Fachzeitschrift "Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau"
Dezember 1988

Bodenansprache anhand von CPT-Ergebnissen

von

G. von Bloh und H. Harder

Bodenansprache anhand von CPT-Ergebnissen

G. von Bloh und H. Harder*

Einleitung

Wegen der im allgemeinen als hoch empfundenen Kosten herkömmlicher Bodenuntersuchungen werden Bauwerke von untergeordneter Bedeutung häufig ohne oder nur mit unzureichender Baugrunderkundung ausgeführt. Der »Cone Penetration Test (CPT)«, im deutschsprachigen Raum besser bekannt als »Drucksondierung«, ist eine preiswerte Erkundungsmethode, dessen Interpretationsmöglichkeiten jedoch für die Baupraxis noch nicht ausreichend aufbereitet sind. Am Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) der Universität Hannover wurde ein Forschungsvorhaben durchgeführt zu der Frage, ob und inwieweit eine Baugrunderkundung allein auf der Basis von CPTs für die tägliche Baupraxis ausreichend sein kann. Ein Ziel ist dabei die eindeutige Feststellung der Bodenschichtung mit entsprechend zuverlässiger Identifikation der Bodenarten.

Datenerfassung

CPTs werden zunehmend mit elektrisch instrumentierten Sondierspitzen durchgeführt. Die dabei anfallende große Datenmenge wird zweckmäßig durch eine digitale Datenerfassung und -verarbeitung auf Computerbasis vorgenommen. Eine entsprechende Anlage wurde am IGBE in Zusammenarbeit mit Fachingenieuren der Informationsverarbeitung als Eigenentwicklung realisiert. Eine Darstellung ihrer Arbeitsweise ist in TIS 8/87 veröffentlicht worden *(Harder und Blümel, 1987)*.

Datenaufbereitung

Zur weitergehenden bodenmechanischen Interpretation müssen die Meßdaten in geeigneter Weise als repräsentative Werte quantifiziert werden. Innerhalb einer Schicht, und hier sowohl im Zuge einer Sondierung als auch von Sondierstelle zu Sondierstelle, unterliegen CPT-Meßdaten einer gewissen Streuung. Darüber hinaus sind einzelne Daten als für die jeweilige Schicht durchaus untypisch anzusehen. Die Bestimmung repräsentativer Werte durch ingenieurmäßige Festlegung führt erfahrungsgemäß zu signifikant unterschiedlichen Ergebnissen, je nachdem ob ein unterer, ein mittlerer oder ein oberer Wert als repräsentativ verstanden wird. Es wurde deshalb zunächst ein rechnerorientiertes und personenunabhängiges Verfahren zur Aufbereitung der Meßdaten entwickelt, mit dem der Baugrundaufbau als Schichtenprofil und für diese Schichten repräsentative CPT-Parameter festgestellt werden können.

Das Verfahren arbeitet halbautomatisch und wird lediglich an zwei Punkten durch Entscheidungen unterstützt. Es ersetzt aber nicht den geotechnischen Ingenieur, sondern es versteht sich als »Werkzeug«, das ingenieurmäßige Entscheidungen weitestgehend objektiviert. Da die CPT-Meßdaten unterschiedlicher Bodenschichten keinen physikalischen Zusammenhang aufweisen, müssen die über die Sondiertiefe zusammenhängend gesammelten Datenreihen vor der Anwendung numerischer Prozeduren in entsprechende Unterabschnitte eingeteilt werden. Solche Unterabschnitte entsprechen letztlich Bodenschichten. Die selbständige Einteilung durch ein Rechenprogramm anhand strikt vorgegebener Grenzwerte ist wenig hilfreich, weil die Meßwerte einer Schicht im Einzelfall auch gerade um eine solche Grenze streuen können. Die Unterstützung des Programms durch den Ingenieur besteht nur darin, solche Schichtgrenzen aus den vom Rechner aufbereiteten Datenreihen abzulesen und erfordert somit keine subjektive Handlung.

Die Anwendung des Verfahrens untergliedert sich in acht Stufen. Sie wird im folgenden anhand eines Beispiels erläutert. Die Ausgangswerte wurden mit einer 100 kN-Sondierspitze gemessen. Der Untergrund des untersuchten Geländes besteht aus rd. 6 m aufgespülten Schichten über natürlich geschichtetem Boden.

*Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE), Universität Hannover

Stufe 1: Behandlung der Rohdaten

Die Rohdaten sind die gemessenen Werte von Spitzenwiderstand q_c (Bild 1a) und Mantelreibung τ_f, korrigiert mit den spitzenspezifischen Kalibrierfunktionen. Der Reibungsquotient stellt das Verhältnis von Mantelreibung zu Spitzenwiderstand dar: $R_f = \tau_f / q_c$ (Bild 1b).

Stufe 2: Summenkurven

Die Summenkurven von Reibungsquotient und Spitzenwiderstand über die Tiefe z

$I_R(z) = \Sigma(R_f \, \Delta z)$ und $I_q(z) = \Sigma(q_c \, \Delta z)$

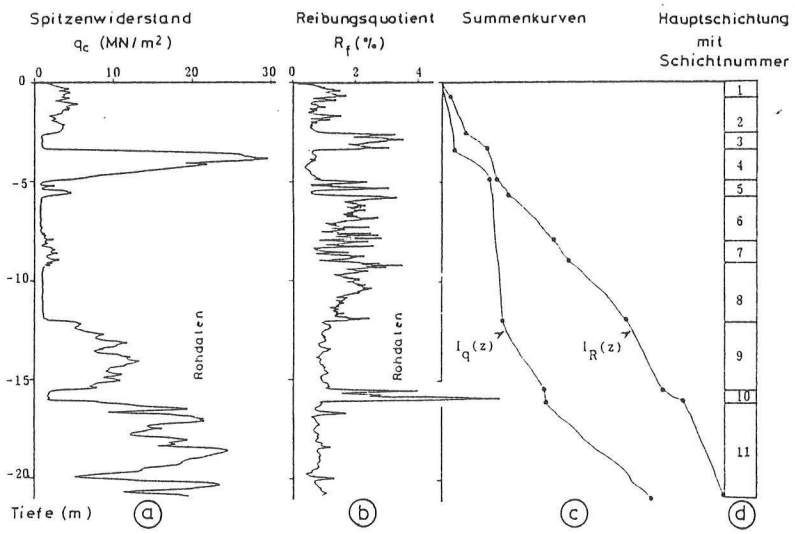
werden zur Festlegung der Hauptschichtgrenzen herangezogen. Unter der Voraussetzung, daß R_f für eine bestimmte Bodenart einen konstanten Wert annimmt, ist die Summenkurve näherungsweise eine Reihe von Geraden unterschiedlicher Neigungen (Bild 1c). Verglichen mit den Rohdaten von R_f verliert die Streuung der Daten bei dieser Art der Darstellung ihre irritierende Wirkung. Die Summenkurve des Spitzendrucks besteht prinzipiell nicht aus geraden Linienabschnitten, es sind jedoch charakteristische Änderungen in den Neigungen gut feststellbar.

Stufe 3: Bestimmung der Hauptschichtung

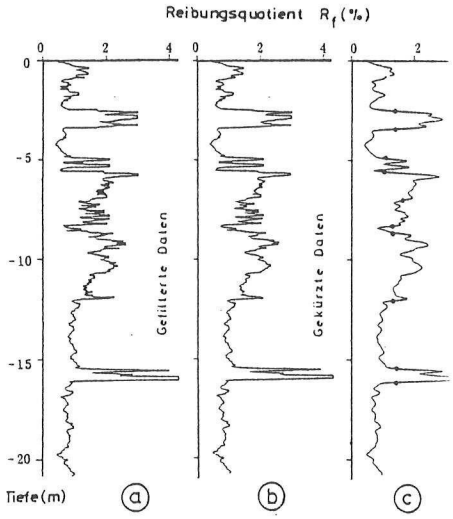
Die Knickpunkte der R_f-Summenkurve geben die Tiefe der Grenze zwischen den Hauptschichten gut wieder. Zusätzliche Grenzen z. B. durch unterschiedliche Zustände der gleichen Bodenart können durch die q_c-Summenkurve bestimmt werden (z. B. Schichten Nr. 9 und 11 in Bild 1c: Sand unterschiedlicher Lagerungsdichte). Das folgende Filtern der Datenreihen (Stufe 4) wurde jeweils innerhalb der in Bild 1d eingetragenen 11 Hauptschichten vorgenommen.

Stufe 4: Filtern

Die nicht charakteristischen Werte der Rohdaten, verursacht durch kleine Inhomogenitäten, werden durch die von *Vivatrat (1978)* vorgestellte Filter-Prozedur eliminiert. Der automatische Filter benötigt die Eingangsparameter Δh und a



1 Rohdaten und Summenkurven



2 Filtern, Kürzen und Glätten von Datenreihen

zur Bestimmung der Filterintensität und arbeitet nach folgendem Prinzip:

- ☐ Die Hauptschichten werden in Unterschichten der Dicke Δh unterteilt.
- ☐ Die Standardabweichungen σ von 3 aufeinanderfolgenden Unterschichten i, k und l werden berechnet.
- ☐ Die »maßgebende« Standardabweichung S wird wie folgt ausgewählt: $S = 0{,}5 * \min[(\sigma_i + \sigma_k); (\sigma_k + \sigma_l); (\sigma_l + \sigma_i)]$
- ☐ Der Medianwert M aller Daten der drei Unterschichten wird berechnet.
- ☐ Alle Daten in Schicht K außerhalb des Bereiches $(M \pm a \cdot S)$ werden auf den jeweiligen Grenzwert gesetzt.

Durch die Filterprozedur werden die untypischen Informationen abgeschnitten. In unserer Untersuchung wurden mit den Eingangsparametern a=1 und Δh=0.3 m gute Resultate erzielt (Bild 2a).

Stufe 5: Kürzen der Datenreihen

Zur Beschleunigung der folgenden Prozeduren können die Datenreihen gekürzt werden, indem die Werte von m Elementen durch ihren Mittelwert ersetzt werden:

$$\overline{V}_m = 1/m * \sum V_i$$

Das Beispiel in Bild 2b wurde mit m=5 durchgeführt. Dabei geht kein Informationsgehalt verloren.

Stufe 6: Glätten der Datenreihen

Die gekürzten Datenreihen werden unter Anwendung des »moving-average«-Prinzips geglättet. Es wurden verschiedene *der bei Davis (1973)* beschriebenen verfeinerten Glättungsverfahren für Zeitreihen erprobt. Die mehrmalige Anwendung der einfachsten Methode mit drei Werten lieferte gute Ergebnisse. Dabei wird jedesmal der Wert $\overline{V}_m$ ersetzt durch:

$$\tilde{V} = 1/3 * (\overline{V}_{(m-1)} + \overline{V}_m + \overline{V}_{(m+1)})$$

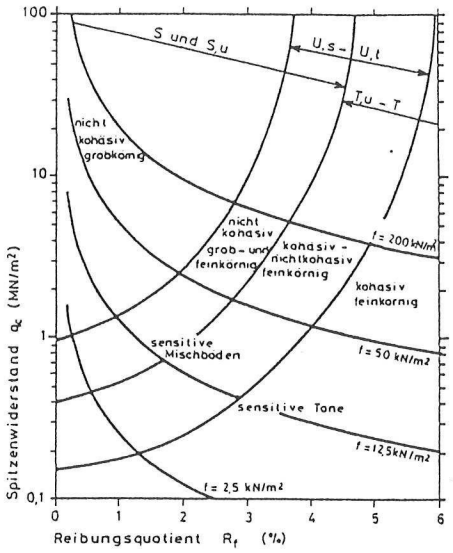
Das Beispiel in Bild 2c wurde 7 mal geglättet. Die Kerninformation bleibt dabei erhalten.

Stufe 7: Abschließende Bestimmung der Schichtung

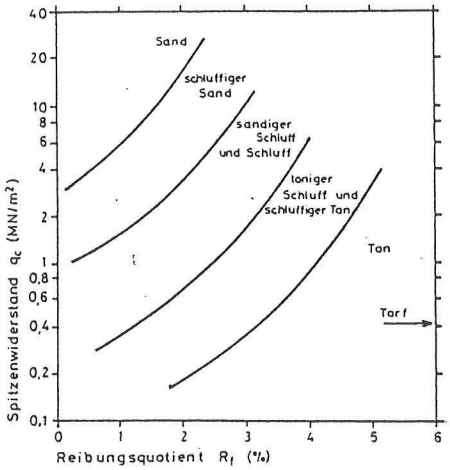
Die geglättete Kurve des Reibungsverhältnisses R_f bildet die Grundlage einer abschließenden Bestimmung der Schichtung. Die Grenzen der Unterschichten werden durch die Wendepunkte an bedeutenden Änderungen der Kurve festgelegt (Bild 2c). Eine weitere Darstellung als Summenkurve kann hierbei hilfreich sein.

Stufe 8: Repräsentative Parameter

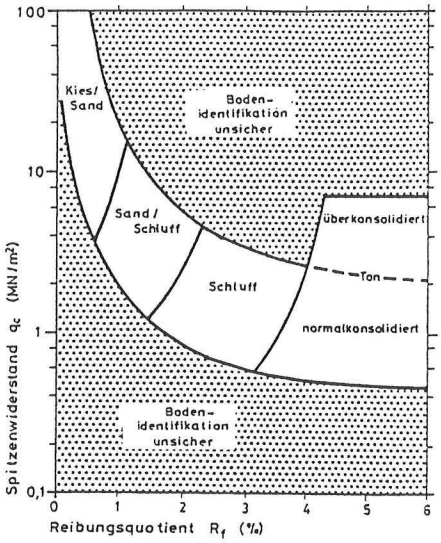
Innerhalb der durch die abschließende Bestimmung der Schichten gefundenen Intervalle werden die repräsentativen CPT-Parameter als einfache Mittelwerte für jede Schicht berechnet. Der Variationskoeffizient kann als Maß für die

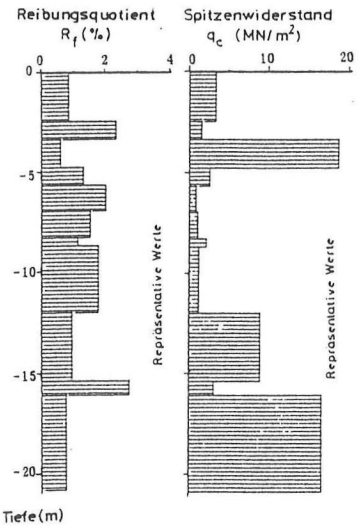


4 Bodenidentifikationsdiagramme

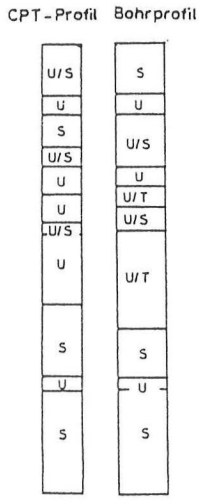


5 Bodenidentifikationsdiagramm für norddeutsche Böden





3 Repräsentative CPT-Parameter



6 Vergleich von Schichtprofilen aus einer Drucksondierung und aus einer Bohrung

Gleichförmigkeit benutzt werden. Die Bilder 3a und 3b zeigen die Ergebnisse des gesamten Verfahrens für den Reibungsquotienten und den Spitzenwiderstand des Beispiels.

Identifikation von Bodenarten

Allgemeines

An Methoden, die Identifikation von Bodenarten allein anhand von CPT-Ergebnissen vorzunehmen, wird bereits seit langer Zeit gearbeitet. Bodenidentifikationsdiagramme wurden bereits von verschiedenen Autoren vorgestellt. Das Bild 4 zeigt die eher wissenschaftlich orientierten Untersuchungsergebnisse von *Douglas* und *Olsen* (1981) und eine daraus abgeleitete »Anwendungsversion« von *Robertson* und *Campanella* (1983). An der Abzisse wird der Reibungsquotient im linearen Maßstab und an der Ordinate der Spitzenwiderstand in logarithmischer Teilung aufgetragen. Diese Art der Auftragung bietet eine treffsichere Anwendung, weil im Bereich kleiner Spitzendrücke eine erhebliche Spreizung der Darstellung gelingt.

Ein Identifikationsdiagramm für norddeutsche Böden

Die Daten zahlreicher CPT's, durchgeführt an verschiedenen Orten in Norddeutschland, wurden mit der unter Abschn. 3 erläuterten Methode behandelt. Die CPT's wurden jeweils in der Nähe von Bohrungen ausgeführt. Die anstehenden Bodenarten wurden durch Sieb- und Schlämmanalysen im Labor bestimmt.

Die Zuordnung der im Labor festgestellten Bodenart zu den jeweils ermittelten, repräsentativen CPT-Werten für Spitzendruck und Reibungsquotient führte zu dem in Bild 5 dargestellten Identifikationsdiagramm. Diese Darstellung stimmt prinzipiell mit dem Diagrammtyp von *Douglas* und *Olson* überein. Die Grenzen zwischen den nach Körnungslinien eingestuften Bodenarten sind keine Geraden. Weiterhin wurde festgestellt, daß sich die Meßergebnisse im Normalfall innerhalb einer durch zwei ebenfalls gekrümmte Linien begrenzten Spur konzentrieren. Außerhalb dieses Gebietes festgestellte Werte — also in den in Bild 5 durch Punktierung gekennzeichneten Bereichen — deuten auf ungewöhnliche Baugrundverhältnisse oder aber möglicherweise auch auf nicht einwandfrei gemessene Datenreihen hin. In solchen Fällen ist eine Bodenidentifikation unsicher, und es sollte auf zusätzliche Untersuchungen des Baugrundes nicht verzichtet werden.

Nach diesem Identifikationsdiagramm können folgende Gruppen von Bodenarten anhand von CPT-Ergebnissen mit großer Zuverlässigkeit angesprochen werden:

- ☐ Sande, Kiese und deren Gemische [S]
- ☐ Schluff/Sand-Gemische [U/S]
- ☐ Schluffe [U] (mit Beimengungen)
- ☐ Tone [T] (mit Beimengungen)

Zwischen diesen durch willkürliche Klassierung definierten Bodenartengruppen gibt es in der Natur keine scharfen Grenzen. Eine feinere Einteilung, z. B. nach dem Grad der Beimengungen, würde eine in praxi nicht erzielbare Differenzierung vortäuschen. Tatsächlich ist eine solche verfeinerte Bodenansprache auch nur in Ausnahmefällen der Baupraxis notwendig. Darüber hinaus ist es eigentlich selbstverständlich, daß mit einem solchen Diagramm zur Bodenidentifikation nicht die Genauigkeit von Sieb- und Schlämmanalysen erreicht werden kann. Zur Beurteilung der Anwendbarkeit eines solchen Identifikationsdiagramms in der Praxis ist ein Vergleich mit den Ergebnissen der dort üblichen visuellen und manuellen Bodenansprache weitaus aussagekräftiger. In Bild 6 ist der Baugrundaufbau, der sich aus der Anwendung des Bodenidentifikationsdiagramms in Bild 5 auf das Sondierergebnis in Bild 1 ergibt, dem entsprechenden Profil gegenübergestellt, das anhand einer Bohrung in rd. 10 m Entfernung ermittelt worden ist. Der Vergleich zeigt anhand der ermittelten Schichtung und der Bodenarten, daß CPT-Ergebnisse durchaus die gleiche Qualität wie Bohrungen mit herkömmlicher Bodenansprache erreichen. Weiterhin gilt es zu bedenken, daß CPT's Informationen über das gesamte durchfahrene Untergrundprofil ergeben, während die Ergebnisse von Laboruntersuchungen stets nur Stichproben darstellen.

Zusammenfassung

Das allgemeine Interesse an für die Praxis nutzbaren Interpretationsmethoden von CPT's ist groß, weil die herkömmliche Baugrunderkundung mit Bohrungen vergleichsweise kostenintensiv ist.

Ein im Rahmen eines Forschungsprojekts entwickeltes 8-stufiges rechnergesteuertes Verfahren zur Aufbereitung von CPT-Meßdaten und ein Bodenidentifikationsdiagramm für norddeutsche Böden werden vorgestellt. Ihre Anwendung führt zu folgenden Ergebnissen:

1. Die Baugrundschichtung kann in einer für baupraktische Zwecke im allgemeinen ausreichenden Differenzierung festgestellt werden.
2. Die Bodenarten können in einer für baupraktische Zwecke im allgemeinen ausreichenden Differenzierung identifiziert werden.

Die Qualität der Ergebnisse ist vergleichbar mit denen einer visuellen und manuellen Ansprache gestörter Proben aus einer Bohrung. Sie ist abhängig von einer genauen Kalibrierung des gesamten Meßsystems.

Das Projekt »Baugrunderkundung durch Cone Penetration Test (CPT)« wurde mit Forschungsmitteln des Landes Niedersachsen gefördert und von Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Blümel betreut. Die

Verfasser danken Herrn cand.-ing. S. Bartke für die Hilfe bei der Aufbereitung der Daten.

Literatur:
Davis, J. C. (1973): »Statistics and Data Analysis in Geology«, John Wiley & Sons, Inc., New York
Douglas, B. J. und *Olseri, R. S.* (1981): »Site Characterization using the Cone Penetrometer Test«, Proc. of the ASCE Specialty Conference »Cone Penetration, Testing and Experience«, St. Louis
Harder, H. und *Blümel, W.* (1987): »Drucksondierung mit digitaler Meßdatenerfassung«, Zeitschrift TIS 8/87
Robertson, P. K. und *Campanella, R. G.* (1983): »Interpretation of Cone Penetration Tests: Parts 1 and 2«, Canadian Geotech. J., Nov. 1983
Vivatrat, V. (1978): »Cone Penetration in Clays«, PhD-Thesis, MIT, Boston, Massachusetts

□