung halbfester und fester bindiger Böden überprüft und bewertet. Zum anderen wurde ein neuer Versuch entwickelt, der den Übergang zwischen den Bodenklassen 4 und 6 bzw. 5 und 6 für bindige Böden definieren soll.

Im Rahmen einer einführenden Literaturrecherche wurde zunächst auf Regelwerke eingegangen, die als Kriterium zur Unterscheidung von Bodenklassen bereits Festigkeitseigenschaften von Böden heranziehen. Anschließend wurden die theoretischen Grundlagen des Schrumpfverhaltens bindiger Böden dargestellt. In diesem Zusammenhang wurde auf die Entstehung von Saugspannungen bei der Entwässerung von Böden eingegangen.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde zunächst an ausgewählten Bodenproben leichter, mittlerer und ausgeprägter Plastizität die Schrumpfgrenze nach DIN 18122-2 ermittelt. Es zeigte sich, dass bei Böden mit einer Plastizitätszahl $I_p < 18\%$ der Wassergehalt an der Schrumpfgrenze oberhalb des Wassergehalts an der Ausrollgrenze liegt. Weiterhin wurden Untersuchungen zum Schrumpfverhalten an unbelasteten und ödometrisch vorbelasteten Bodenproben durchgeführt.

Da durch die Bestimmung der Schrumpfgrenze keine eindeutige Zuordnung der Bodenklassen möglich ist, wurden im Folgenden Untersuchungen zu anderen Kriterien zur Unterscheidung zwischen halbfesten und festen bindigen Böden durchgeführt. Hierzu wurde die einaxiale Druckfestigkeit unterschiedlicher Böden in Abhängigkeit vom Wassergehalt bestimmt. Dazu wurden ungestörte Bodenproben von ihrem natürlichen Wassergehalt bis auf Wassergehalte im Bereich der Schrumpfgrenze herunter getrocknet, bevor anschließend die einaxiale Druckfestigkeit bestimmt wurde. Zur systematischen Ermittlung des Einflusses des Wassergehalts auf die einaxiale Druckfestigkeit wurden darüber hinaus Untersuchungen an aufbereiteten Bodenproben durchgeführt.

Aufgrund der Probleme bei der Herstellung von ungestörten Probekörpern für den einaxialen Druckversuch, wurde in den weiteren Untersuchungen ein leicht durchführbarer Eindringversuch entwickelt und getestet. Dazu wurden Bodenproben eingepresst und auf verschiedene Wassergehalte im Bereich der Schrumpfgrenze herunter getrocknet, bevor mithilfe eines Ausstechrings zylindrische Prüfkörper für die Eindringversuche herausgearbeitet wurden. Zur Ermittlung der Festigkeitseigenschaften wurden auf den Stirnflächen der in den Ausstechzylindern befindlichen Bodenproben die in Bild 1 dargestellte Proctornadel sowie die in Bild 2 dargestellte Konusspitze eingedrückt.

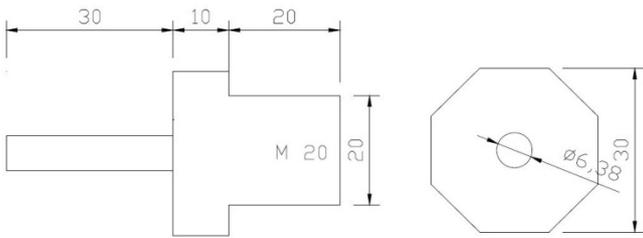


Bild 1: Proctornadel (Abmessungen in mm)

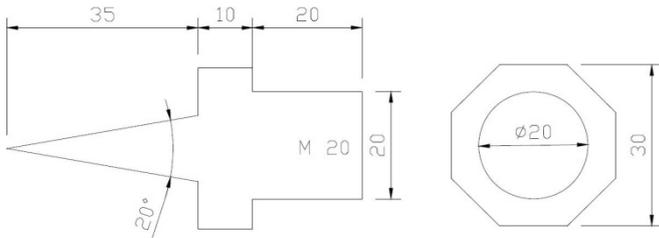


Bild 2: Konusspitze (Abmessungen in mm)

Die Eindringgeschwindigkeit sowie die maximale Eindringtiefe der Spitzen wurden für alle durchgeführten Versuche konstant gehalten. Um das Versuchskonzept beurteilen zu können und sekundäre Einflüsse so gering wie möglich zu halten, wurden die Untersuchungen an aufbereiteten Bodenproben bei unterschiedlichen Wassergehalten durchgeführt, sodass der Eindringwiderstand der Proctornadel bzw. der Konusspitze in Abhängigkeit von der Konsistenz der Proben dargestellt werden konnte.

Ergänzend wurde der Zusammenhang zwischen dem Matrixpotenzial und dem Wassergehalt (Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung) bestimmt. Dazu wurden die Proben zunächst an der Fließgrenze aufbereitet und auf unterschiedliche Wassergehalte getrocknet. Die bei den untersuchten Wassergehalten vorliegenden Saugspannungen wurden mit einem Feuchtigkeitsmessgerät nach der Taupunktmethode bestimmt. Anhand dieser Untersuchungen sollte geprüft werden, inwieweit die einaxiale Druckfestigkeit und die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung für die Bestimmung der Schrumpfgrenze und für die Einordnung bindiger Böden in Lösbarkeitsklassen herangezogen werden kann.

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Schrumpfgrenze und Schrumpferhalten

Die Untersuchungen zur Schrumpfgrenze haben gezeigt, dass die Bestimmung des Übergangs zwischen halbfester und fester Konsistenz bindiger Böden mithilfe der nach DIN 18122-2 bestimmten Schrumpfgrenze nicht möglich ist. Der nach DIN 18122-2 ermittelte Wassergehalt an der Schrumpfgrenze liegt vor allem bei leicht plastischen Böden über dem Wassergehalt an der Ausrollgrenze und damit in einem weichen bis steifen Konsistenzbereich. Es wurde außerdem festgestellt, dass der Wassergehalt an der Schrumpfgrenze vom Größtkorn des untersuchten Materials abhängt.

Die an vorbelasteten Proben durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass der Wassergehalt an der Schrumpfgrenze mit zunehmender Vorbelastung abnimmt. Die deutliche Herabsetzung der Schrumpfgrenze durch eine geringe Vorbelastung von 106 kPa im Vergleich zur nicht vorbelasteten Bodenprobe, lässt sich durch das erste Einregeln der Bodenpartikel erklären. Der Wassergehalt an der Schrumpfgrenze eines natürlichen Bodenmaterials entspricht nicht der bei einem Wassergehalt von $w = 1,1 \cdot w_L$ aufbereiteten und heruntergetrockneten Bodenstruktur. Die Schrumpfgrenze ist vielmehr von der Vorgeschichte des Bodenmaterials abhängig und verändert sich mit steigender Belastung. Es konnte in einfachen ödometrischen Versuchen die Auflast allerdings nicht so weit erhöht werden, dass für Bodenproben, deren Schrumpfgrenze oberhalb der Ausrollgrenze liegt, dieses Verhältnis umgekehrt werden konnte.

Dies lässt sich auch anhand der durchgeführten Quecksilberporosimetrie-Untersuchungen belegen. Das Bild 3 zeigt dazu die Dichteverteilung der Porendurchmesser für unterschiedlich vorbelastete und anschließend getrocknete Proben eines ausgeprägt plastischen Tons.

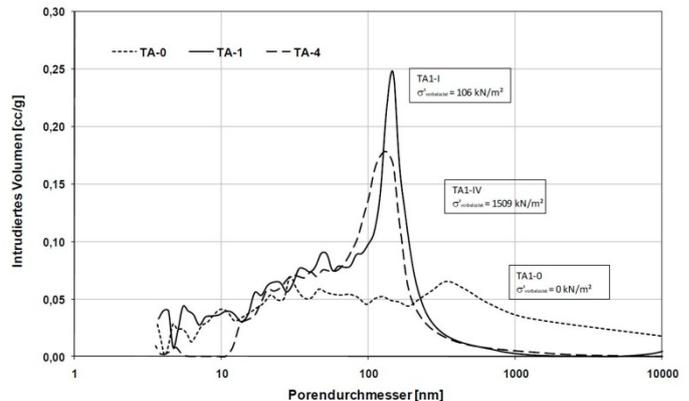


Bild 3: Porengrößenverteilung

Während die unbelastete Bodenprobe TA 1-0 im geschrumpften Zustand einen ausgeprägten Anteil an sogenannten Makroporen im Bereich > 200 nm aufweist, ist für die vorbelasteten Proben TA 1-I und TA 1-IV ein Hauptporenanteil im Bereich von etwa 150 nm bei einem sehr geringen Makroporenanteil > 200 nm erkennbar. Das bedeutet, dass der Makroporenanteil sowie der Porendurchmesser beim Maximalwert der Dichtefunktion mit zunehmender Vorbelastung der Proben abnehmen. Das führt dazu, dass der Wassergehalt an der Schrumpfgrenze mit steigender Vorbelastung abnimmt. Die Untersuchungen zeigen, dass der Wassergehalt an der Schrumpfgrenze von der Dichte des Bodens beeinflusst wird.

3.2 Saugspannungsuntersuchungen

Die Festigkeitszunahme bindiger Böden bei einer Reduzierung des Wassergehalts ist vornehmlich auf die Oberflächenspannung des Wassers und der daraus resultierenden Kapillarkräfte zurückzuführen. Kapillarkräfte üben eine Vorspannung auf das Korngerüst aus und führen zu einer Zunahme der Korn-zu-Korn-Spannungen. Daneben finden bei feinkörnigen Böden ausgeprägte Wechselwirkungen zwischen dem Bodenwasser und den Tonmineralen in Form von adsorptiven und osmoti-

schen Prozessen statt. Zusammen mit den Kapillarkräften können die zwischen Feststoff und Wasser wirkenden Adsorptionskräfte über das Matrixpotential erfasst werden.

Bezüglich der Auswertbarkeit im Bereich der Schrumpfgrenze Einschränkungen gemacht werden, da die Messgenauigkeit des "Dew Point Potential Meter WP 4" im Bereich < 1 MPa abnimmt und die eingetragenen Schrumpfgrenzen im Saugspannungsbereich zwischen 300 kPa und 600 kPa liegen. Des Weiteren ist erkennbar, dass aus den oben dargestellten Versuchen sich der Wassergehalt an der Schrumpfgrenze nicht als charakteristischer Wert einer Saugspannungs- Wassergehalts-Beziehungen äußert. Es wird jedoch vermutet, dass die Schrumpfgrenze den Wendepunkt der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung markiert.

3.3 Festigkeitsuntersuchung

3.3.1 Einaxiale Druckfestigkeit

Alle untersuchten aufbereiteten Proben zeigen prinzipiell eine Zunahme der Festigkeit bei abnehmendem Wassergehalt. Die einaxiale Druckfestigkeit der untersuchten Proben beträgt ca. 200 kN/m² bei einer Konsistenzzahl I_c = 1,25, wobei zwischen mittelplastischen und leichtplastischen Böden keine deutlichen Unterschiede erkennbar sind.

Bei der Durchführung der einaxialen Druckversuche an den ungestörten Bodenproben wurde festgestellt, dass das Herausarbeiten von ungestörten Proben in nahezu 50 % der Fälle nicht möglich war bzw. dass Ergebnisse aufgrund bereits gerissener Proben nicht aussagekräftig waren. Die ermittelten einaxialen Druckfestigkeiten haben außerdem zum Teil große Schwankungen aufgewiesen, was darauf zurückgeführt wurde, dass die einaxiale Druckfestigkeit ungestörter Bodenproben von einer Vielzahl von Parametern (Struktur, Kongregationen, Probenqualität) abhängig ist, die nicht genau quantifiziert werden können. Da die Untersuchung von Böden im Hinblick auf ihre Lösbarkeit nach DIN 18300 jedoch an Bodenproben im natürlichen ungestörten Zustand erfolgen sollte, wird die einaxiale Druckfestigkeit als Versuch zur Bestimmung der Grenze zwischen halbfestem und festem bindigen Boden nicht empfohlen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden deshalb im weiteren Verlauf Untersuchungen zu einem einfach durchzuführenden Eindringversuch durchgeführt, der eine Unterscheidung von halbfestem und festem bindigen Boden auf Grundlage der Festigkeit ermöglicht.

3.3.2 Eindringversuch

Es konnte anhand der Eindringversuche mit Proctornadel und Konusspitze gezeigt werden, dass ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Konsistenz und dem Eindringwiderstand besteht. Eine Bewertung der Festigkeit kann mithilfe des Proctornadelversuchs erfolgen. Wird die erforderliche Kraft zum Eindringen der Proctornadel gegenüber dem Eindringweg in einem halblogarithmischen Diagramm aufgetragen, stellen sich die Versuchsergebnisse näherungsweise als Geraden dar (Bild 4).

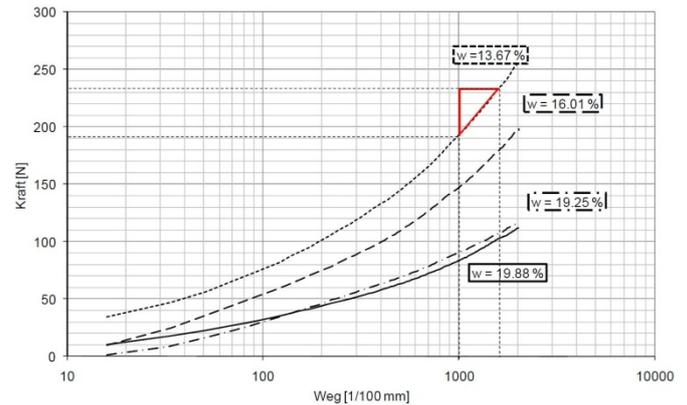


Bild 4: halblogarithmische Darstellung Kraft-Weg beim Eindringversuch mit der Proctornadel

Als Parameter für eine Beurteilung der Festigkeit kann die Steigung der Kraft-Weg-Verläufe im Bereich für eine Eindringung zwischen 1 und 2 cm herangezogen werden (siehe Bild 4). Die Steigung PN lässt sich damit unter Berücksichtigung der Differenz ΔF [N] der für eine Eindringung von s₁ = 1,0 cm und s₂ = 2,0 cm erforderlichen Kräfte folgendermaßen ermitteln:

$$PN = \frac{\Delta F}{\ln\left(\frac{s_1}{s_2}\right)} [N]$$

Die Versuchsergebnisse zeigen für alle untersuchten Böden, dass der Wert PN mit zunehmender Festigkeit des Bodens stark zunimmt.

4 Folgerungen für die Praxis

Zur Festlegung konkreter Werte für eine Unterscheidung der Bodenklassen 4, 5 und 6 der DIN 18300 sind weitere Untersuchungen erforderlich. Dabei sollten die ermittelten Zusammenhänge zwischen der Eindringkraft und dem Eindringweg an ungestörten Bodenproben, wie sie bei realen Baumaßnahmen auftreten, untersucht werden. Damit können die Anwendungsgrenzen des Versuchs ermittelt und die Versuchsdurchführung sowie -technik unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bodenarten optimiert werden. Darauf aufbauend sollten anhand weiterer Reihenuntersuchungen an diversen, für verschiedene geologische Verhältnisse in Deutschland charakteristischen Böden konkrete Kriterien zur Abgrenzung der einzelnen Bodenklassen anhand der Eindringkraft bzw. des Steigungswerts PN festgelegt werden.

