

## Zusammenfassung des Berichts zum Forschungsvorhaben

### Ermittlung charakteristischer Bodenkenngrößen für gemischtkörnige und organische Böden als Grundlage für Bauvorschriften

Die Degebo erhielt vom Deutschen Institut für Bautechnik den Auftrag, anhand von in einer Datenbank gesammelten Versuchsergebnissen an ungestörten Bodenproben Abhängigkeiten zwischen der Scherfestigkeit und anderen Bodenkenngrößen für verschiedene Bodenarten zu untersuchen.

Ziel der Forschungsarbeit war die Ermittlung zuverlässiger charakteristischer Bodenkennwerte für gemischtkörnige und ggf. auch für organische Böden. Damit soll der Ermessensspielraum für die Festlegung der Bemessungswerte eingeengt und eine Grundlage für eine sichere und wirtschaftliche erdstatische Bemessung von Bauwerken geschaffen werden.

Aus ca. 6000 ungestörten Bodenproben von gemischtkörnigen Böden (Geschiebelehm und -mergel) sowie organischen Böden (Torf, Faulschlamm und Wiesenkalk) wurden Versuchsdaten zur Bestimmung folgender Größen in der Datenbank zusammengefaßt:

- Kornverteilung
- Dichten  $\gamma$ ,  $\gamma_d$ ,  $\gamma_s$
- Wassergehalt  $w$
- Porenzahl  $e$
- Konsistenzgrenzen  $w_L$ ,  $w_p$ ,  $I_C$ ,  $I_p$
- Glühverlust  $V_{gl}$
- einaxiale Druckfestigkeit  $q_u$
- undrainierte Kohäsion  $c_u$  (UU-Versuch)
- Scherparameter  $\phi$  und  $c$  (CU-Versuch)

Eine Literaturlauswertung ergab, daß mehrfach versucht worden ist, durch statistische Methoden die Scherparameter von bindigen Böden mit anderen Kenngrößen zu korrelieren. Hierfür wurden neben der Kornverteilung und der Porenzahl  $e$  vor allem die Atterbergschen Grenzen  $w_L$  und  $w_p$ , der daraus abgeleitete Plastizitätsindex  $I_p$  sowie die Konsistenzzahl  $I_C$  als Maß für die Festigkeit des Bodens herangezogen. Diese Größen sind für die Anwendung auf

gemischtkörnige Böden wenig geeignet. Einerseits werden aufgrund der normgemäßen Versuchsdurchführung bis zu 30 % der Kornfraktionen nicht berücksichtigt, andererseits treten aufgrund der bei diesen Böden eng beieinander liegenden Fließ- und Ausrollgrenzen große Streuungen der Versuchswerte auf.

Untersuchungen, die sich speziell mit der Abhängigkeit zwischen der Porenzahl  $e$  als Maß der Verdichtung und den Scherparametern für gemischtkörnige Böden befassen, wurden in der Literatur nicht gefunden.

Zur Sichtung der Versuchsergebnisse und der Bestimmung der Relevanz der Parameter wurden Häufigkeitsverteilungen der Kenngrößen  $e$ ,  $w$ ,  $\phi$ ,  $c$ ,  $c_u$  und  $q_u$ , für organische Böden außerdem für  $\gamma_d$  und  $V_{gl}$  ermittelt und aufgetragen.

Die Ergebnisse für die fein- und gemischtkörnigen Böden wurden abhängig vom Feinkornanteil ( $a(0,06)$  - Siebdurchgang bei  $d = 0,06$  mm) in folgende Untergruppen unterteilt:

- |   |                                 |
|---|---------------------------------|
| 1 | $15 \% \leq a(0,06) \leq 26 \%$ |
| 2 | $26 \% < a(0,06) \leq 33 \%$    |
| 3 | $33 \% < a(0,06) \leq 40 \%$    |
| 4 | $40 \% < a(0,06) \leq 60 \%$    |
| 5 | $26 \% < a(0,06) \leq 40 \%$    |

Die Gruppen 2 und 3 wurden zu einer 5. Gruppe zusammengefaßt, in der auch Versuchsergebnisse ohne genaue Angaben über die Kornverteilung aufgenommen wurden. Proben mit einem Feinkorngehalt  $a(0,06) < 15 \%$  sind nur in Einzelfällen in der Datenbank erfaßt worden und wurden daher nicht untersucht.

Die Gruppe 4 enthält Böden, die nach DIN 18196 nicht als gemischtkörnige, sondern als feinkörnige Böden zu klassifizieren sind. Diese Böden haben im allgemeinen die gleiche geologische Entstehungsgeschichte und ähnliche bodenmechanische Eigenschaften. Es erschien daher sinnvoll, die Untersuchung auf diese Böden zu erweitern.

In einem ersten Schritt wurden die Beziehungen zwischen  $e$  und  $w$  sowie dem Sättigungsgrad  $S_r$  einerseits und den Festigkeitsgrößen  $\phi$ ,  $c$ ,  $c_u$  und  $q_u$  andererseits für die fein- und gemischtkörnigen Böden der Gruppen 1 bis 5 aufgetragen.

Die Auftragung weist, vor allem für die Kohäsion, sehr große Streuungen auf. Abhängigkeiten sind kaum zu erkennen. Als Tendenz ist eine Abnahme von  $\phi$  und  $c$  mit wachsendem  $e$  bzw.  $w$

zu sehen. Von  $S_r$  scheinen sowohl  $\phi$  als auch  $c$  unabhängig zu sein. Eine statistische Bearbeitung dieser sehr wenig ausgeprägten Abhängigkeiten erscheint nicht sinnvoll, da nur geringe Korrelationskoeffizienten zu erwarten sind. Um die Wechselwirkung der Größen  $\phi$  und  $c$  zu untersuchen, wurde für eine fiktive Überlagerungsspannung  $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$  die Vergleichsscherfestigkeit  $\tau_{200} = \sigma \times \tan(\phi) + c$  berechnet und deren Abhängigkeit zu  $e$ ,  $w$  und  $S_r$  aufgetragen. Hier zeigen sich deutlich geringere Streuungen als bei getrennter Betrachtung der Scherparameter. Es wird erkennbar, daß die Scherfestigkeit mit wachsendem Porenanteil bzw. Wassergehalt stetig abnimmt.

Die Untersuchung der Vergleichsscherfestigkeit zeigt, daß statt einer Auswertung von  $\phi$  und  $c$  wegen der gegenseitigen Abhängigkeit dieser Größen eine Betrachtung der eigentlichen Ergebnisse der Einzelversuche, nämlich der Mohrschen Kreise im Bruchzustand sinnvoll ist. Als Parameter für die weiteren Untersuchungen wurden daher die als dimensionslose Größen Spannungsverhältnisse  $\sigma_1/\sigma_3$  für drei anhand von statistischen Auswertungen der Datenbank gewählte Laststufenbereiche verwendet:

- |            |   |
|------------|---|
| 1. Bereich | $\sigma_3 \leq 120 \text{ kN/m}^2$                      |
| 2. Bereich | $120 \text{ kN/m}^2 < \sigma_3 \leq 220 \text{ kN/m}^2$ |
| 3. Bereich | $\sigma_3 > 220 \text{ kN/m}^2$                         |

Die Ergebnisse der Einzelversuche wurden in die Laststufenbereiche eingeordnet und diese Zusammenstellungen getrennt nach Bodengruppen hinsichtlich ihrer Abhängigkeiten zu  $e$  und  $w$  weiter untersucht.

Das Verhältnis  $\sigma_1/\sigma_3$  und damit die Bruchspannung verringert sich sowohl mit wachsender Porenzahl  $e$  als auch mit steigendem Wassergehalt  $w$ , die Streuungen sind bei der kleinsten Laststufe ( $\sigma_3 < 120 \text{ kN/m}^2$ ) am größten und werden mit wachsendem Seitendruck kleiner. Die Streuungen sind für  $w$  erheblich größer als für  $e$ . Die weitere Untersuchung erfolgte daher nur für die Porenzahl.

Zur statistischen Auswertung der Daten wurden lineare und nichtlineare Regressionsanalysen durchgeführt, wobei sich die besten Korrelationen beim potentiellen Ansatz der Form

$$\sigma_1/\sigma_3 = f(e) = a \times e^b$$

ergaben. Die Korrelationsfaktoren lagen zwischen  $R = 0,5$  und  $R = 0,8$ . Zusätzlich zu den Mittelwertkurven wurden die 5 %- Fraktile der Mittelwerte berechnet.

Mit Hilfe der für die drei untersuchten Laststufenbereiche gefundenen Funktionen wurden in Abhängigkeit von  $e$  die Parameter der Bruchspannungskreise und daraus nach DIN 18137 in

der üblichen Form  $\phi$  und  $c$  berechnet. Sowohl für die Seitendrücke  $\sigma_3$  als auch die Funktionen  $\sigma_1/\sigma_3 = f(e)$  wurden hierbei die bei der Auswertung der Einzelversuche ermittelten Mittelwerte und deren 5 %- Fraktilen verwendet. Die 5 %- Fraktilen (Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 5 \%$ ) der Mittelwerte stellen nach den Bestimmungen des Eurocode EC7-1 die charakteristischen Kennwerte einer Kenngröße dar.

Bei allen Bodengruppen nimmt der Mittelwert von  $\phi$  mit steigendem  $e$  nahezu linear ab. Der Mittelwert liegt für  $e = 0,25$  zwischen ca.  $36^\circ$  und  $38,5^\circ$ , für  $e = 0,5$  zwischen  $18^\circ$  und  $26^\circ$ . Für große Porenanteile wird der Reibungswinkel um so geringer, je höher der Feinkorngehalt ist. Bei ca.  $e = 0,27$  beträgt der Reibungswinkel bei allen gemischtkörnigen Böden (Gruppen 1, 2, 3 und 5) etwa  $\phi = 35^\circ$ . Die Auftragung der unteren 5 %-Fraktilen zeigt den gleichen Verlauf, wobei die Werte für den Reibungswinkel  $1^\circ$  bis  $4^\circ$  kleiner als die Mittelwerte sind.

Die Abhängigkeit der Mittelwerte der Kohäsion von der Porenzahl zeigt bei den gemischtkörnigen Böden (Gruppen 1 bis 3 und 5) ebenfalls für wachsendes  $e$  eine stetige Abnahme von ca.  $65 \text{ kN/m}^2$  bis  $83 \text{ kN/m}^2$  bei  $e = 0,25$  auf  $14 \text{ kN/m}^2$  bis  $34 \text{ kN/m}^2$  bei  $e = 0,5$ . Die Kurven laufen annähernd parallel, eine stetige Abhängigkeit vom Feinkorngehalt, wie beim Reibungswinkel zu beobachten, zeigt sich nicht.

Bei den feinkörnigen Böden (Gruppe 4) ist ein wesentlich flacherer Verlauf der Kurve festzustellen. Der Mittelwert der Kohäsion verringert sich nur von ca.  $60 \text{ kN/m}^2$  bei  $e = 0,25$  auf  $50 \text{ kN/m}^2$  bei  $e = 0,5$ .

Die Kurven der 5 %-Fraktilen der Kohäsion weichen für die einzelnen Bodengruppen aufgrund unterschiedlicher Streuungen und zum Teil abweichender Stichprobenzahlen unterschiedlich stark von den Mittelwertkurven ab. Für feinkörnige Böden ergibt sich eine Kurve mit einem Maximum bei ca.  $e = 0,35$ . Ein Zusammenhang zwischen  $c$ ,  $e$  und dem Feinkorngehalt, wie für den Reibungswinkel wird nicht erkennbar.

Zusätzlich zu den CU-Versuchen wurden die einaxiale Druckfestigkeit  $q_u$  und die undrainierte Kohäsion  $c_u$  an insgesamt 130 bzw. 200 ungestörten Proben mit ca. 300 bzw. 400 Einzelversuchen untersucht. Entsprechend der Vorgehensweise bei den CU-Versuchen wurden die Ergebnisse in Bodengruppen eingeteilt. Die Versuchswerte wurden ebenfalls abhängig von  $e$ ,  $w$  und  $S_r$  aufgetragen. Es zeigte sich, daß die Werte von  $c_u$  für alle Parameter große Streuungen aufwiesen. Die Auswertung wurde daher nicht weiter verfolgt.

Einfache nichtlineare Regressionsanalysen der einaxialen Druckfestigkeit wurden mit potentiellen Ansätzen durchgeführt. Auch für diese Versuche zeigten sich nur sehr geringe Korrelationen für  $S_T$ , weshalb auch hier diese Abhängigkeit nicht weiter berücksichtigt wurde. Die besten Korrelationen (ca.  $R = 0,5$  bis  $R = 0,8$ ) ergeben sich für die Abhängigkeit vom Wassergehalt. Für stark sandige und sandige Böden ergaben sich für die Abhängigkeit von  $w$  fast identische Mittelwertkurven. Diese Bodengruppen können demnach zusammengefaßt werden. Feinkörnige Böden ( $a(0,06) > 40\%$ ) weisen eine signifikant höhere Druckfestigkeit auf, die Korrelation ist jedoch wesentlich schlechter.

Die ermittelten Kurven der unteren 5 %-Fraktilen für die Abhängigkeiten zwischen  $\phi$  und  $e$ ,  $c$  und  $e$  sowie  $q_{11}$  und  $w$  können für die einzelnen Bodengruppen nach EC-7 als charakteristische Werte  $\phi_k(e)$ ,  $c_k(e)$  und  $c_{uk}(w)$  der Bodenkenngrößen angesehen werden.

Für die praktische Anwendung sollte außer der Abhängigkeit von  $e$  bzw.  $w$  auch der Einfluß des Feinkorngehalts  $a(0,06)$  kontinuierlich berücksichtigt werden können. Hierfür wurde mittels einfacher linearer Ansätze die Abhängigkeiten  $\phi_k(e)$  sowie  $c_k(e)$  dargestellt. Für  $e = 0,25$  wurde  $\phi_k = 36^\circ$  für gemischtkörnige, für feinkörnige  $\phi_k = 35^\circ$  gewählt. Die Neigung der Geraden ist abhängig vom Feinkornanteil, die durch eine Funktion  $\phi_k(e = 0,5) = f(a(0,06))$  ermittelt wird. Für die Kohäsion wurde wegen des regellosen Verlaufs der Kurven für gemischtkörnige sowie für feinkörnige Böden jeweils ein linearer Ansatz gewählt, der die Untergrenze der Kurvenscharen repräsentiert.

Für die Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit vom Wassergehalt wurde festgestellt, daß jeweils eine Kurve die Werte für gemischtkörnige und feinkörnige Böden repräsentiert. Hierfür wurde durch Kurvenanpassung eine potentielle (gemischtkörnige Böden) bzw. eine exponentielle (feinkörnige Böden) Funktion ermittelt. Eine weitere Differenzierung der Werte für gemischtkörnige Böden nach dem Feinkorngehalt war nicht erforderlich.

Die mit den gefundenen Ansätzen zu berechnenden Werte wurden mit den in den Regelwerken (EAU, DIN 1055, Entwurf DIN 1054) angegebenen charakteristischen Werten bzw. Rechenwerten verglichen. Für  $\phi$  ergaben sich gute Übereinstimmungen im Bereich der am häufigsten vorkommenden Porenzahlen ( $0,3 < e < 0,4$ ), für große Porenzahlen ( $e > 0,4$  bis  $e > 0,45$ ) sind die mit dem entwickelten Rechenansatz berechneten Reibungswinkel kleiner als die Erfahrungswerte. Für die Kohäsion ergeben sich aus der vorliegenden Untersuchung trotz des sehr auf der sicheren Seite liegenden Ansatzes grundsätzlich deutlich höhere Werte. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, daß bei Festlegung der Angabe dieser Kenngröße in den o.g. Regelwerken sicherheitstheoretische Überlegungen aus der Praxis eingeflossen sind.

Vergleicht man die mittels der Beziehung  $c_u = q_u/2$  in die undrainierte Scherfestigkeit umgerechnete einaxiale Druckfestigkeit mit den in der EAU 1996 angegebenen Erfahrungswerten, zeigen sich gute Übereinstimmungen.

Entsprechend den Untersuchungen an gemischt- und feinkörnigen Böden wurden für die Daten von organischen Böden die Abhängigkeiten der Scherparameter  $\phi$ ,  $c$ ,  $c_u$  und  $q_u$  zum Wassergehalt und zur Trockendichte getrennt nach den Bodenarten (Torf, Faulschlamm und Wiesenalk) aufgetragen. Bei allen Auftragungen zeigten sich sehr große Streuungen der Versuchswerte. Bei den vorgenommenen Regressionsanalysen ergaben sich die besten Korrelationen wiederum für potentielle Ansätze.

Die Korrelationskoeffizienten streuten sehr stark zwischen  $R = 0,09$  und  $R = 0,58$ , wobei sich die größten Werte für Faulschlamm, die kleinsten für Torf ergaben. Für Faulschlamm und Wiesenalk zeigte sich für  $\phi$ ,  $c$  und  $c_u$  überwiegend ein Anstieg der Scherparameter mit wachsendem  $\gamma_d$  bzw. mit abnehmendem Wassergehalt. Bei der Auswertung der einaxialen Druckfestigkeit zeigten sich widersprüchliche Tendenzen. Wegen der stark streuenden Korrelationskoeffizienten und den zum Teil der bodenmechanischen Erfahrung widersprechenden Abhängigkeiten wurde die Auswertung nicht weiter verfolgt. Die Untersuchung der organischen Proben ergab, daß für statistisch gesicherte Aussagen eine wesentlich größere Stichprobenzahl sowie weitere Daten (z.B. Zersetzungsgrad bei Torf) notwendig sind.

Statt des für gemischtkörnige Böden wenig aussagefähigen Kriteriums der Konsistenz hat sich der Einfluß des Porenanteils auf die Scherparameter als maßgebend herausgestellt. Der Einfluß des Feinkorngehalts zeigt sich beim Reibungswinkel.

Die statistische Auswertung wurde für große Wertebereiche von  $e$  bzw.  $w$  durchgeführt, um auch Proben mit extremen Abweichungen erfassen zu können. Hieraus resultiert, vor allem bei der Kohäsion, eine teilweise große Abweichung der 5 %- Fraktile von den Mittelwerten in den Randbereichen, d.h. bei kleinen und großen Werten von  $e$  und  $w$ . Für die praktische Anwendung sollten die Rechenansätze daher nur für folgende Bereiche verwendet werden, die ca. 95 % der untersuchten Bodenproben abdecken:

$15 \% < a(0,06) \leq 26 \%$	$0,25 \leq e < 0,4$
$26 \% < a(0,06) \leq 40 \%$	$0,25 \leq e < 0,45$
$40 \% < a(0,06) \leq 60 \%$	$0,3 \leq e < 0,45$

Die vorgestellten Ansätze sind nur für Böden mit stetigen Kornverteilungskurven mit Ungleichförmigkeitszahlen zwischen  $U > 7,5$  gültig. Die Anwendung ist ferner auf Böden mit Feinkorngehalten  $15 \% \leq a(0,06) \leq 60 \%$  zu beschränken.

Die Parameter  $a(0,06)$ ,  $e$  und  $w$  weisen im Gegensatz zu den Konsistenzgrenzen einen unmittelbaren Zusammenhang mit der Entstehungs- und Belastungsgeschichte und damit der Festigkeit der untersuchten Böden auf. Die Bestimmung dieser Kenngrößen erfolgt durch einfach durchzuführende Versuche mit sehr geringer Streubreite.

Die Einordnung der hier untersuchten Böden in die vorhandenen Regelwerke ist zum Teil widersprüchlich, teilweise fehlen auch Angaben völlig. Mit den vorgestellten Ansätzen wird es möglich, eine differenzierte Abschätzung der Scherparameter vorzunehmen. Die Untersuchung hat gezeigt, daß sich der Reibungswinkel mit wesentlich geringeren Fehlergrenzen bestimmen läßt als die Kohäsion.

Die vorliegende Untersuchung beschränkt sich auf Böden aus dem Berliner Raum, die jedoch für die gesamte norddeutsche Tiefebene charakteristisch sind. Die vorgestellten Rechenansätze sind demnach auch nur für Böden gleicher Zusammensetzung und geologischer Herkunft anwendbar. Um feststellen zu können, ob die vorliegenden Ergebnisse allgemein auf gemischtkörnige Böden auch aus anderen Regionen und anderer Entstehungsgeschichte angewandt werden können, sind weitergehende Untersuchungen erforderlich, für die überregionale Datenbanken anzulegen sind. Mit Hilfe größerer Stichprobenzahlen wäre auch eine Korrektur der in der vorliegende Arbeit ermittelten, verhältnismäßig stark streuenden charakteristischen Werte der Kohäsion möglich. Es ist ferner zu erwarten, daß auf dieser Grundlage auch eine statistisch gesicherte Aussage über die Abhängigkeit der undrainierten Scherfestigkeit von anderen Parametern möglich wird.

Die vorgestellten Rechenansätze stellen einen ersten Versuch dar, die Abhängigkeiten der Scherparameter  $\phi$ ,  $c$  und  $q_u$  zu anderen Bodenkenngrößen zu beschreiben und damit Anhaltswerte für die Gültigkeit von anderweitig im Labor ermittelten Scherparametern zu liefern. Unseres Erachtens sind weitere Untersuchungen an möglichst umfangreichen Datenammlungen erforderlich. Die praktische Anwendung sollte unter kritischer Berücksichtigung der eigenen Erfahrungen erfolgen.