

Ableitung geotechnischer Parameter aus seismischen Drucksondierungen

Dr. Maria Krumb, Daniel Donat M.Sc.
Fugro Consult GmbH, Wolfener Str. 36 U, 12681 Berlin
030 93651-290, m.krumb@fugro.com

Zusammenfassung

Es ist im Allgemeinen ein Trend zu erkennen, dass die Entwicklung von Felduntersuchungen zunimmt, was darin begründet ist, dass nur hier der Boden ungestört untersucht werden kann. Dabei nimmt die Drucksonde mit ihren vielen zusätzlichen Untersuchungsmöglichkeiten sowohl Offshore als auch Onshore eine wichtige Rolle ein. Der Einsatz von vielen numerischen Programmen zur Berechnung der Gebrauchstauglichkeit macht es notwendig maximale Steifigkeiten des Bodens zu ermitteln. Dies ist nur unter kleinsten Verformungen möglich, da die Steifigkeiten verformungsabhängig sind. Bei kleinsten Verformungen ist die Art der Belastung (dynamisch oder statisch) irrelevant, da der Boden gleich reagiert. Deshalb ist der Einsatz von Scherwellen (S-Wellen) und Kompressionswellen (P-Wellen) zur Bestimmung der maximalen Bodensteifigkeiten, sowohl für statische als auch dynamische Anwendungen möglich. Hierbei ist der Einsatz der seismischen CPTu eine zuverlässige und relativ einfache Methode. Sie verbindet in einem Sondiervorgang die konventionelle CPTu (Spitzendruck, Mantelreibung und Porenwasserdruck) mit der zusätzlichen Messung der S- und P-Wellen.

1 Einleitung zur bautechnischen Erkundung und die Rolle der SCPTu

Durch geotechnischen Felduntersuchungen werden die oberflächennahen geologischen Schichten erfasst und für bautechnische Zwecke bewertet. Die natürliche Schichtung wird in homogene Bereiche zusammengefasst, für welche dann geotechnische Bodenparameter bereitgestellt werden. Dafür steht eine große Anzahl an konventionellen Untersuchungen zur Verfügung (DIN 4020). Auf Grund der unterschiedlichen Leistungs- und Aussagefähigkeiten einzelner Methoden ist eine sinnvolle Kombination von Labor- und Feldversuchen notwendig.

Seismische Untersuchungsmethoden werden laut DIN 4020 den indirekten Verfahren zugeordnet und sind immer durch direkte Aufschlüsse zu ergänzen. Im Labor werden dann zusätzlich Versuche zur Bodenklassifizierung und Parameterbestimmung durchgeführt.

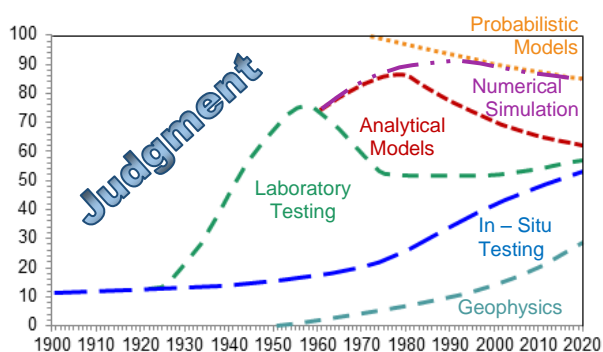


Bild 1: Entwicklung der Designgrundlagen für geotechnische Aufgabenstellungen (modifiziert, Mayne, 2012)

Wie in Bild 1 dargestellt, wurden die Laboruntersuchungen in den letzten Jahrzehnten besonders stark entwickelt. Allerdings wurde dieser Trend in den letzten

Jahren durch die Entwicklung der Felduntersuchungen zusammen mit den geophysikalischen Untersuchungen abgelöst (Mayne, 2012). Nach Jamiolkowski et al. (1995) nehmen seismisch ermittelte Bodenparameter eine zentrale Stellung bei der Beschreibung des spannungs- und dehnungsabhängigen Bodenverhaltens ein. Die seismische Drucksonde (SCPTu) ist hier ein relativ einfaches *in-situ* Messverfahren, bei dem sowohl alle Parameter der konventionellen Drucksonde ermittelt werden, als auch noch zusätzlich seismische Messungen erhoben werden.

2 Die konventionelle Drucksonde (CPT)

2.1 Allgemeines zur Drucksonde

Die Drucksondierung (CPT) gehört schon seit Jahren zum Standardrepertoire der geotechnischen Baugrunderkundung. In vielen Onshore- sowie Offshore-Projekten wird diese Erkundungsmethode weltweit eingesetzt um neben üblichen Bohrungen verschiedenste Bodenkennwerte direkt *in-situ* ermitteln zu können. Grundlage der elektronischen Drucksondierung bildet dabei im deutschsprachigen Raum die DIN EN ISO 22476-1.

Eine Standard-Drucksondier-Raupe für die Durchführung von CPTs (Cone Penetration Test) wird auf einem geländegängigen LKW transportiert. Es können sowohl allein mit der Raupe als auch im Verbund mit dem LKW Sondierungen durchgeführt werden. Diese flexible Einsatzmöglichkeit erlaubt eine Befahrbarkeit des Geländes unter nahezu allen Bedingungen.

In Bild 2 ist ein geländegängiger LKW inklusive Raupe dargestellt.

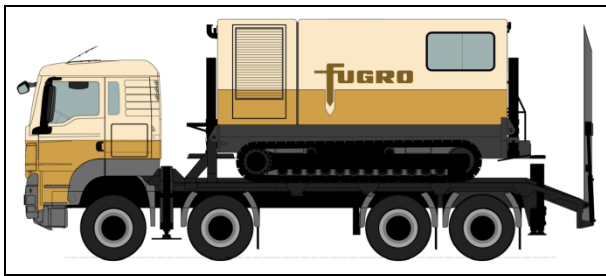


Bild 2: Geländegängiger LWK inklusive Drucksondier-Raupe (Fugro Consult, 2017)

Neben dem Feldeinsatz auf Land mithilfe der Raupe existieren noch zahlreiche weitere Sonderformen der CPT, sodass der Einsatz nicht nur auf dem Land, sondern auch auf hoher See von einem Schiff aus möglich ist. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird aber auf diesen Sonderformen nicht näher eingegangen, wobei immer einen hydraulische Presse mit einem Reaktionsgewicht oder entsprechender Verankerung als Widerlager gegen den Einpressdruck der Spitze vorhanden sein muss.

2.2 Durchführung der Drucksondierung

Das Sondiergerät wird vor dem Sondiervorgang lotrecht am Sondierpunkt aufgestellt. Die Raupe wird dabei durch 4 hydraulisch ausfahrbare FüÙe stabilisiert. Um die Sondierung durchzuführen, wird ein Gegengewicht benötigt, welches durch die Masse der Raupe gegeben wird. Während des Sondiervorganges wird die Sonde hydraulisch mit gleichbleibender Geschwindigkeit von 20 mm/s in den Untergrund eingedrückt. Mithilfe von Dehnmessstreifen innerhalb einer Sonde, werden während der Durchführung der Drucksondierung kontinuierlich die Mantelreibung sowie der Spitzenwiderstand gemessen. Diese Parameter stellen die Grundlage für Klassifikationen dar, mit denen man die Lithologie sowie das bodenmechanische Verhalten ableiten kann.

Eine Erweiterung der CPT stellt die CPTu-Untersuchung dar, bei der neben Mantelreibung und Spitzenwiderstand auch der Porenwasserdruck gemessen wird. Dies erfolgt durch verschiedene Filterelemente in der Sondierspitze.

Alle Parameter werden über ein Kabel von der Sondierspitze auf eine Registriereinheit übertragen und graphisch zeitgleich auf einem Monitor präsentiert.

Die Spitze wird in Bild 3 schematisch abgebildet.

Entsprechend der DIN EN ISO 22476-1, können Sondierspitzen mit 10 cm² und 15 cm² Querschnittsfläche, Anwendungsklasse 2 Versuchstyp TE1 und TE2 verwendet werden. Diese werden mit einem Gestänge von 36 mm Durchmesser eingedrückt.

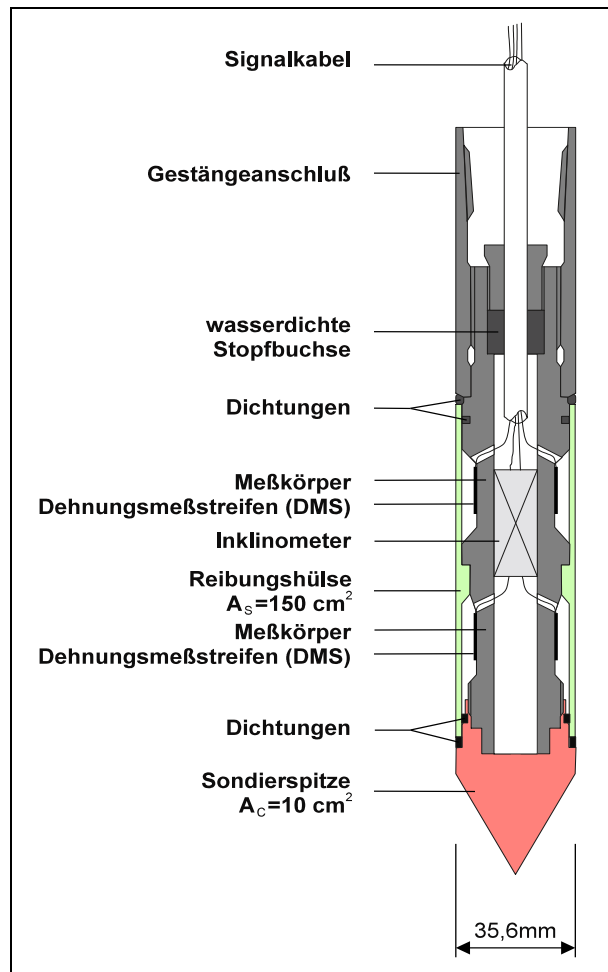


Bild 3: Beispiel für den Längsschnitt durch eine Drucksondierspitze (Fugro Consult, 2017)

3 Die seismische Drucksonde (SCPTu)

3.1 Allgemeines zur seismischen Drucksonde

In den letzten Jahrzehnten wurde die Drucksondierung um zahlreiche Sonden innerhalb der Spitze erweitert, um zusätzliche Parameter während der Durchführung der Drucksondierung zu ermitteln, und um noch besseren Einblick in den Baugrund zu erhalten.

Ein Anwendungsbeispiel ist dabei das SCPT-Verfahren (Seismic Cone Penetration Test), mit deren Hilfe man weitere Bodenkenngrößen ermitteln kann. Die standardmäßige Spitze wird dabei um seismische Sensoren erweitert, sodass seismisch induzierte Schwer- und Kompressionswellen von der Oberfläche empfangen werden. Der seismische Impuls erfolgt dabei durch einen Hammerschlag auf einen Metallträger, welcher fest mit dem Untergrund verzahnt ist. Durch den Kontakt des Hammers mit dem Metallträger wird ein elektrischer Kreislauf geschlossen, welcher den Start der S-Welle markiert.

Dabei wird die Zeitdifferenz, zwischen Induktion an der Oberfläche, bis zum Eintreffen am Geophon, welches

sich in einer bestimmten Tiefe befindet, gemessen. Die Laufzeitdifferenz zwischen zwei Meßstellen deren exakte Entfernung bekannt ist, wird genutzt, um die Wellengeschwindigkeit für den entsprechenden Bodenabschnitt zu berechnen. Diese wird dann herangezogen, um unterschiedliche Bodenparameter abzuleiten.

3.2 Komponenten

Schlüsselkomponenten des SCPTu-Verfahrens in einer von der Fugro entwickelten Spitze sind:

- 2 Dreikomponenten-Geophon (entsprechend der drei Hauptrichtungen x, y und z) installiert in der Drucksonde (Seismik-Spitze) im Abstand von 0.5 m
- Seismische Oberflächen-Quelle (Hammer, Holz- oder Metallblock, Statische Last)
- CPT-Registriereinheit

In Bild 4 wird die Sondier-Spitze dargestellt, welches um das 3-Komponenten-Geophon erweitert wurde, sodass die an der Geländeoberfläche erzeugten P- und S-Wellen erfasst werden können.

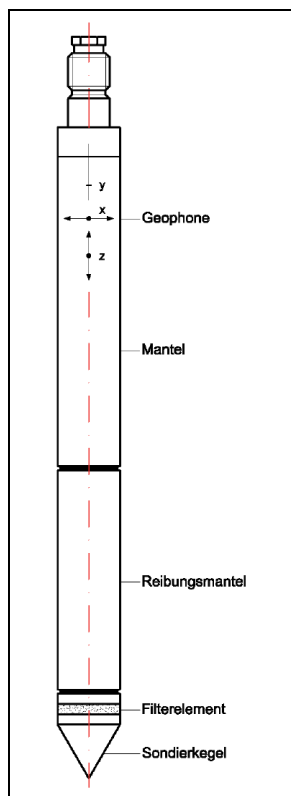


Bild 4: Seismik-Spitze (Fugro Consult, 2017)

Bild 5 stellt die schematische Anordnung aller Bestandteile der Messeinrichtung dar.

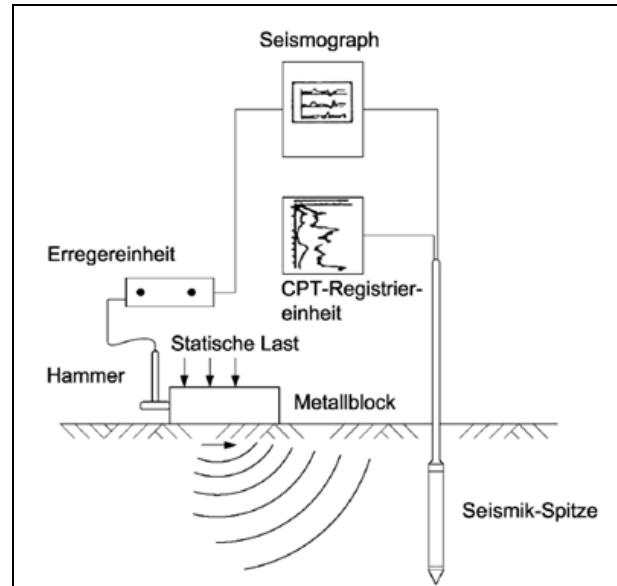


Bild 5: Seismik-Spitze (Fugro Consult, 2017)

3.3 Durchführung des SPCT-Verfahrens

Die Durchführung des SCPT-Verfahrens besteht aus mehreren, repetitiven Schritten.

- Drücken der Sondierspitze zur Versuchstiefe
- Start der Registriereinheit
- Induktion der Oberflächenwelle mithilfe eines Hammerschlags auf einen belasteten Metallblock/Metallträger
- Messung der seismischen Laufzeiten mithilfe der Seismik-Sonden und eines Seismographen
- Wiederholung der Induktion der Oberflächenwelle zum „stacken“ der Daten
- Weitere Durchführung der CPT-Sondierung bis zur nächsten Versuchstiefe
- Erneuter Beginn der Induktion der Oberflächenwelle

Die Erregung der Scherwelle wird impulsartig durch einen Hammerschlag erzeugt. Die S- und P-Wellen durchlaufen den Boden und erreichen die in der Sondierspitze installierten 3-Komponenten-Geophone. Gleichzeitig zum Hammerschlag, wird der Seismograph ausgelöst, welcher das Eintreffen der Scher- und Kompressionswellen registriert. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis das gestapelte (stacked) Messergebnis ein günstiges Signalrausch-Verhältnis aufweist.

Die Messintervalle werden je nach Art und Beschaffenheit des Bodens festgelegt und sind auch von denen in der Spitze installierten Geophonen abhängig. Die Messintervalle können variieren. Ein in der Praxis gängiges Messintervall sollte zwischen 0,5 m und 1,5 m liegen, wobei 1,0 m Intervalle typischerweise gewählt werden.

Fugro konnte die Seismik-Spitze aber soweit verbessern, dass Messintervalle von 0,5 m bei 1,0 m spitzenvortrieb möglich sind, da mehrere Geophone in der Spitze in einem Abstand von 0.5 m verbaut sind, wie in Bild 6 dargestellt.

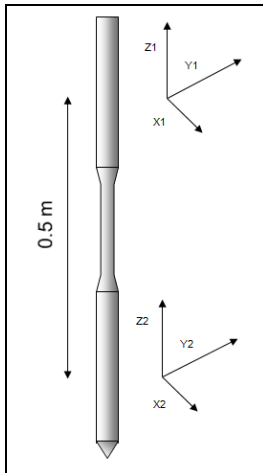


Bild 6: Dual Cone Sonde (Fugro Consult, 2017)

Die Zeitdifferenz zwischen dem Eintreffen der Scherwellen in zwei aufeinanderfolgenden Tiefen ist die Zeit, die die Welle für das Durchlaufen der Bodenschicht benötigt. Mithilfe dieses Verfahrens kann ein Wellengeschwindigkeitsprofil mit der Tiefe aufgezeichnet werden.

Der Hammer und der belastete Metallträger sind in Bild 7 dargestellt. Auf der Abbildung ist der Hammer ersichtlich, welcher auch über ein Kabel mit der Messeinheit verbunden ist. Durch den Hammerschlag auf den durch die Raupe belasteten Träger wird der elektrische

Kontakt geschlossen und die exakte Startzeit der S- und P-Welle definiert.



Bild 7: Versuchsaufbau des SCPT-Verfahrens (Fugro Consult, 2017)

4 Ableitung geotechnischer Parameter

4.1 Messergebnisse

Typischerweise werden die Messergebnisse, also die Laufzeiten und Wellengeschwindigkeiten der P- und S-Welle, einer SCPTu tiefenabhängig dargestellt. Außerdem werden natürlich auch die konventionellen Messergebnisse der CPTu tiefenabhängig ermittelt – Spitzendruck, Mantelreibung und Porenwasserdruck. Ein Beispiel zeigt die Bild 8, bei dem deutlich alle Messergebnisse eine tonige Schicht im oberen Bereich mit darunter liegender sandiger Schicht zu erkennen ist.

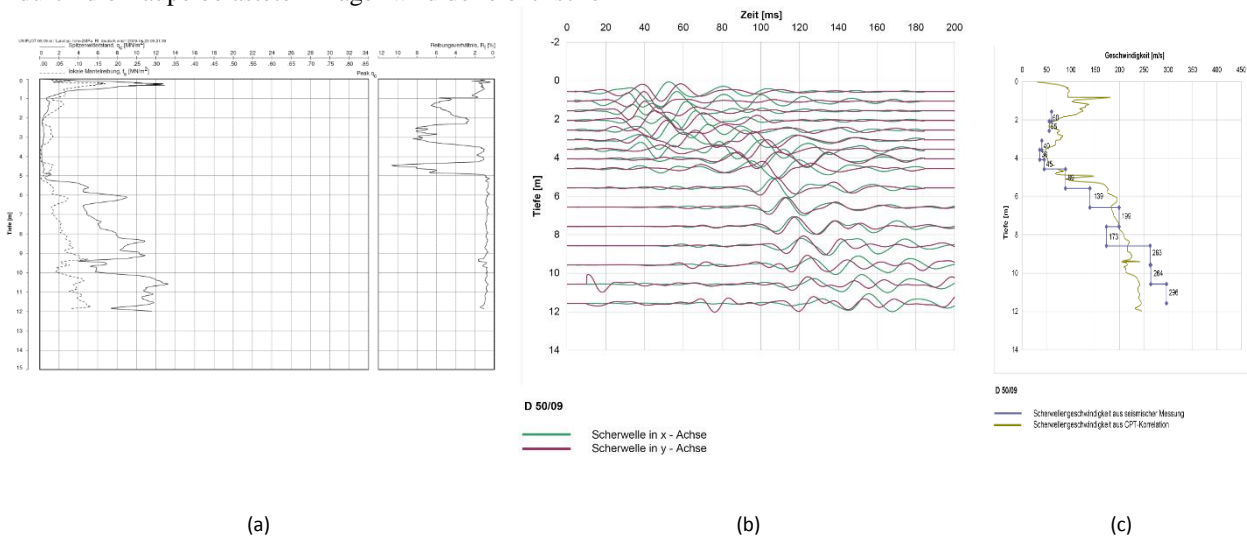


Bild 8: Darstellung der Ergebnisse einer seismischen Drucksondierung
 (a) Ergebnisse von Spitzendruck, Mantelreibung und Reibungsverhältnis
 (b) Laufzeiten der Scherwellen
 (c) Scherwellengeschwindigkeit berechnet aus den gemessenen Laufzeiten und aus Ableitung aus dem gemessenen Spitzendruck

4.2 Allgemeine Hinweise zur Ableitung geotechnische Parameter

Die seismische Drucksondierung ist eine Methode, um die maximalen Bodensteifigkeiten zu ermitteln. Dabei kann aus der S-Welle der maximale Schubmodul (G_{\max} oder G_0), bzw. aus der P-Welle der maximale E-Modul (E_{\max} oder E_0) ermittelt werden. Generell ist es leichter die langsamere Scherwelle mit größeren Amplituden zu messen.

Diese ermittelten Steifigkeiten/Module finden ihre Anwendung sowohl bei statischen bzw. dynamischen Fragestellungen. So ist z.B. der maximale Schubmodul ein wichtiger Bodenparameter bei der Betrachtung des Bodenverhaltens (dynamic response) unter der Beanspruchung durch Erdbeben, Detonationen/Explosionen, Maschinenvibrationen oder Wellen bei Offshore-Konstruktionen. Weiterhin können die Wellengeschwindigkeiten und abgeleiteten Module zur Bewertung des Verflüssigungsrisikos des Bodens genutzt werden.

Bei der statischen Anwendung geht es vor allem um die Optimierung von Fundamenten bei der Gebrauchstauglichkeit, denn durch die Kenntnis der maximalen Steifigkeiten kann das Verformungsverhalten und damit die Steifigkeit des Bodens unter Bauwerkslasten und der daraus resultierenden Verformungen besser abgeschätzt werden und somit Fundamente optimiert werden.

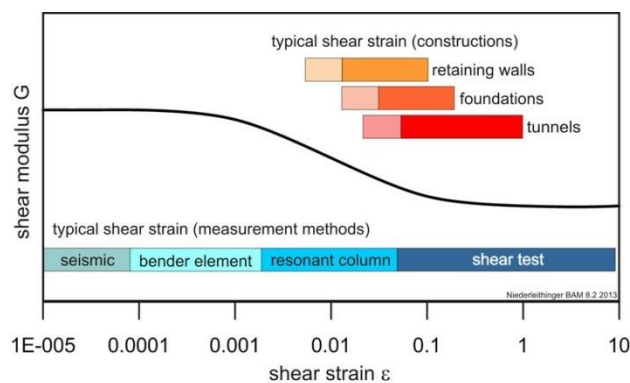


Bild 9: Entwicklung der Bodensteifigkeit in Abhängigkeit zur Verformung mit typischen Versuchsmethoden und Anwendungen (DGZfP-Merkblatt B08 zur seismischen Baugrunderkundung, 2014).

Das heißt, für die statische Berechnung (vor allem bei Anwendung von bestimmten numerischen Methoden), wird die Steifigkeit des Bodens aus den seismischen Messungen abgeleitet. Diese geben Auskunft darüber, was der Widerstand des Bodens gegenüber Verformungen sind. Wie in Bild 9 illustriert, ist die Steifigkeit ohne, oder unter kleinsten Verformungen am größten (small strain stiffness) und nimmt mit zunehmender Verformung ab. Herkömmliche Untersuchungsmetho-

den, wie z.B. der Schertest (shear test) untersuchen den Bruchzustand des Bodens und unterschätzen daher die Steifigkeit des Bodens im Gebrauchszustand (Bild. 9 zeigt die Anwendungsbereiche für Stützwände (retaining walls), Fundamente (foundations) und Tunnel (tunnels).

4.3 Geotechnische Parameter

Verschiedenste geotechnische Bodenparameter können aus den Messwerten der seismischen Drucksondierung abgeleitet werden. Typische Parameter abgeleitet aus den Messergebnissen der konventionelle CPT sind hierbei:

- Materialverhalten, nach z.B. Robertson (1990). Hier werden anhand von Reibungsverhältnis und Spitzendruck (q_c) bzw. Porenwasserdruck-Zahl (B_q) und Spitzendruck (q_c) die erkundeten Böden in bindiges, nichtbindiges und organisches Material auf Grund ihres Materialverhaltens geteilt.
- Lagerungsdichte von rolligen Böden, nach Jamiolkowski et al., 1988)
- Undrainierte Scherfestigkeit von bindigen Böden, nach Rad und Lunne (1988) sowie Battaglio et al., 1986)

Um aus den gemessenen Scherwellen- und Kompressionswellen die entsprechenden Module zu berechnen, kommen die folgenden Formeln zu Einsatz:

$$\text{Schubmodul } G_0 = \rho V_s^2 \quad (\text{Robertson et al., 1986})$$

$$\text{Elastizitätsmodul } E_0 = \rho V_p^2 \text{ oder } E_0 = 2G_0(1 + \nu) \quad (\text{Mayne, 2014})$$

wobei ρ die Dichte des durchschalten Bodens, V_s die Geschwindigkeit der Scherwelle, V_p die Geschwindigkeit der Kompressionswelle und ν die Poissonzahl ist. Dies sind dann alles die maximalen Steifigkeiten unter kleinsten Verformungen.

Der maximale Schubmodul, G_0 (Elastizitätsmodul, E_0) muss nun soweit reduziert werden, dass er mit der entsprechenden Spannung oder relevanten Verformung des jeweiligen Anwendungsproblem einhergeht. Dazu gibt es jede Menge Beispiele in der Literatur – siehe u.a.: Tatsuoka & Shibuya, 1992; Mayne 2005, Vardanega & Bolton, 2013). Diese Ableitungen sind entweder bezogen auf die Schubverformung oder das erreichte Spannungsniveau (G / G_0).



Literatur

BATTAGLIO, M., BRUZZI, D., JAMIOLKOWSKI, M. AND LANCELLOTTA, R. (1986), "Interpretation of CPT's and CPTU's, 1st Part: Undrained Penetration of Saturated Clays", in Field Instrumentation and In-Situ Measurements: Proceedings of the 4th International Geotechnical Seminar, 25-27 November 1986, Singapore, Nanyang Technological Institute, Singapore, pp. 129-143

Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung - Merkblatt B08 zur seismischen Baugrunderkundung, 2014

FUGRO CONSULT GMBH (2017): "Interne Unterlagen"

JAMIOLKOWSKI, M., GHIONNA, V.N., LANCELLOTTA, R. and PASQUALINI, E. (1988): "New Correlations of Penetration Tests for Design Practice", in De Ruiter, J. (Ed.), Penetration Testing 1988: Proceedings of the First International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando, 20-24 March 1988, Vol. 1, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 263-296.

KRUMB A.M., WUTTKE F. (2009): SeismicCone und MagCone – Entwicklungen und Anwendungsgebiete in Cone Penetration Tests. In: Hans Lorenz Symposium, Berlin, Deutschland.

MAYNE, P.W. (2014): Interpretation of geotechnical Parameters from Seismic Piezocone Tests. In: Proceedings from the 3rd International Symposium on Cone penetration Testing, Las Vegas, USA.

RAD, N.S. AND LUNNE, T. (1988), "Direct Correlations between Piezocone Test Results and Undrained Shear Strength of Clay", in De Ruiter, J. (Ed.), Penetration Testing 1988: Proceedings of the First International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando, 20-24 March 1988, Vol. 2, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 911-917.

ROBERTSON, P.K., CAMPANELLA R.G., GILLESPIE D. & RICE A. (1986): Seismic CPT to Measure In Situ Shear Wave Velocity, ASCE J. GED, 112 (8), 791-803

ROBERTSON, P.K. (1990): Soil Classification using the Cone Penetration Test, Can. Geotech. Jnl., Vol. 27, No. 1, 151-158