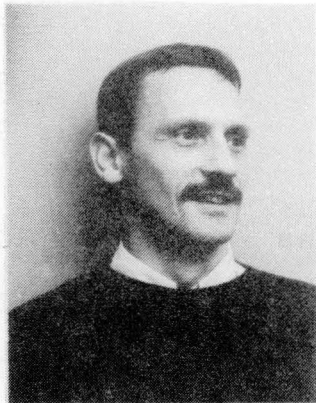


ERFAHRUNGEN MIT BODENMECHANISCHEN
LABORVERSUCHEN AN KLEI

Statistical Evaluation of Soil-mechanical Laboratory Tests
with North-German normally-consolidated Clay



Bernd Schuppener, Dr.-Ing. Bauoberrat in
der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW).

Geboren 1944, Studium des Bauingenieur-
wesens an der Technischen Universität
Berlin von 1965 bis 1972. Seit 1972 in
der Bundesanstalt für Wasserbau und dort
Leiter des Referats Erd- und Grundbau
der Außenstelle Küste. 1981 Promotion
an der technischen Universität Braun-
schweig über die Standsicherheit von
Offshore-Gründungen.

Inhaltsangabe

Es wird über die statistische Auswertung von Ergebnissen bodenmechanischer Laborversuche an Klei berichtet. Die Untersuchung zeigt, daß im Gegensatz zu anderen bindigen Böden weder der natürliche Wassergehalt noch die Konsistenzzahl eine zuverlässige Vorhersage der Festigkeit des undrainierten Bodens erlaubt. Der Grund liegt in der ausgeprägten Bänderung und den organischen Einlagerungen, die zu starken Schwankungen des Wassergehalts innerhalb einer Probe führen. Eine schnelle und einfache Bestimmung der Festigkeit des undrainierten Bodens ermöglichen Versuche mit dem Taschenpenetrometer oder dem Laborflügel, deren Versuchsergebnisse sehr gut mit dem undrainierten, unkonsolidierten Triaxialversuch übereinstimmen. Gute Korrelationen ergeben sich zwischen dem Wassergehalt und dem Steifemodul. Es werden Kurventafeln angegeben, aus denen der Steifemodul für Setzungsabschätzungen in Abhängigkeit vom Wassergehalt und der Belastung entnommen werden kann.

Summary

Statistical evaluations of soil-mechanical laboratory tests with North-German normally consolidated clay are presented. They show that in contrast to other cohesive soils neither the water content nor the consistency index present a reliable basis for an approximate estimation of the undrained shear strength. The reason is the stratification of the clay which produces a strong variation of the water content even within the clay sample. The undrained shear strength can be determined by tests with a pocket penetrometer or a laboratory vane quickly and simply. The test results correlate very well with those of unconfined compression tests (U-tests) and unconsolidated, undrained triaxial tests (UU-tests). Furthermore the evaluation shows a good correlation between the water content and the Young's modulus. Diagrams from which the Young's modulus can be gained as a function of water content and load, are presented.

I N H A L T

	Seite
1 Einleitung	95
2 Entstehung und Zusammensetzung von Klei	95
3 Klassifikationsversuche	96
3.1 Plastizitätszahl	96
3.2 Korndichte	98
3.3 Wassergehalt und Konsistenzzahl	99
4 Scherfestigkeit des undränierten Bodens	100
5 Reibungswinkel und Kohäsion	103
6 Steifenmodul	108
6.1 Wassergehalt	108
6.2 Penetrometerversuch	110
7 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	111
8 Literatur	112

1 Einleitung

Im Bereich der deutschen Nordseeküste gibt es wohl kaum eine Bodenart, die die Gründung von Wasserbauten so nachhaltig beeinflußt wie der Klei. Seit der Gründung des Labors der Außenstelle Küste vor über 50 Jahren sind daher bodenmechanische Versuche an Klei durchgeführt worden. Erst mit der Vereinheitlichung und der Normung von bodenmechanischen Versuchen sind jedoch die Voraussetzungen gegeben, die Ergebnisse dieser Versuche statistisch auszuwerten. Ziel einer solchen statistischen Auswertung ist es, Korrelationen zwischen einzelnen Bodenkennwerten bzw. Versuchsergebnissen aufzuspüren und damit zu einem besseren Verständnis bodenmechanischer und bodenphysikalischer Zusammenhänge zu gelangen. Darüberhinaus ermöglichen statistisch abgesicherte Korrelationen für Bodenkennwerte einer Bodenart eine Optimierung der Auswahl und Zahl von Laborversuchen für praktische Aufgaben. Im folgenden Beitrag sollen die Zuverlässigkeit und Grenzen einer statistischen Auswertung von Ergebnissen bodenmechanischer Versuche an Klei aufgezeigt werden.

2 Entstehung und Zusammensetzung von Klei

Der norddeutsche Klei ist ein holozänes Sediment aus organischen und anorganischen Bestandteilen, das sich im Fluß- oder Meeresbereich bei geringer Wasserbewegung gebildet hat. Aus diesem Grund sind Ton und Schluff die Hauptbestandteile von Klei, der in der Regel eine ausgeprägte Feinschichtung im mm- und cm-Bereich aufweist. Die Konsistenz von Klei ist breiig bis weich im Gegensatz zum geologisch jüngeren Schlick, dessen Konsistenz flüssig bis breiig ist.

Je nach den Sedimentationsbedingungen kann die Zusammensetzung von Norddeutschem Klei außerordentlich unterschiedlich sein. Um die damit verbundenen Schwierigkeiten bei der statistischen Auswertung der Versuchsergebnisse zu mindern, wurden die Untersuchungen auf Proben beschränkt, deren Glühverlust und Sandgehalt kleiner als 15 % ist. Einen solchen Boden nennen wir 'Klei'. Ist der Glühverlust größer als 15 % bzw. 30 % so sprechen wir von einem 'torfigen Klei' bzw. einem 'stark torfigen Klei'. Entsprechend wird ein Klei mit einem Sandgehalt größer als 15 % bzw. 30 % als 'sandiger Klei' bzw. 'stark sandiger Klei' bezeichnet.

Der statistischen Auswertung liegen Versuchsergebnisse von 158 Sonderproben aus ganz Norddeutschland zugrunde. Hinsichtlich der Kornverteilung, des Wassergehalts, der Plastizität und der Aktivität liegen die Versuchsergebnisse an den Proben überwiegend zwischen folgenden Grenzwerten:

	Minimum	Maximum
Ton (%)	20	50
Schluff (%)	40	80
Sand (%)	0	15
Wassergehalt w (-)	0,35	1,35
Plastizitätszahl I_p (-)	0,3	0,9
Aktivitätszahl I_a (-)	1,0	2,5
Glühverlust V_{gl} (%)	5	15

3 Klassifikationsversuche

3.1 Plastizitätszahl

Die Plastizitätszahl von Klei wird vor allem durch den Tongehalt und den Gehalt an organischen Bestandteilen beeinflusst. Der Gehalt an organischen Bestandteilen wird näherungsweise über den Glühverlust bestimmt. Bei diesem Versuch wird die Probe bei etwa 600 Grad geblüht. Der beim Glühen entstehende Massenverlust umfaßt jedoch nicht nur organische Bestandteile sondern auch Kristallwasser der Tonminerale. Daher ist trotz gleichbleibendem Gehalt an organischen Bestandteilen bei ansteigendem Tongehalt eine Zunahme des Glühverlusts festzustellen.

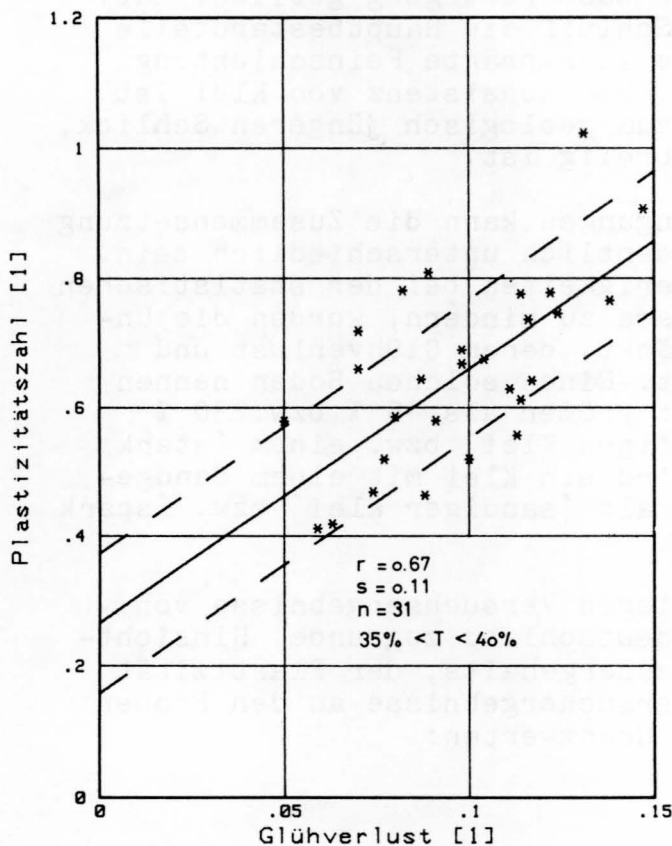


Bild 1 Plastizität in Abhängigkeit vom Glühverlust

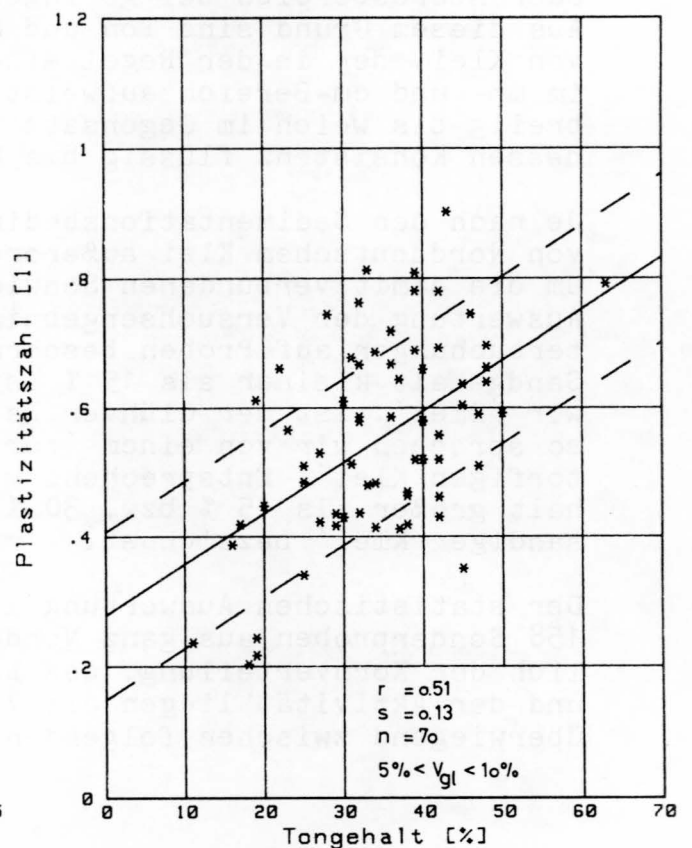


Bild 2 Plastizität in Abhängigkeit vom Tongehalt

Aus diesen Gründen wurden bei der Untersuchung des Einflusses des Glühverlusts auf die Plastizität nur Proben mit annähernd gleichem Tongehalt (zwischen 35 % und 40 %) herangezogen (siehe Bild 1).

Ebenso wurde bei der Untersuchung des Einflusses des Tongehalts (siehe Bild 2) der Glühverlust auf den Bereich von 5 % bis 10 % beschränkt. Man erkennt, daß der Einfluß des Glühverlusts auf die Plastizität erheblich stärker ist als der Tongehalt. In beiden Fällen scheint der Korrelationskoeffizient r auf den ersten Blick nicht besonders groß zu sein. Man muß dabei jedoch bedenken, daß die Plastizität von Klei nicht nur von dem Gehalt an organischen Bestandteilen und dem Tongehalt, sondern auch von der Art der enthaltenen Tonminerale bestimmt wird. Bei mehreren unabhängigen Einflußgrößen ist ein größerer Korrelationskoeffizient daher nicht zu erwarten, insbesondere wenn man die Inhomogenität der Kleiprobe berücksichtigt, die in der Regel eine ausgeprägte Feinschichtung aufweisen.

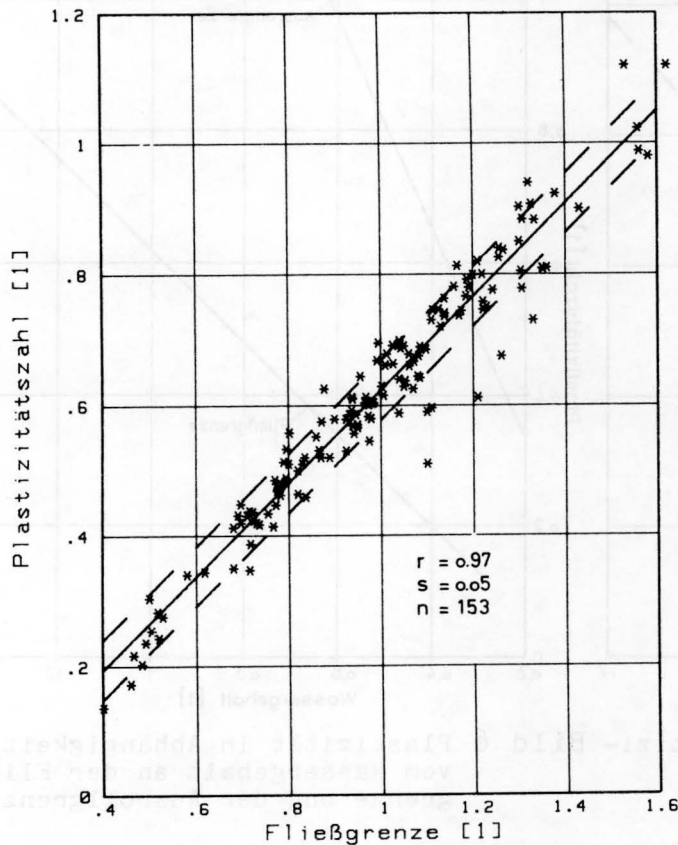


Bild 3 Zusammenhang zwischen Plastizitätszahl und Fließgrenze

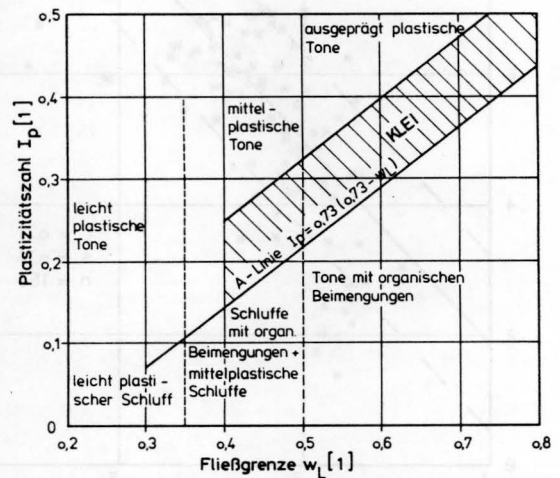


Bild 4 Plastizitätsdiagramm nach Casagrande

Anmerkung: In den Diagrammen sind die Versuchsergebnisse als * dargestellt. Die durchgezogene Gerade stellt die nach der Methode der kleinsten Quadrate ermittelte Ausgleichsgerade dar, während die gestrichelte Linie die Größe des Standardfehlers veranschaulicht. Mit n wird die Zahl der Proben, mit r der Korrelationskoeffizient und mit s die Standardabweichung bezeichnet.

Das Bild 3 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt an der Fließgrenze und der Plastizitätszahl, zwischen denen eine sehr gute Korrelation besteht. Der Bereich, den der Klei im Plastizitätsdiagramm von Casagrande einnimmt, ist im Bild 4 dargestellt. Danach liegt er oberhalb der A-Linie, obgleich Klei bei einem Glühverlust von 10 % als organischer Schluff bzw. organischer Ton (Bodenklasse U0 und T0 gemäß DIN 18196) eigentlich unterhalb der A-Linie liegen müßte.

Das Bild 5 zeigt den Zusammenhang zwischen der Plastizitätszahl und dem Wassergehalt an der Ausrollgrenze w_p . Bei Klei steigt also die Plastizitätszahl nicht nur mit der Fließgrenze sondern in noch stärkerem Maß mit der Ausrollgrenze (siehe Bild 6).

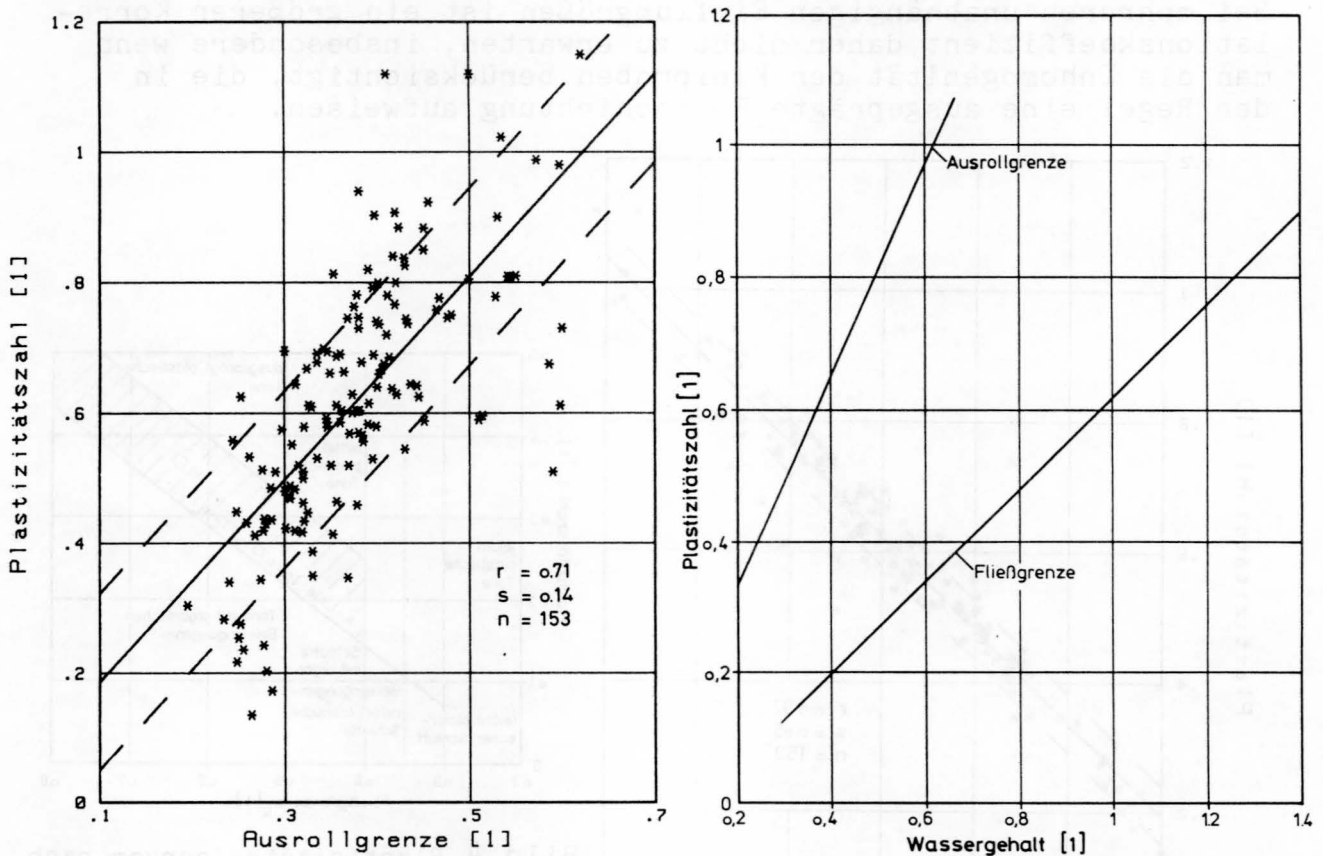


Bild 5 Zusammenhang zwischen Plastizitätszahl und Ausrollgrenze

Bild 6 Plastizität in Abhängigkeit vom Wassergehalt an der Fließgrenze und der Ausrollgrenze

3.2 Korndichte

Da sich die Korndichten der mineralischen Bestandteile des Kleis nicht nennenswert unterscheiden, wird die Korndichte vor allem durch den Anteil der organischen Bestandteile (Glühverlust) bestimmt. Dies bestätigt sich bei einer Erweiterung der Auswertung auf torfigen Klei (siehe Bild 7), deren Ergebnis sehr gut mit den Untersuchungen von KÖGLER + SCHEIDIG (1948) übereinstimmt.

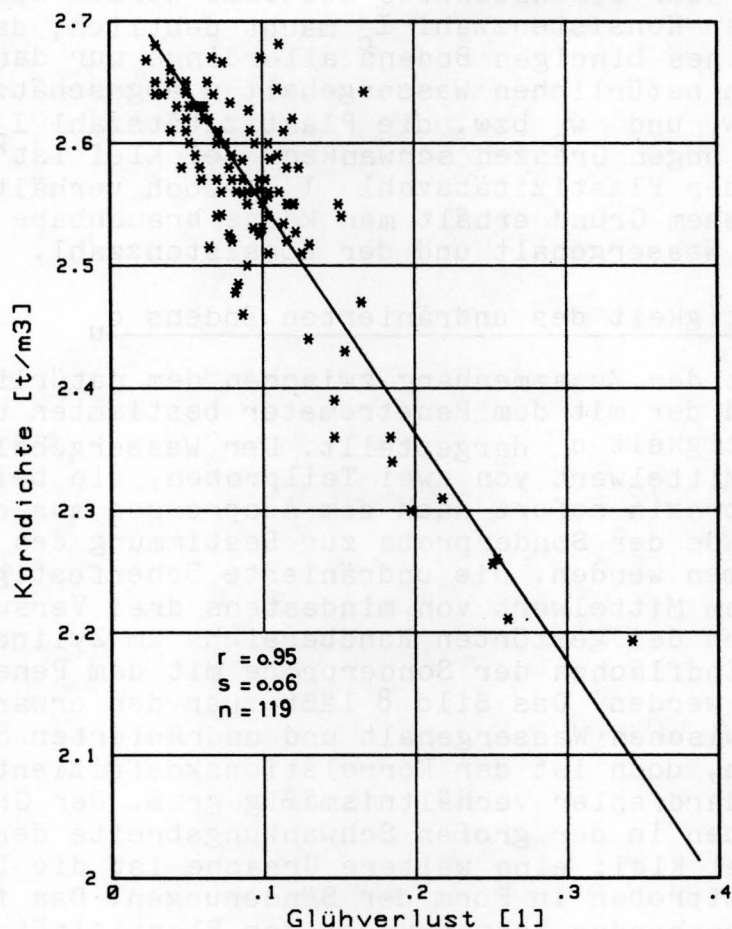


Bild 7 Zusammenhang zwischen Glühverlust und Korndichte bei Kiel und torfigem Klei

3.3 Wassergehalt und Konsistenzzahl

Zur ersten Bewertung der Festigkeit eines bindigen Bodens wird in der Regel der natürliche Wassergehalt w einer Probe herangezogen. Eine solche Bewertung kann jedoch nur dann zutreffend sein, wenn die Plastizität des Bodens in verhältnismäßig engen Grenzen schwankt. Dies wird an der Konsistenzzahl I_c deutlich, die aus dem natürlichen Wassergehalt w , dem Wassergehalt an der Fließgrenze w_l und dem Wassergehalt an der Ausrollgrenze w_p bestimmt wird:

$$I_c = (w_l - w) / (w_l - w_p).$$

Der Wassergehalt an der Fließgrenze w_l und der Wassergehalt an der Ausrollgrenze w_p sind Wassergehalte bei genormten Festigkeiten eines bindigen Bodens. Bei der Definition der

Konsistenzzahl dienen diese beiden Wassergehalte als Skala, mit der die Festigkeit über den natürlichen Wassergehalt w zahlenmäßig, aber dimensionslos bestimmt werden kann. Die Definition der Konsistenzzahl I_c macht deutlich, daß die Festigkeit eines bindigen Bodens c allerdings nur dann zutreffend über den natürlichen Wassergehalt w abgeschätzt werden kann, wenn w_l und w_p bzw. die Plastizitätszahl I_p in verhältnismäßig engen Grenzen schwanken. Bei Klei ist I_p die Schwankungsbreite der Plastizitätszahl I_p jedoch verhältnismäßig groß. Aus diesem Grund erhält man keine brauchbare Korrelation zwischen dem Wassergehalt und der Konsistenzzahl.

4 Scherfestigkeit des undrännierten Bodens c_u

Im Bild 8 ist der Zusammenhang zwischen dem natürlichen Wassergehalt und der mit dem Penetrometer bestimmten undrännierten Scherfestigkeit c_u dargestellt. Der Wassergehalt entspricht dem Mittelwert von zwei Teilproben, die bei der üblichen Laborpraxis sofort nach dem Auspressen aus dem Stutzen am unteren Ende der Sonderprobe zur Bestimmung des Wassergehalts entnommen werden. Die undrännierte Scherfestigkeit c_u entspricht dem Mittelwert von mindestens drei Versuchen, die nach Abschälen des gestörten Randbereichs am Zylindermantel oder an den Endflächen der Sonderprobe mit dem Penetrometer durchgeführt werden. Das Bild 8 läßt zwar den erwarteten Zusammenhang zwischen Wassergehalt und undrännierter Scherfestigkeit erkennen, doch ist der Korrelationskoeffizient gering und der Standardfehler verhältnismäßig groß. Der Grund dafür liegt zum einen in der großen Schwankungsbreite der Plastizitätszahl bei Klei; eine weitere Ursache ist die Inhomogenität der Kleiprobe in Form der Bänderungen. Das führt nicht nur zu entsprechenden Schwankungen der Plastizität sondern auch des Wassergehalts innerhalb der Probe, so daß der am unteren Ende der Probe bestimmte Wassergehalt durchaus nicht dem Wassergehalt an den Stellen entsprechen muß, wo der Penetrometerversuch durchgeführt wurde.

Auch bei der Auftragung der Scherfestigkeit des undrännierten Bodens c_u über der Konsistenzzahl (siehe Bild 9) erhält man keine befriedigende Korrelation, selbst wenn man sich auf Proben aus geringer Entnahmetiefe (Überlagerungsdruck $\sigma_v < 100$ kN/m²) beschränkt. Der Grund dafür liegt wieder in der ausgeprägten Inhomogenität des Kleis, die zu starken Schwankungen nicht nur des Wassergehalts und der Plastizität sondern auch der undrännierten Scherfestigkeit innerhalb der Probe führen kann. Bei der üblichen Laborpraxis, bei der die einander zugeordneten Wertepaare von Wassergehalt bzw. Konsistenzzahl und undrännierter Scherfestigkeit nicht an der gleichen Teilprobe bestimmt werden, führt das zwangsläufig zu unbefriedigenden Korrelationen. Diesen Erfahrungen wurde in unserer Laborpraxis seither in folgender Weise Rechnung getragen. Der natürliche Wassergehalt von Sonderproben wird an Teilproben bestimmt, die nach Abschälen des gestörten Randbereichs über die ganze Höhe der Probe genommen werden.

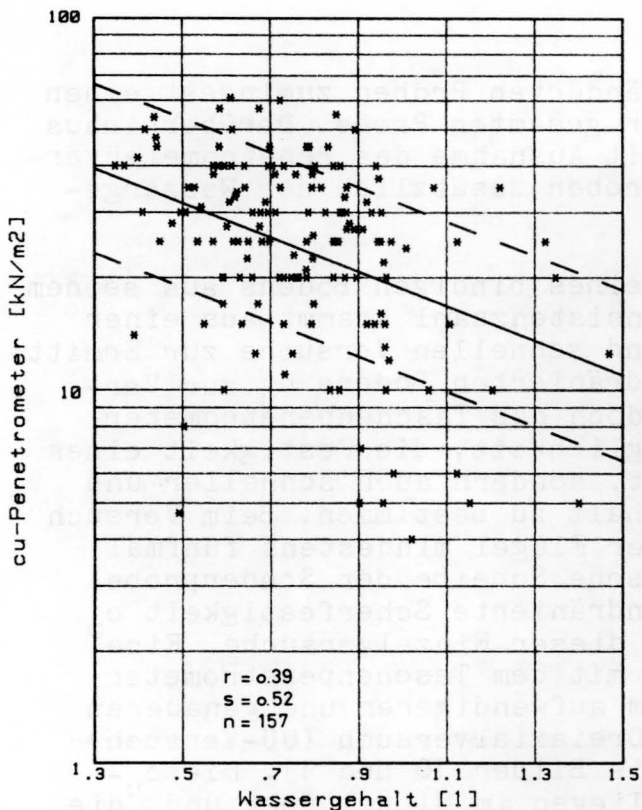


Bild 8 Abhängigkeit der Scherfestigkeit des undrnierten Bodens c_u vom Wassergehalt

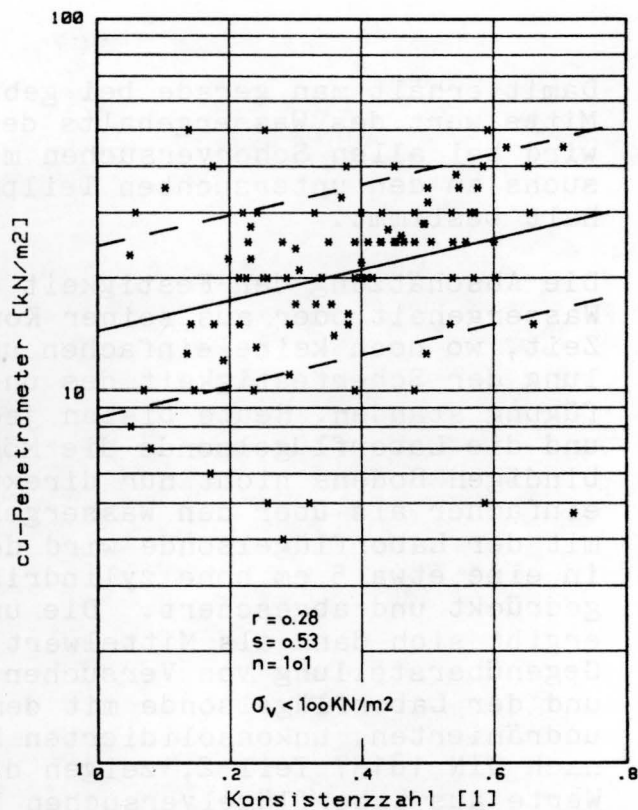


Bild 9 Abhängigkeit der Scherfestigkeit des undrnierten Bodens c_u von der Konsistenzzahl

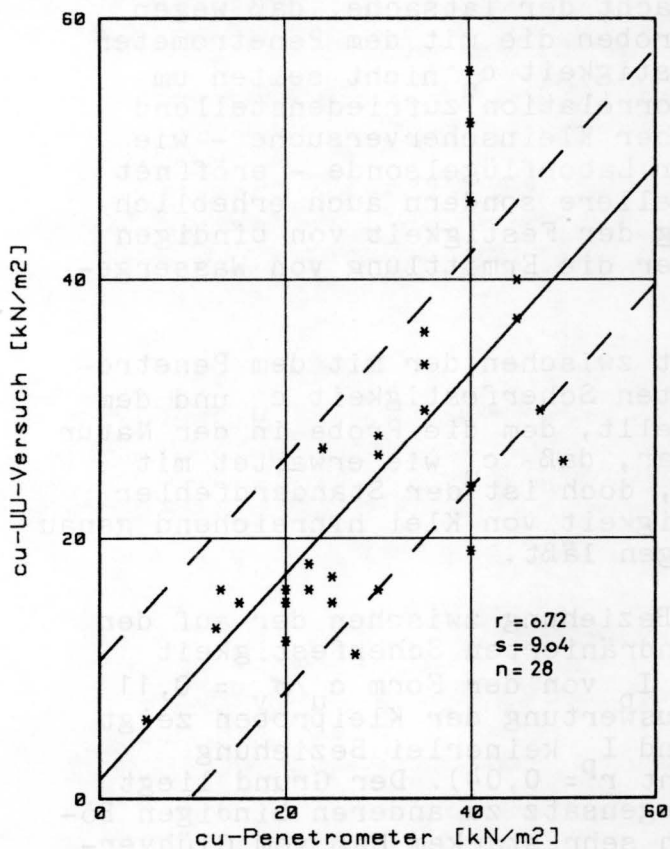


Bild 10 Vergleich der Scherfestigkeit des undrnierten Bodens c_u aus UU- und Penetrometerversuchen

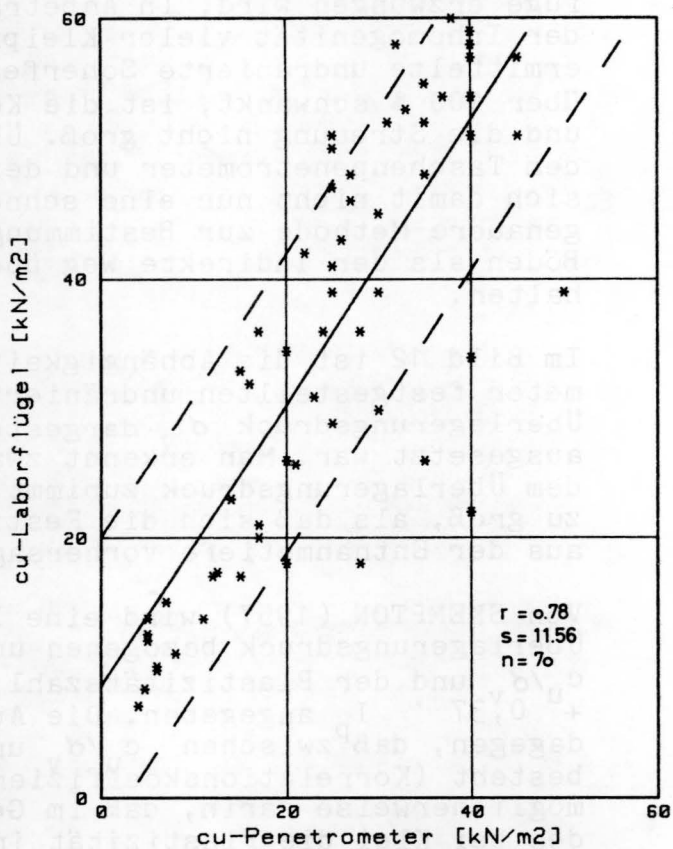


Bild 11 Vergleich der Scherfestigkeit des undrnierten Bodens c_u aus Laborflügel- und Penetrometerversuchen

Damit erhält man gerade bei gebänderten Proben zumindest einen Mittelwert des Wassergehalts der gesamten Probe. Darüberhinaus wird bei allen Scherversuchen mit Ausnahme des Penetrometerversuchs an den untersuchten Teilproben zusätzlich der Wassergehalt bestimmt.

Die Abschätzung der Festigkeit eines bindigen Bodens aus seinem Wassergehalt oder aus seiner Konsistenzzahl stammt aus einer Zeit, wo noch keine einfachen und schnellen Versuche zur Ermittlung der Scherfestigkeit des undränierten Bodens c_u zur Verfügung standen. Heute bieten jedoch das Taschenpenetrometer und die Laborflügelsonde die Möglichkeit, die Festigkeit eines bindigen Bodens nicht nur direkt, sondern auch schneller und einfacher als über den Wassergehalt zu bestimmen. Beim Versuch mit der Laborflügelsonde wird der Flügel mindestens fünfmal in eine etwa 5 cm hohe zylindrische Scheibe der Sonderprobe gedrückt und abgeschert. Die undränierete Scherfestigkeit c_u ergibt sich dann als Mittelwert dieser Einzelversuche. Eine Gegenüberstellung von Versuchen mit dem Taschenpenetrometer und der Laborflügelsonde mit dem aufwendigeren und genaueren undränierten, unkonsolidierten Dreiaxialversuch (UU-Versuch) nach DIN 18137 Teil 2, zeigen die Bilder 10 und 11. Die c_u -Werte aus Laborflügelversuchen liegen im Mittel über und c_u die aus UU-Versuchen etwas unter denen der Penetrometerversuche. Die höheren Werte der Laborflügelsonde sind wahrscheinlich z. T. darauf zurückzuführen, daß bei diesem Versuch eine Bruchfuge erzwungen wird. In Anbetracht der Tatsache, daß wegen der Inhomogenität vieler Kleiprobe die mit dem Penetrometer ermittelte undränierete Scherfestigkeit c_u nicht selten um über 100 % schwankt, ist die Korrelation zufriedenstellend und die Streuung nicht groß. Über Kleinscherversuche - wie dem Taschenpenetrometer und der Laborflügelsonde - eröffnet sich damit nicht nur eine schnellere sondern auch erheblich genauere Methode zur Bestimmung der Festigkeit von bindigen Böden als der indirekte Weg über die Ermittlung von Wassergehalten.

Im Bild 12 ist die Abhängigkeit zwischen der mit dem Penetrometer festgestellten undränierten Scherfestigkeit c_u und dem Überlagerungsdruck σ_v dargestellt, dem die Probe in der Natur ausgesetzt war. Man erkennt zwar, daß c_u wie erwartet mit dem Überlagerungsdruck zunimmt, doch ist c_u der Standardfehler zu groß, als daß sich die Festigkeit von Klei hinreichend genau aus der Entnahmetiefe vorhersagen läßt.

Von SKEMPTON (1957) wird eine Beziehung zwischen der auf den Überlagerungsdruck bezogenen undränierten Scherfestigkeit c_u/σ_v und der Plastizitätszahl I_p von der Form $c_u/\sigma_v = 0,11 + 0,37 \cdot I_p$ angegeben. Die Auswertung der Kleiprobe zeigt dagegen, daß c_u/σ_v zwischen c_u/σ_v und I_p keinerlei Beziehung besteht (Korrelationskoeffizient $r^2 = 0,04$). Der Grund liegt möglicherweise darin, daß im Gegensatz zu anderen bindigen Böden bei Klei die Plastizität in sehr starkem Maß vom Glühverlust bestimmt wird.

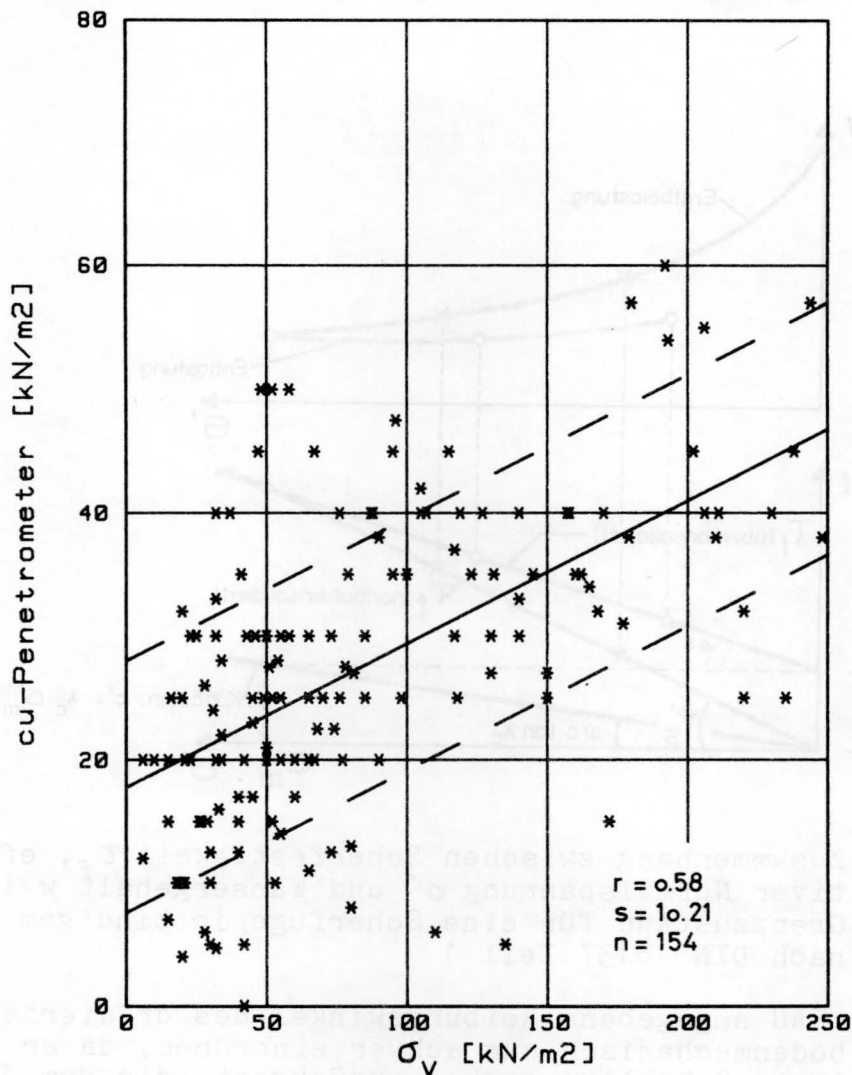


Bild 12 Abhängigkeit der mit dem Penetrometer ermittelten undränierten Scherfestigkeit c_u vom Überlagerungsdruck σ_v

5 Reibungswinkel und Kohäsion

Klei ist ein normal- oder erstkonsolidierter Boden, der bei einem konsolidierten, undränierten Triaxialversuch (CU-Versuch) nach DIN 18137 Teil 2 unter einem Spannungszustand konsolidiert wird, der über den Spannungen in der Natur liegt. Der im CU-Versuch bestimmte Reibungswinkel entspricht daher dem Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s nach DIN 18137 Teil 1 (siehe Bild 13).

Der Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s umfaßt sowohl die Zunahme des Reibungsanteils als auch die des Kohäsionsanteils der Festigkeit mit der Konsolidationsspannung, so daß die Schergerade der Gesamtscherfestigkeit durch den Koordinatenursprung geht. Der Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s ist größer als der effektive Reibungswinkel φ' , der in Routinever-

suchen nie bestimmt wird, da er größeren Versuchsaufwand erfordert.

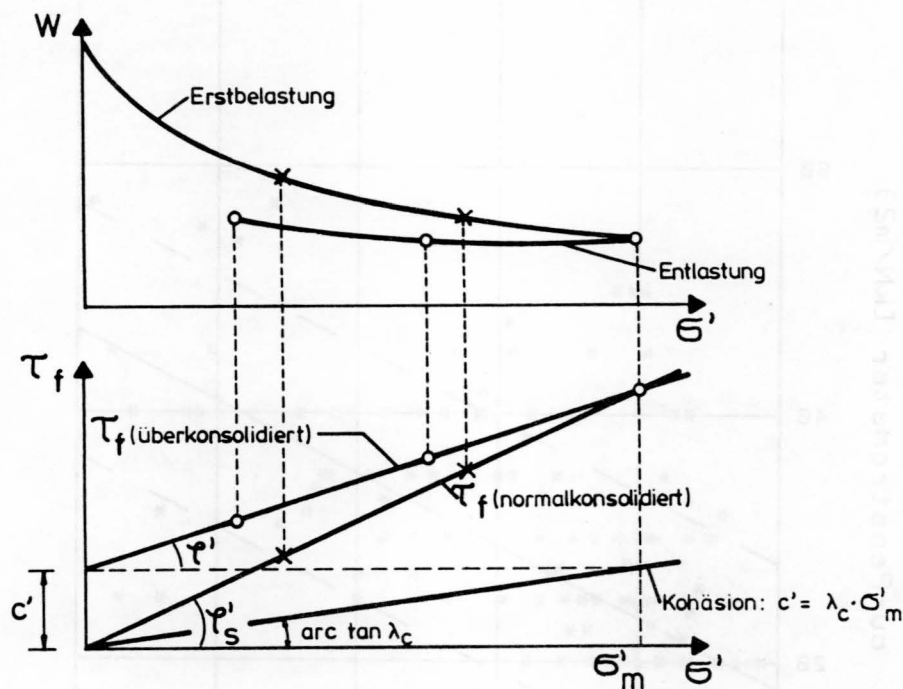


Bild 13 Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit τ_f , effektiver Normalspannung σ' und Wassergehalt w im Grenzzustand für eine Scherfuge in bindigem Boden nach DIN 18137 Teil 1

Der in der EAU angegebene Reibungswinkel des dränierten Bodens läßt sich bodenmechanisch nur schwer einordnen, da er auf sog. 'dränierte Schnellversuche' zurückgeht, die dem jetzigen Stand des Wissens und der Normung nicht entsprechen. Porenwasserdruckmessungen zeigen nämlich, daß ein 'Schnellversuch' mit Klei nicht gleichzeitig 'dräniert' sein kann. Wegen der schnellen Belastung entsteht in der Probe beim Abscheren trotz geöffneter Porenwasserleitung ein Porenwasserüberdruck Δu .

Die aufgebrachten Spannungen entsprechen daher nicht - wie bei der Auswertung vorausgesetzt - den effektiven Spannungen. Der in einem solchen 'dränierten Schnellversuch' ermittelte Reibungswinkel wird dann zu klein und die Kohäsion zu groß bestimmt (siehe Bild 14). Bei einer Auswertung unter Berücksichtigung des Porenwasserüberdrucks Δu entspricht der ermittelte Reibungswinkel dem Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ'_s .

In vielen Untersuchungen über die Scherfestigkeit normalkonsolidierter bindiger Böden hat sich gezeigt, daß der Reibungswinkel mit zunehmender Plastizität abnimmt (siehe z. B. LADD et.al. 1977). Wie aus Bild 15 ersichtlich, ist dieser Zusammenhang bei Klei nicht festzustellen. Dagegen zeigt sich eine verhältnismäßig gute Korrelation zwischen der Aktivitätszahl (das ist die Plastizität bezogen auf den Tongehalt) und dem Winkel der Gesamtscherfestigkeit (siehe Bild 16).

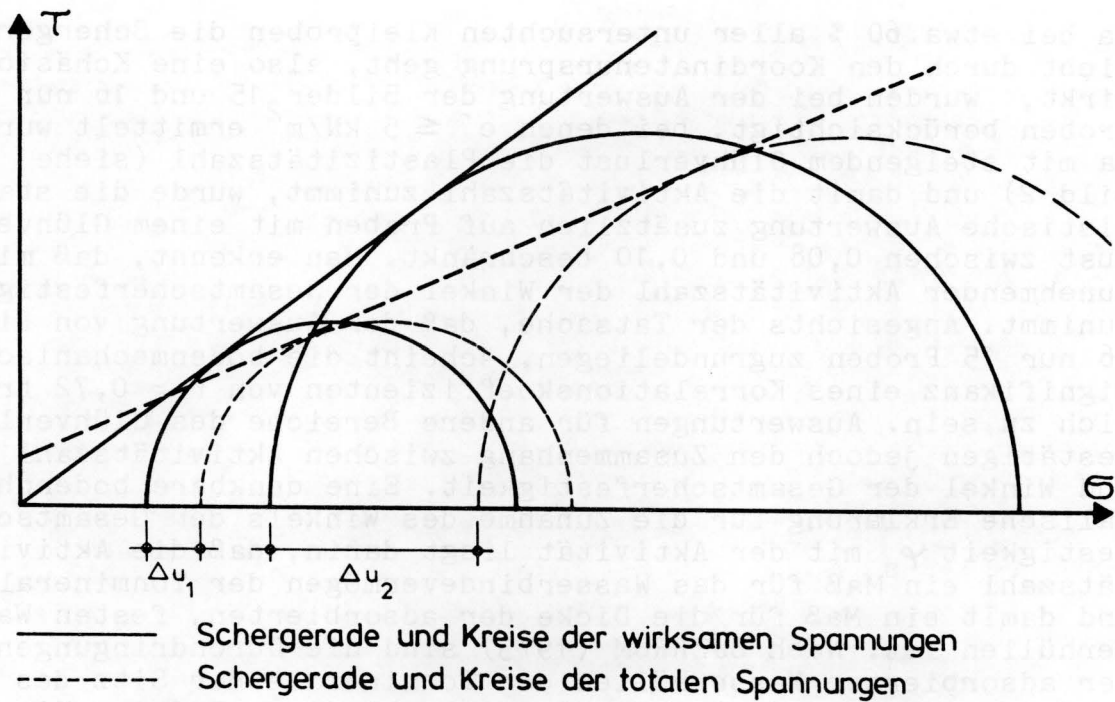


Bild 14 Mohrsche Kreise für die totalen und die effektiven Spannungen des Bruchzustands bei einem 'dränierten Schnellversuch'

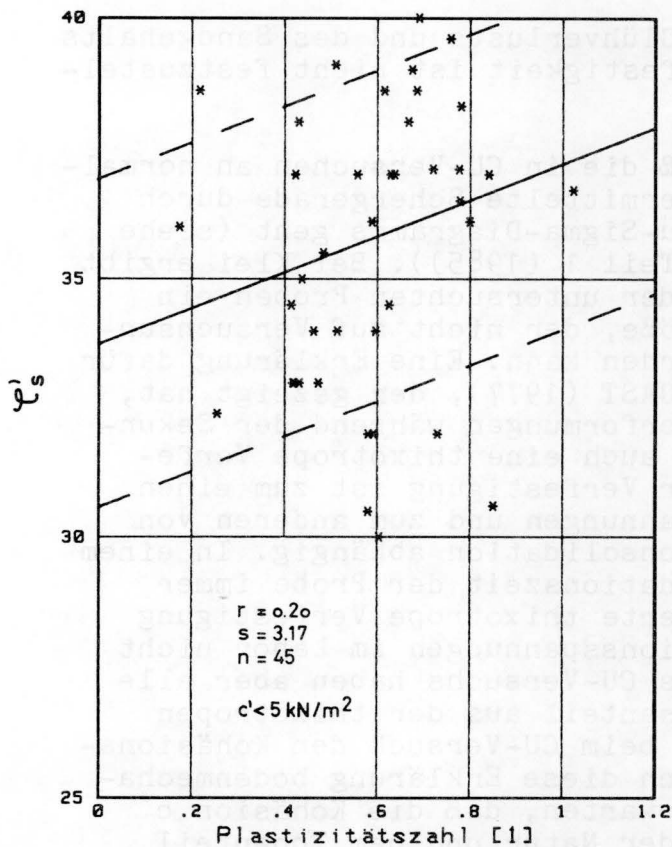


Bild 15 Winkel der Gesamtscherfestigkeit in Abhängigkeit von der Plastizität

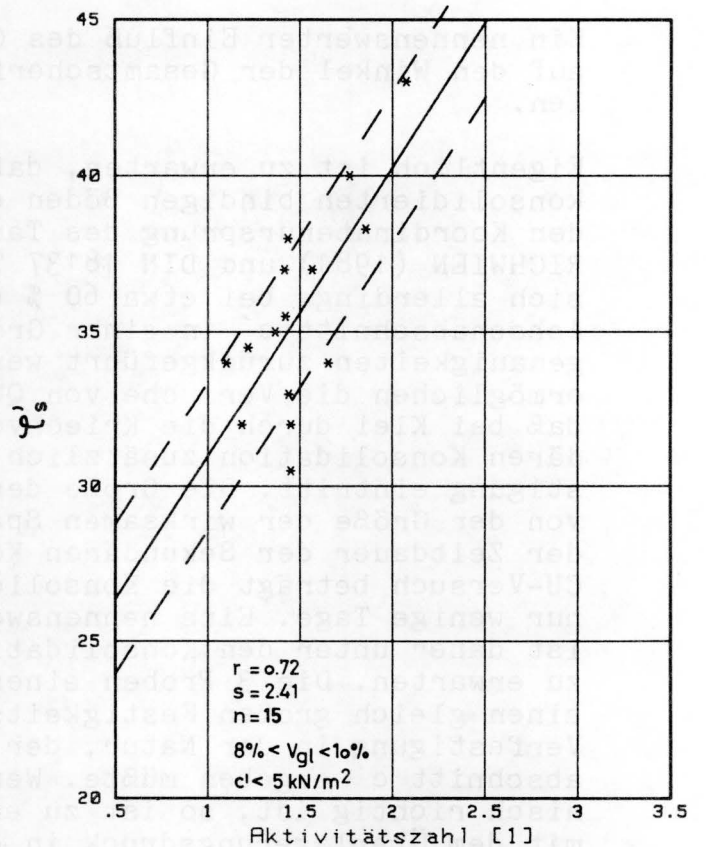


Bild 16 Winkel der Gesamtscherfestigkeit in Abhängigkeit von der Aktivität

Da bei etwa 60 % aller untersuchten Kleiprobe die Schergerade nicht durch den Koordinatenursprung geht, also eine Kohäsion wirkt, wurden bei der Auswertung der Bilder 15 und 16 nur Proben berücksichtigt, bei denen $c' \leq 5 \text{ kN/m}^2$ ermittelt wurde. Da mit steigendem Glühverlust die Plastizitätszahl (siehe Bild 2) und damit die Aktivitätszahl zunimmt, wurde die statistische Auswertung zusätzlich auf Proben mit einem Glühverlust zwischen 0,08 und 0,10 beschränkt. Man erkennt, daß mit zunehmender Aktivitätszahl der Winkel der Gesamtscherfestigkeit zunimmt. Angesichts der Tatsache, daß der Auswertung von Bild 16 nur 15 Proben zugrundeliegen, scheint die bodenmechanische Signifikanz eines Korrelationskoeffizienten von $r = 0,72$ fraglich zu sein. Auswertungen für andere Bereiche des Glühverlusts bestätigen jedoch den Zusammenhang zwischen Aktivitätszahl und Winkel der Gesamtscherfestigkeit. Eine denkbare bodenphysikalische Erklärung für die Zunahme des Winkels der Gesamtscherfestigkeit φ_s mit der Aktivität liegt darin, daß die Aktivitätszahl ein Maß für das Wasserbindevermögen der Tonminerale und damit ein Maß für die Dicke der adsorbierten, festen Wasserhüllen ist. Nach BJERRUM (1973) sind die Durchdringungen der adsorbierten Wasserhüllen der Tonminerale der Sitz des Kohäsionsanteils der Festigkeit eines bindigen Bodens. Nimmt die Dicke der adsorbierten Wasserhüllen zu, so ist auch mit einem Anstieg des Kohäsionsanteils der Festigkeit bzw. von λ_c (siehe Bild 13) zu rechnen. Bei gleichbleibendem wirksamem Reibungswinkel φ' muß dann mit zunehmender Aktivitätszahl auch der Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ_s zunehmen.

Ein nennenswerter Einfluß des Glühverlusts und des Sandgehalts auf den Winkel der Gesamtscherfestigkeit ist nicht festzustellen.

Eigentlich ist zu erwarten, daß die in CU-Versuchen an normal-konsolidierten bindigen Böden ermittelte Schergerade durch den Koordinatenursprung des Tau-Sigma-Diagramms geht (siehe RICHWIEN (1981) und DIN 18137 Teil 1 (1985)). Bei Klei ergibt sich allerdings bei etwa 60 % der untersuchten Proben ein Achsenabschnitt c' in einer Größe, der nicht auf Versuchsungenauigkeiten zurückgeführt werden kann. Eine Erklärung dafür ermöglichen die Versuche von QUAST (1977), der gezeigt hat, daß bei Klei durch die Kriechverformungen während der Sekundären Konsolidation zusätzlich auch eine thixotrope Verfestigung eintritt. Die Größe der Verfestigung ist zum einen von der Größe der wirksamen Spannungen und zum anderen von der Zeitdauer der Sekundären Konsolidation abhängig. In einem CU-Versuch beträgt die Konsolidationszeit der Probe immer nur wenige Tage. Eine nennenswerte thixotrope Verfestigung ist daher unter den Konsolidationsspannungen im Labor nicht zu erwarten. Die 3 Proben eines CU-Versuchs haben aber alle einen gleich großen Festigkeitsanteil aus der thixotropen Verfestigung in der Natur, der beim CU-Versuch den Kohäsionsabschnitt c' ergeben müßte. Wenn diese Erklärung bodenmechanisch richtig ist, so ist zu erwarten, daß die Kohäsion c' mit dem Überlagerungsdruck in der Natur und dem Tonanteil - dem Träger dieses Festigkeitsanteils - zunimmt.

Die statistische Auswertung zeigt allerdings nur eine sehr schwache Korrelation zwischen dem Tongehalt und der Kohäsion ($r = 0,21$) und keinerlei Zusammenhang zwischen dem Überlagerungsdruck und c' . Die einzige statistisch signifikante Korrelation ist zwischen dem Winkel der Gesamtscherfestigkeit und der Kohäsion festzustellen (siehe Bild 17).

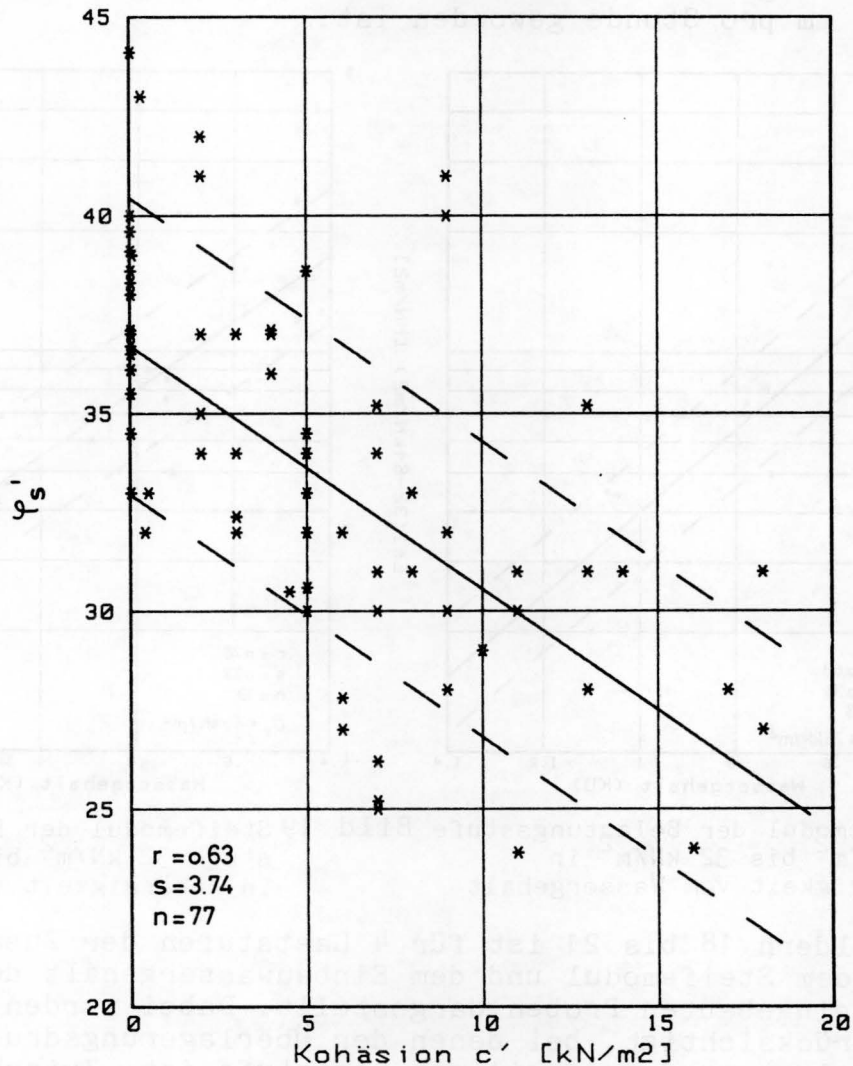


Bild 17 Abhängigkeit des Winkels der Gesamtscherfestigkeit φ'_s von der Kohäsion c'

Inwieweit dies bodenmechanisch begründet ist oder lediglich auf die Tatsache zurückzuführen ist, daß beim Zeichnen der Schergerade die Wahl einer etwas steileren bzw. flacheren Gerade zwangsläufig mit einem kleineren bzw. größeren Kohäsionsabschnitt c' verbunden ist, bleibt unklar. Allerdings wurde dieser Zusammenhang auch bei anderen bindigen Böden beobachtet (siehe v. SOOS 1982).

6 Steifemodul6.1 Wassergehalt

Bei Ödometerversuchen mit Klei wird die Bodenprobe üblicherweise stufenweise belastet. Beginnend bei 8 kN/m^2 wird die lotrechte Belastung von Stufe zu Stufe verdoppelt und dabei die Setzung der Probe beobachtet. Eine neue Belastungsstufe wird dann aufgebracht, wenn die Setzung der Probe kleiner als $0,002 \text{ mm}$ pro Stunde geworden ist.

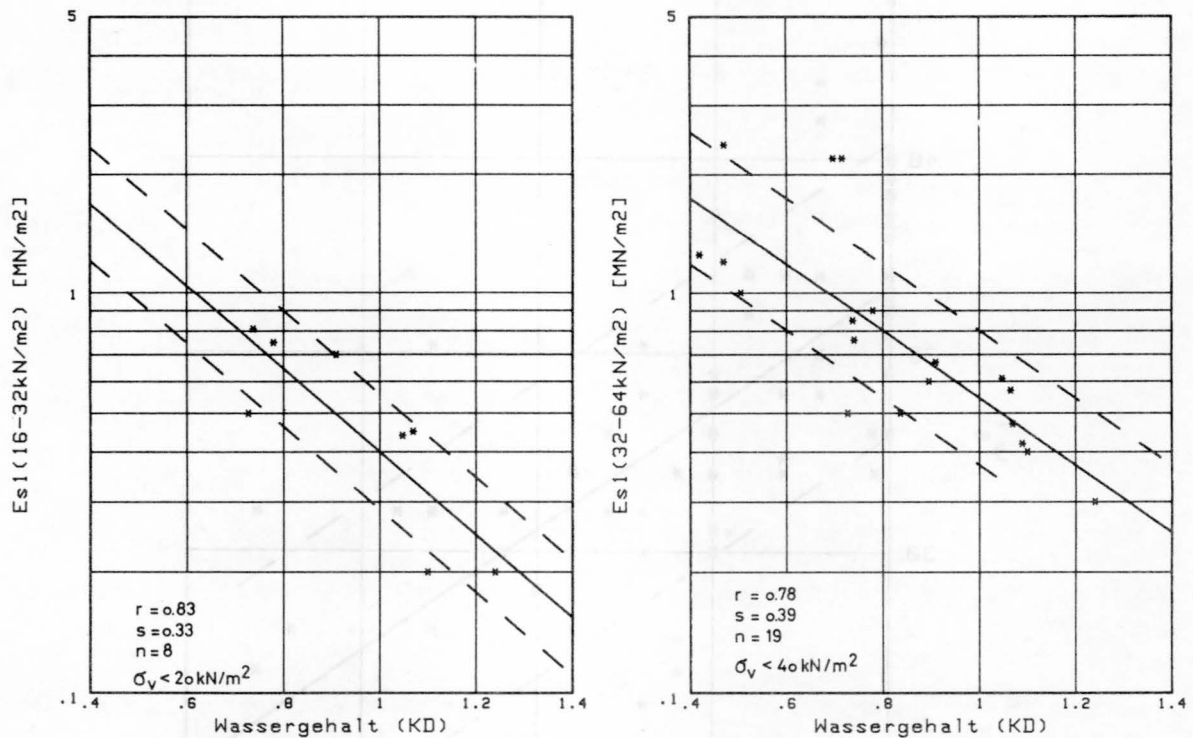


Bild 18 Steifemodul der Belastungsstufe 16 kN/m^2 bis 32 kN/m^2 in Abhängigkeit vom Wassergehalt

Bild 19 Steifemodul der Belastungsstufe 32 kN/m^2 bis 64 kN/m^2 in Abhängigkeit vom Wassergehalt

In den Bildern 18 bis 21 ist für 4 Laststufen der Zusammenhang zwischen dem Steifemodul und dem Einbauwassergehalt der im Ödometer eingebauten Proben dargestellt. Dabei wurden nur Proben berücksichtigt, bei denen der Überlagerungsdruck kleiner als die Belastung der jeweiligen Laststufe ist. Zwischen dem Wassergehalt und dem Steifemodul zeigt sich eine bedeutend bessere Korrelation als zwischen dem Wassergehalt und der Festigkeit des undränierten Bodens (siehe Bild 8), weil der Wassergehalt unmittelbar an dem flachen zylindrischen Probestück bestimmt wurde, an dem auch der Kompressionsversuch zur Ermittlung des Steifemoduls durchgeführt wurde. Die Streuung ist im wesentlichen auf den unterschiedlichen Überlagerungsdruck zurückzuführen, dem die Proben in der Natur ausgesetzt waren. Über den Ausgleichsgeraden liegen in der Regel die Ergebnisse von Proben aus größerer Tiefe, darunter diejenigen aus vergleichsweise geringer Tiefe. Vergleicht man die Ausgleichsgeraden der 4 Laststufen, dann fällt auf, daß die Neigung der Ausgleichsgeraden mit steigender Belastung abnimmt: je höher die Laststufe, um so geringer der Einfluß des Einbauwassergehalts. Der Einfluß des Einbauwassergehalts wird mit zunehmender Belastung 'überdrückt'.

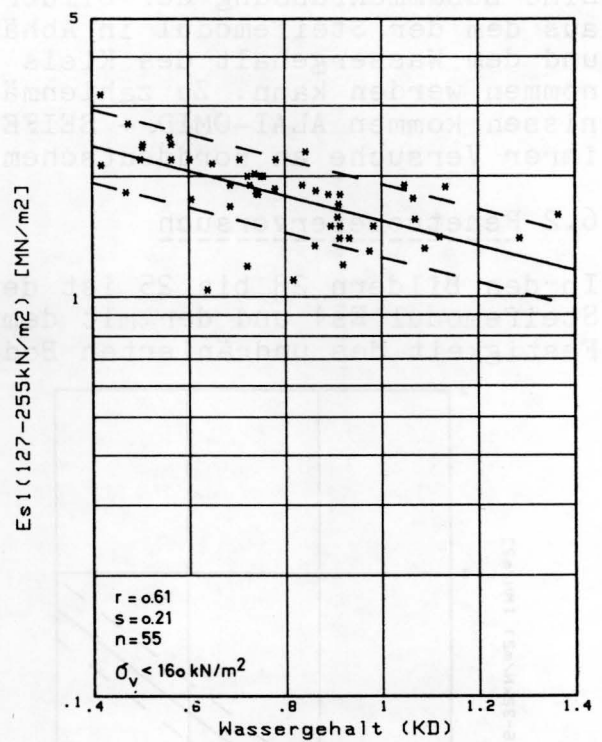
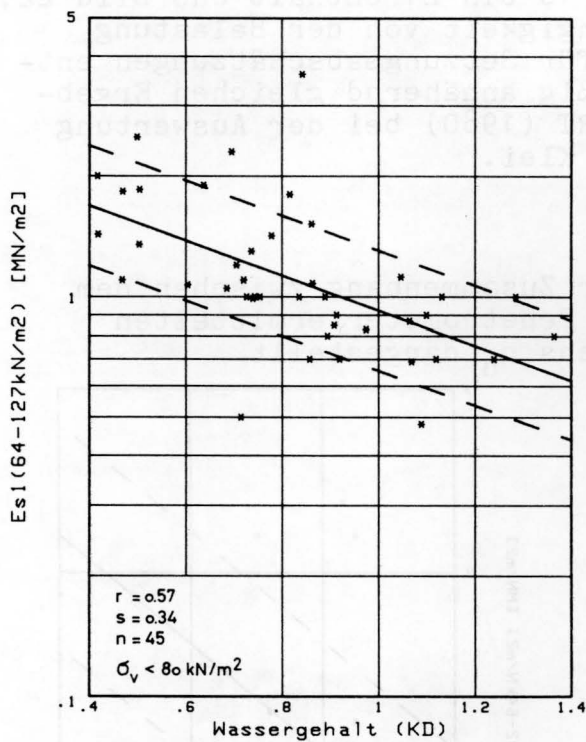


Bild 20 Steifemodul der Belastungsstufe 64 kN/m² bis 127 kN/m² in Abhängigkeit vom Wassergehalt

Bild 21 Steifemodul der Belastungsstufe 127 kN/m² bis 255 kN/m² in Abhängigkeit vom Wassergehalt

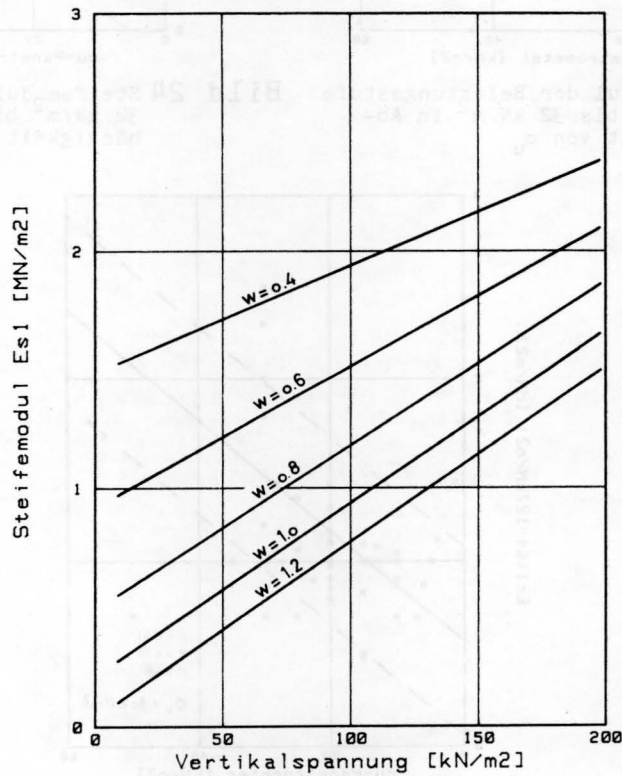


Bild 22 Steifemodul in Abhängigkeit von der Belastung und dem Wassergehalt

Eine Zusammenfassung der Bilder 18 bis 21 enthält das Bild 22, aus dem der Steifemodul in Abhängigkeit von der Belastung und dem Wassergehalt des Kleis für Setzungsabschätzungen entnommen werden kann. Zu zahlenmäßig annähernd gleichen Ergebnissen kommen ALAI-OMID + SEIFERT (1980) bei der Auswertung ihrer Versuche an norddeutschem Klei.

6.2 Penetrometerversuch

In den Bildern 23 bis 25 ist der Zusammenhang zwischen dem Steifemodul E_{s1} und der mit dem Penetrometer ermittelten Festigkeit des undrÄnirten Bodens c_u dargestellt.

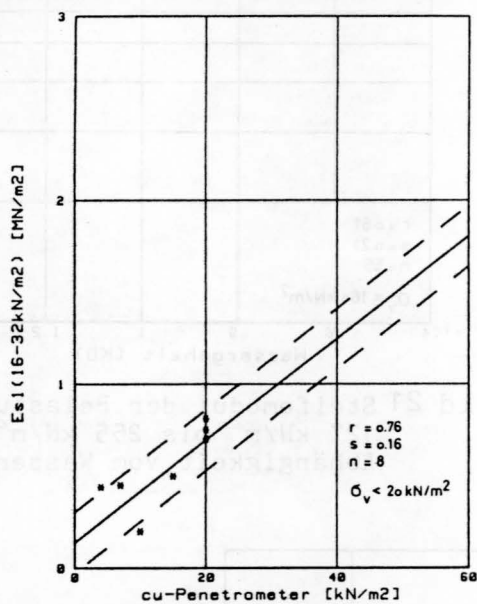


Bild 23 Steifemodul der Belastungsstufe 16 kN/m² bis 32 kN/m² in Abhängigkeit von c_u

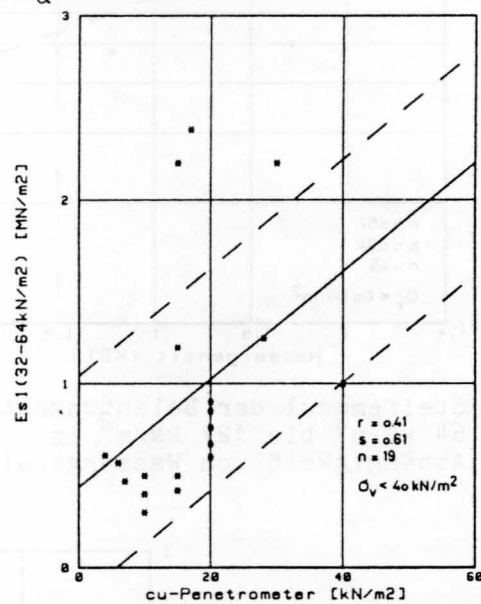


Bild 24 Steifemodul der Belastungsstufe 32 kN/m² bis 64 kN/m² in Abhängigkeit von c_u

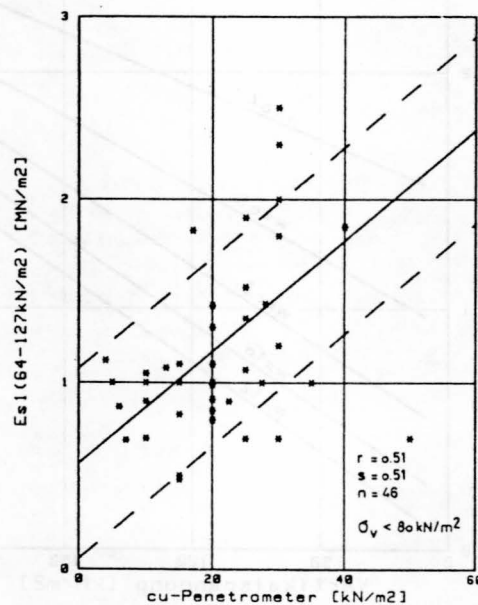


Bild 25 Steifemodul der Belastungsstufe 64 kN/m² bis 127 kN/m² in Abhängigkeit von c_u

Dabei wurden nur Proben berücksichtigt, deren Überlagerungsdruck kleiner als die Spannung der Laststufe war. Es zeigt sich für die ersten drei Laststufen nur eine mäßig gute Korrelation zwischen der Festigkeit und dem Steifemodul. Bei höheren Laststufen verliert die Korrelation an Signifikanz, weil durch die vorausgehenden Laststufen der Anfangszustand der Probe zu stark verändert wird.

7 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Klei ist ein normalkonsolidierter bindiger Boden von breiiger bis weicher Konsistenz mit organischen Beimengungen. Die statistische Auswertung von Laborversuchen an 158 Sonderproben aus ganz Norddeutschland führt zu folgenden Ergebnissen:

- Die Plastizität von Klei wird nicht nur durch den Tongehalt sondern vor allem durch den Anteil der organischen Beimengungen (Glühverlust) bestimmt, der auch wesentlichen Einfluß auf die Größe der Korndichte hat.
- Bei Klei ergibt sich weder zwischen dem natürlichen Wassergehalt noch zwischen der Konsistenzzahl und der undrännierten Scherfestigkeit eine befriedigende Korrelation. Der Grund liegt zum einen in der großen Schwankungsbreite der Plastizitätszahl bei Klei. Darüberhinaus enthalten Kleiprobe in der Regel Bänderungen und unregelmäßig verteilte organische Beimengungen, die zu erheblichen Schwankungen des Wassergehalts innerhalb der Probe führen. Die üblicherweise an den Enden einer Sonderprobe zur Bestimmung des natürlichen Wassergehalts entnommenen Teilproben sind dann hinsichtlich des festgestellten Wassergehalts nur bedingt für andere Bereiche der Probe repräsentativ.
- Diesen Erfahrungen sollte die Laborpraxis Rechnung tragen, indem die Teilprobe zur Wassergehaltsbestimmung über die gesamte Höhe der Probe entnommen wird. Damit erhält man bei gebänderten Kleiprobe zumindest einen Mittelwert des Wassergehalts. Darüberhinaus sollten auch bei Kleinscherversuchen so weit wie möglich an den Teilproben zusätzlich die Wassergehalte bestimmt werden.
- Eine schnelle und einfache Bestimmung der Festigkeit des undrännierten Bodens ermöglichen das Taschenpenetrometer und der Laborflügelversuch. Die Ergebnisse dieser Kleinscherversuche stimmen gut mit unkonsolidierten, undrännierten Triaxialversuchen (UU-Versuchen) überein.
- Die undrännierte Scherfestigkeit c_u von Klei wird vor allem von der Größe des Überlagerungsdrucks beeinflusst; ein Einfluß der Plastizität konnte nicht festgestellt werden.

- Der Winkel der Gesamtscherfestigkeit wird von der Aktivität der Tonmineralien des Kleis beeinflusst; mit zunehmender Aktivität des Tons steigt der Winkel der Gesamtscherfestigkeit. Der Tongehalt und die Plastizität haben keinen nennenswerten Einfluß auf den Winkel der Gesamtscherfestigkeit.
- Die bei etwa 60 % der Proben festgestellte Kohäsion korreliert nicht mit den Ergebnissen von Klassifikationsversuchen.
- Während der Wassergehalt keine Rückschlüsse auf die undränierete Scherfestigkeit c_u von Klei erlaubt, wurde eine gute Korrelation zwischen dem Wassergehalt und dem Steifemodul festgestellt. Das ist darauf zurückzuführen, daß beim Kompressionsversuch der Wassergehalt an der gleichen Teilprobe bestimmt wird, an dem auch der Steifemodul ermittelt wird. Es werden Kurventafeln angegeben, aus denen für Setzungsabschätzungen der Steifemodul in Abhängigkeit von der Belastung und dem Wassergehalt entnommen werden kann.

8 Literatur

- ALAI-OMID, M.;
SEIFERT, G.: Berechnung des Steifemoduls der Marschböden aus einfach zu bestimmenden geotechnischen Kennziffern. In: Bauingenieur 55 (1980), S. 219 - 224.
- BJERRUM, L.: Problems of Soil Mechanics and Construction on soft Clays and structurally unstable Soils. In: Proc. VII ICSMFE, Moskau 1973.
- KÖGLER, F.;
SCHEIDIG, A.: Baugrund und Bauwerk. Berlin: Ernst & Sohn, 1948.
- LADD, C.C.;
FOOTT, R.;
ISHIHARA, K.;
SCHLOSSER, F.;
POULOS, H.G.: Stress-Deformation and Strength Characteristics. In: Proc. IX. ICSMFE, Tokyo 1977, Vol. 2, S. 421 - 494.
- NORM E DIN 18137
Teil 1 06.1985 Baugrund; Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Scherfestigkeit, Begriffe und grundsätzliche Versuchsbedingungen.
- QUAST, P.: Ein Beitrag zum Kriechverhalten eines norddeutschen Kleis. In: Mitt. IGB, TU Hannover (1977), Nr. 13.
- RICHWIEN, W.: Das Formänderungs- und Festigkeitsverhalten weicher bindiger Böden. In: Mitt. IGB, TU Hannover (1981), Nr. 18.

Schuppener: Erfahrg. mit bodenmechanischen Laborversuchen

- SKEMPTON, A.W.: Diskussion zu Grace + Henry. In: Proc. Inst. Civil Eng. London (1957), Nr. 7.
- v. SOOS, P.: Zur Ermittlung der Bodenkennwerte mit Berücksichtigung von Streuung und Korrelationen. In: Vorträge der Baugrundtagung in Braunschweig 1982.
- v. SOOS, P.: Eigenschaften von Boden und Fels; ihre Ermittlung im Labor. In: Grundbautaschenbuch, 3. Aufl. Teil 1, Berlin: Ernst & Sohn, 1980.

