

Auswertung von Drucksondierungen in Kippenböden

Interpretation of Cone Penetration Tests in Landfills of Open-pit Mines

Dipl.-Ing. Markus Uhlig, Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle
Technische Universität Dresden, Institut für Geotechnik

Die Drucksondierung ist ein indirekter Feldversuch, welcher eine Vielzahl von Auswertungen und Interpretationsmöglichkeiten bezüglich Bodentypen oder Bodeneigenschaften erlaubt. Diese Auswertungen sind überwiegend empirisch und sollten daher für neue Anwendungsbedingungen validiert werden. Im vorliegenden Artikel wird daher eine solche Validierung für die undrainierte Scherfestigkeit, in einem frisch verkippten und daher noch nicht auskonsolidierten Boden, aufgezeigt. Als weitere Besonderheit dieser Kippenböden ist ihre starke Inhomogenität (Mischungen aus Ton, Schluff und Sand) zu nennen. Der empirische Cone-Faktor wird mit zwei unterschiedlichen Interpretationsmethoden bestimmt. So werden zum einen eine tiefenabhängige und zum anderen eine tiefenunabhängige Methode vorgestellt. Für Letztere wird eine statistische Auswertung angewendet. Als Grundlage dienen zwei Bohrkern und jeweils drei direkt benachbarte Drucksondierungen. Aus den Bohrkernen wurden weiterhin Proben ausgestochen, um damit mit UU-Triaxialversuchen die undrainierten Scherfestigkeiten zu bestimmen.

The Cone Penetration Test is an indirect field test that can be evaluated with various approaches and interpretation methods regarding different soil types and their properties. Validation of empirical methods is necessary for new application conditions. In this paper, validation with respect to the undrained shear strength of a young deposited soil is demonstrated. The soil under consideration is not fully consolidated and inhomogeneous (mixtures of clay, silt and sand) as a consequence of the deposition process. The cone factors determined with two different interpretation methods – a depth-dependent and a depth-independent method using statistics – are therefore presented. The interpretations are based on two borings and three CPTs located close to the borings. The undrained shear

strength was determined by UU triaxial tests on undisturbed samples from the borings.

1 Einleitung *Introduction*

In einem Tagebau werden neben dem geförderten Rohstoff auch große Abraummengen bewegt. Je nach Lage des gesuchten Rohstoffs kann das Hangende, welches den Rohstoff überlagert, beträchtliche Mächtigkeiten annehmen. In den Tagebauen des Rheinischen Braunkohlereviere müssen so bis zu mehrere hundert Meter Boden auf der Gewinnungsseite abgebaggert werden, um den Rohstoff Braunkohle zu gewinnen. Das mit Schaufelradbaggern gelöste Material wird auf Transportbändern zur Verkippsseite des Tagebaus transportiert und dort mit Hilfe von Absetzern verkippt. Bei großen Tiefen des Tagebaus entsteht so auf der Verkippsseite ein stetig fortschreitendes Böschungssystem. Da das Böschungssystem standsicher sein muss, wurden Profile entwickelt, die die unterschiedlich anfallenden Materialien vom Grobkies bis hin zum ausgeprägt plastischen Ton bzw. vom trockenen bis hin zum nassen (flüssigen) Material aufnehmen können. Die Materialien werden dafür in verschiedene Materialklassen eingeteilt, dabei wird zwischen Grob- und Feinkorn und beim Feinkorn nochmals zwischen trocken (bildet Schüttkegel) und nass unterschieden. Diese einzelnen Profile haben Höhen von ca. 30 m und werden von den sogenannten Strossen aus, auf denen die Absetzer fahren, verkippt. Mehrere Strossen bilden dann das Böschungssystem des Tagebaus.

Für die Berechnung der Standsicherheit der Böschung, ggfs. auch unter Berücksichtigung der Belastung eines Absetzers, werden Materialkennwerte, wie z. B. die un-

drainierte Scherfestigkeit, benötigt. Um die undrainierte Scherfestigkeit zu bestimmen, werden bereits seit einigen Jahren Untersuchungen an der Technischen Universität Dresden durchgeführt. So wurden Prognosemodelle entwickelt, mit welchen anhand von Materialparametern und dem Anfangszustand zeitlich veränderliche undrainierte Scherfestigkeiten abgeleitet werden können (Herle, 2010). Um die Eingangswerte der Prognosen zu validieren bzw. um die Scherfestigkeiten zu überprüfen, wurden zusätzlich Feldversuche durchgeführt.

Besonders geeignet erschienen Drucksondierungen, da diese ein häufig eingesetztes und zuverlässiges Verfahren zur indirekten Erkundung von Böden sind. Die dabei gemessenen Größen sind in der Standardkonfiguration der Spitzendruck (auch als Spitzenwiderstand bezeichnet), welcher direkt am Konus gemessen wird, und die Mantelreibung (auch als Mantelwiderstand bezeichnet). Sie wird mit Hilfe einer direkt oberhalb des Konus liegenden Reibungshülse gemessen, welche vom restlichen Gestänge entkoppelt ist. Aus der Sondierung kann über empirische Auswertungen eine Vielzahl von Parametern und Zustandsvariablen abgeleitet werden. So lassen sich in feinkörnigen Böden z. B. der Überkonsolidierungsgrad oder die undrainierte Scherfestigkeit ableiten (Lunne et. al., 1997). Auch lassen sich unter Zuhilfenahme des Spitzen- und Mantelwiderstandes die Bodentypen bestimmen. Allerdings haben nahezu alle Auswertungen eines gemeinsam; sie beruhen auf empirischen Interpretationen, welche meist für natürlich gewachsene Böden (in einem lokalen Gebiet) oder bei der Verwendung von grobkörnigen Böden aus Laborversuchen abgeleitet wurden.

Da die Böden regionale Unterschiede aufweisen, wird daher auch in der DIN EN ISO 22476-1 (2013), der aktuell gültigen deutschen Norm für die Drucksondierungen, darauf verwiesen, dass die Versuchsergebnisse *"insbesondere für die qualitative und/oder quantitative Bestimmung von Bodenprofilen im Zusammenhang mit direkten Aufschlüssen (z. B. Probenahme nach ISO 22475-1) oder zum Vergleich mit anderen Felduntersuchungen vor Ort geeignet sind"*. Anders formuliert bedeutet dies, dass diese empirischen Ableitungen nicht überall ohne Überprüfung eingesetzt werden können. Dies gilt natürlich auch für einen Tagebaubetrieb, in welchem auf der Verkippsseite die Böden inhomogen abgelagert werden und somit nicht dieselben

Eigenschaften wie natürlich gewachsene Böden besitzen. Daher werden in diesem Artikel Auswertungsmethoden zur Validierung für fein- bis gemischtkörnige Böden vorgestellt, um die undrainierte Scherfestigkeit bestimmen zu können.

Für die Validierungen wurden zwei Bohrungen und sechs Drucksondierungen durchgeführt. Im Folgenden wird nur auf einen Teilabschnitt der Bohrungen bzw. Sondierungen, in welchem nasses Feinkorn verkippt wurde, eingegangen.

2 Drucksondierungen *Cone Penetration Tests*

In diesem Kapitel werden die Auswertungsmethoden der insgesamt sechs durch die Firma FUGRO (Berlin) ausgeführten Drucksondierungen beschrieben. Die Ansatzpunkte der Drucksondierungen wurden jeweils im Abstand von ca. 1 m, um 120° versetzt um den Bohrkern herum, angeordnet. Die Abstände der Drucksondierungen zueinander betragen so an der Oberfläche ungefähr 1,5 m. Die Drucksondierungen wurden in Bezug auf die Bodentypen ausgewertet. Dies ist nötig, da für die Auswertung der undrainierten Scherfestigkeit nur feinkörnige Böden verwendet werden sollen, da grobkörnige Böden die Ergebnisse verzerren würden. Anschließend wird auf die Auswertung der undrainierten Scherfestigkeit eingegangen.

2.1 Bestimmung des Bodentyps *Determination of the soil type*

Die Bestimmung des Bodentyps erfolgt mit drei Standardauswertungen, welche nachfolgend vorgestellt werden. Für alle Auswertungen wird neben dem Spitzendruck q_c auch die Mantelreibung f_s verwendet.

Da kein Porenwasserdruck gemessen wurde, wird der Spitzenwiderstand nicht korrigiert, somit ist $q_c = q_t$.

Die zurückgezogene DIN 4094-1 (2002) beinhaltet eine Auswertung zur Bestimmung des Bodentyps. Dabei wird der Spitzendruck logarithmisch über das Reibungsverhältnis

$$R_f = f_s / q_c \cdot 100 \quad [\text{in \%}] \quad (1)$$

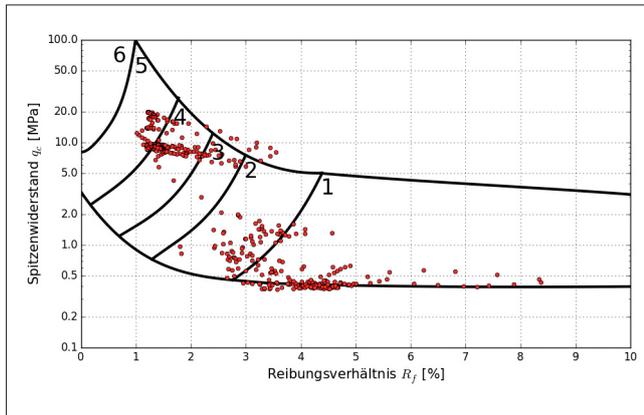


Bild 1: Bodentypen nach DIN 4094-1 für die Sondierung CPT3-SO (21,2 m bis 30 m unter Geländeoberkante)

Figure 1: Soil type according to DIN 4094-1 for the penetration test CPT3-SO (21.2 m to 30 m below top ground surface)

in einem Diagramm (siehe Bild 1) aufgetragen. Im Diagramm sind dann sechs Bereiche definiert, welche die Bodentypen Ton [1] bis hin zu Kies [6] definieren. In eckigen Klammern werden nachfolgend immer die hier verwendeten Nummern der einzelnen Bereiche der Bodentypen angegeben. Sie sind zudem in den Bildern 1 bis 3 dargestellt. Punkte, die außerhalb des Diagramms [-1] oder der definierten Bereiche [0] liegen, können für die nachfolgende Auswertung in Abschnitt 4.2 nicht verwendet werden, da hier kein Bodentyp zugeordnet werden kann. Als feinkörnige Bodentypen wurden die Typen Ton [1], Schluff [2] und Schluff, sandig [3] festgelegt.

Die zweite verwendete Auswertung stammt von Robertson et al. (1986) und verwendet dieselben Parameter (q_c und R_f) wie die DIN 4094. Auch hier ist die Abszisse (Spitzendruck) logarithmisch dargestellt. Der Unterschied liegt in der Anzahl der definierten Bereiche. Im Diagramm (Bild 2) sind 12 Bereiche (Bodentypen) definiert. Als feinkörnige Bodentypen wurden definiert (in runden Klammern wird der englische Originalbegriff der Quelle angegeben):

- Sensitives Feinkorn [1] (sensitive, fine grained),
- organische Böden [2] (organic material),
- Ton [3] (clay) bis schluffiger Ton, toniger Schluff [5] (clayey silt to silty clay),
- steifes Feinkorn [11] (very stiff fine grained: overconsolidated or cemented).

Als dritte Auswertung wird eine überarbeitete Variante der Auswertung von 1986, ebenfalls von Robertson

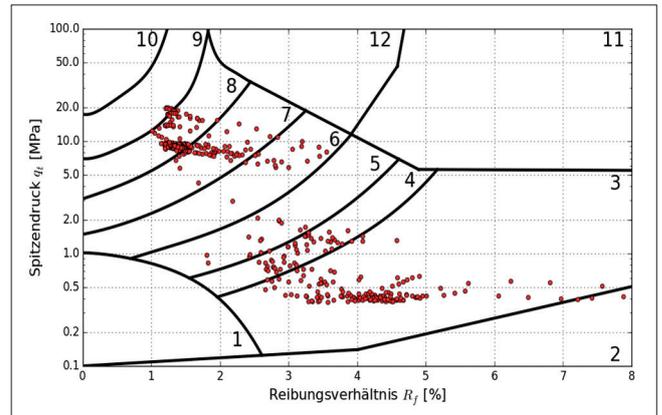


Bild 2: Bodentypen nach Robertson (1986) für die Sondierung CPT3-SO (21,2 bis 30 m unter Geländeoberkante)

Figure 2: Soil type according to Robertson (1986) for the penetration test CPT3-SO (21.2 m to 30 m below top ground surface)

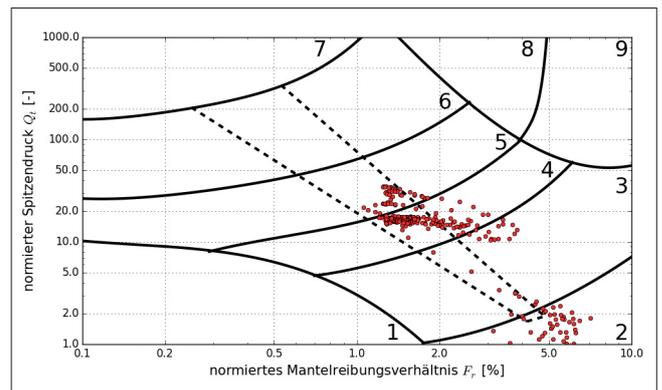


Bild 3: Bodentypen nach Robertson 1990 für die Sondierung CPT3-SO (21,2 bis 30 m unter Geländeoberkante)

Figure 3: Soil type according to Robertson (1990) for the penetration test CPT3-SO (21.2 m to 30 m below top ground surface)

(1990) vorgestellt, verwendet. Die Größen werden durch die totalen σ_{vo} und effektiven σ'_{vo} Vertikalspannungen normiert. Zur Anwendung kommen der normierte Spitzendruck

$$Q_t = (q_t - \sigma_{vo}) / \sigma'_{vo} \quad (2)$$

und das normierte Mantelreibungsverhältnis

$$F_r = (f_s) / (q_t - \sigma_{vo}) \cdot 100 \quad [\text{in \%}] \quad (3)$$

Im Diagramm, in dem neun Bodentypen definiert sind, werden beide Achsen logarithmisch aufgetragen. Die Ordinate ist dabei das normierte Mantelreibungsverhältnis. Im Weiteren werden die verwendeten feinkörnigen Bodentypen der Auswertung Robertson (1990) vorgestellt:

- Organische Böden [2] (organic soils, peat),
- Ton bis schluffiger Ton [3] (clay to silty clay).

Für die Berechnung der Vertikalspannung wird eine Dichte von 20 kN/m^3 (vgl. Tabelle 2, Dichten) angenommen. Da der Porenwasserdruck nicht gemessen wurde und kein Grundwasser ansteht, wird die effektive und totale Vertikalspannung gleich gesetzt.

2.2 Bestimmung der undrainierten Scherfestigkeit

Determination of the undrained shear strength

Die undrainierte Scherfestigkeit c_u kann aus Drucksondierungen mit der Formel

$$c_u = (q_t - \sigma_{v0}) / N_k \quad (4)$$

bestimmt werden. Die Differenz im Zähler wird dabei auch als Netto-Spitzenwiderstand bezeichnet. N_k ist ein empirisch bestimmter Kalibrierungsfaktor, welcher nachfolgend als Cone-Faktor bezeichnet wird. In der Literatur wird der Faktor für Tone in den Größenordnungen von 10 bis 30 angegeben (Lunne et al., 1997, aus verschiedenen Quellen der 80er-Jahre). Auch neuere Veröffentlichungen zeigen diesen Bereich. So werden in Larsen et al. (2015) Mittelwerte von 25 bis 28 für schluffige Tone bis tonige Schluffe angegeben. Allerdings wird auch gezeigt, dass Einzelwerte (keine Ausreißer) im Bereich von 20 bis 37 streuen können. Noch deutlicher werden die Streuungen in Knight, Muir Wood (2015), hier wurden insgesamt 1.500 Cone-Faktoren an vier Tonböden aus der Nordsee bestimmt und statistisch ausgewertet. Die größte Spanne von N_k innerhalb eines Bodens reicht dabei von 2,7 bis 51,9, obwohl für die Statistik keine Ausreißer (das 96 %-Fraktil) berücksichtigt wurden. Die Statistik ergibt zudem, dass die Cone-Faktoren log-normalverteilt sind, was u. a. auch in Kammer Mortensen et al. (1991) zu finden ist und nachfolgend verwendet wird.

2.3 Feldversuche

Field investigation

Da der Cone-Faktor das Ergebnis der undrainierten Scherfestigkeit maßgebend beeinflusst, wurden Vali-

dierungsversuche an zwei Orten im Tagebau durchgeführt. Die Orte werden mit O3 und O4 bezeichnet. Werden beide Orte für die Auswertung zusammengezogen, wird dies als O34 bezeichnet. Die Tabelle 1 fasst die Zeitdifferenzen zwischen der Sondierung sowie der Verkippung und der Gewinnung des Bohrkerns zusammen. Es wird deutlich, dass die Bohrkerns erst vier Wochen nach den Drucksondierungen durchgeführt wurden. Um die Daten dennoch vergleichen zu können, muss davon ausgegangen werden, dass keine nennenswerten Veränderungen in dieser Zeit stattgefunden haben.

[d]	Verkippung	CPT	Bohrkern
CPT	68	–	28
Bohrkern	96	28	–

Tabelle 1: Zeitdifferenz zwischen der Verkippung, den Sondierungen und der Bohrkerngewinnung
 Table 1: *Time period of deposition, cone penetration testing and drilling of the borings*

3 Untersuchungen an den Bohrkernen

Investigations on borings

An jedem Ort wurde ein Bohrkern mittels Rammkernsondierung bis zu einer Tiefe von 30 m gewonnen. In die Rammkernhülse wurden 1 m lange PE-Rohre, nachfolgend als Liner bezeichnet, mit 10,3 cm Innendurchmesser eingebaut und mittels Fallbär in den Boden gerammt. Nach der Förderung der Liner, wurden diese mit Kappen verschlossen und in das Labor der TU Dresden geliefert.

3.1 Laborversuche

Laboratory tests

Im Labor wurden die Liner geöffnet und diverse Kennwerte wie z. B. der Wassergehalt und die Dichte (mit kleinen Ausstechzylindern, Durchmesser 38 mm) bestimmt. Alle 2 m wurde zudem mind. an einem Material die Klassifikation durchgeführt. Für die Validierung wurde mindestens pro Meter ein UU-Triaxialversuch nach DIN 18137-2 (2011) durchgeführt. Hierzu wurden mit Ausstechzylindern ($d = 38 \text{ mm}$, $h = 76 \text{ mm}$) Proben in vertikaler Ausrichtung ausgestochen. Die Proben wurden mit einem Seitendruck in Höhe der Vertikalspannung der Entnahmetiefe abgeschert. Es wurden allerdings

nur Einzelversuche und nur selten (wie sonst üblich) drei Teilversuche pro Tiefe durchgeführt.

Anhand der Bohrungen und der CPT-Ergebnisse wurden auch die Bereichsgrenzen festgelegt: Die Bilder 5 und 6 zeigen die Bereiche des nassen Feinkorns mit rot hinterlegter Farbe. Es ist zu erkennen, dass die Bereichsmächtigkeit an den zwei Orten zwischen ca. 8,8 m (O3) und 4,6 m (O4) schwankt. Der darüber liegende Bereich ist mit brauner Hintergrundfarbe (trockenes Feinkorn) dargestellt. Der weiße Bereich dazwischen ist ein Übergangsbereich, in welchem Material der jeweils angrenzenden Schichten gefunden wurde. Die untere Begrenzung gibt die untersuchte Endteufe mit 30 m unter Geländeoberkante.

3.2 Ausgewählte Ergebnisse Selected Results

Für die beiden Bohrkerne und den hier betrachteten Bereich wurden insgesamt sieben Klassifikationen nach DIN 18196 (2011) durchgeführt, wobei vier Proben mittelplastische und drei Proben leicht plastische Tone ergaben. Aus mehreren vorherigen Projekten (u. a. Herle, 2010) ist bekannt, dass das nasse Feinkorn aus Ton-Schluff-Gemischen mit niedrigen Plastizitätszahlen besteht, was hier bestätigt werden konnte. Diese Böden sind aufgrund ihrer engen Plastizitätsbereiche sehr wasserempfindlich (sie verändern ihre Konsistenz auch bei kleinen Wassergehaltsänderungen) und liegen bei der Verkippung im Tagebau meist in flüssiger bis weicher Konsistenz vor.

Die Tabelle 2 zeigt Eigenschaften und Zustände der Böden als Mittelwerte von untersuchten Proben der Bohrungen am Ort O3 und O4 sowie als Mittelwert und Standardabweichung beider Orte (O34). Es wurde dabei angenommen, dass alle Parameter normalverteilt im Feld auftreten. Aus einem Vergleich der Mittelwerte, getrennt für beide Orte (siehe Tabelle 2, Spalte 2 und 3), zeigt sich, dass bei beiden Bohrkerne ähnliches Material angetroffen wurde. Das Material am Ort O3 hat gegenüber dem Ort O4 einen geringeren Glühverlust und daher auch Plastizitätsbereich. Auch die Wassergehalte am Ort O3 sind kleiner und es ergibt sich eine geringere Konsistenzzahl. Die Konsistenzen an beiden Orten lagen für den Zeitpunkt der Probenahme zwischen weich und steif.

Parameter	μ			σ
	O3	O4	O34	O34
Wassergehalt [%]	20,4 (72)	25,4 (39)	22,2 (111)	4,6 (111)
Glühverlust [%]	3,9 (5)	5,9 (5)	4,9 (10)	1,4 (10)
Feuchtdichte [g/cm ³]	1,965 (37)	1,943 (21)	1,957 (58)	0,09 (58)
Plastizitätszahl [%]	15,4 (4)	23,8 (3)	19,0 (7)	4,9 (7)
Konsistenzzahl [-]	0,57 (4)	0,90 (3)	0,71 (7)	0,19 (7)

Tabelle 2: Zusammenfassung der Mittelwerte μ der Parameter der Orte O3, O4 und O34, sowie die Standardabweichung σ beider Orte O34 (in Klammern wird die Probenanzahl angegeben)

Table 2: Summary of arithmetic means μ of the parameters of the locations O3, O4 and O34 and the standard deviation σ of both locations O34 (in brackets the number of samples)

Die undrainierte Scherfestigkeit wurde an insgesamt 15 Proben bestimmt (O34). Es ist bekannt, dass die Scherfestigkeit log-normalverteilt ist (Herle, 2010), weshalb diese Verteilung auch für die Auswertung verwendet wurde. Das Bild 4 zeigt ein Balkendiagramm und die approximierte Log-Normalverteilung beispielhaft für die zusammengefassten Orte O34. Die Statistik wurde mit den Einzelwerten durchgeführt, d. h. dass jeder durchgeführte UU-Versuch in die Statistik eingeht. Alternativ hätten die Mittelwerte aus allen c_u -Werten einer Tiefe (siehe z. B. Bild 6, 25,4 m) verwendet werden können.

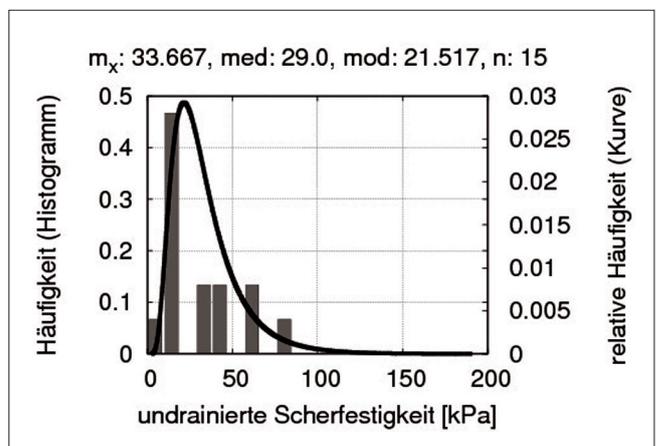


Bild 4: Verteilung der undrainierten Scherfestigkeit: Histogramm und Log-Normalverteilung zusammengefasst für beide Orte O34 (Einzelwerte)

Figure 4: Distribution of undrained shear strength: histogram and log-normal distribution at location O34 (single values)

	O3	O4	O34
Proben	8	7	15
Mittel [kPa]	17,6	52,0	33,7
Median [kPa]	17,3	50,2	29,0
Modal [kPa]	16,6	46,7	21,5

Tabelle 3: Mittel-, Median- und Modalwert der undrainierten Scherfestigkeit für die Orte (Einzelwerte)
 Table 3: Mean, median and mode of the undrained shear strength for the locations (single values)

Die statistischen Kennwerte der Log-Normal-Verteilungen der Orte O3, O4 und O34 sind in der Tabelle 3 aufgezeigt. Es wird deutlich, dass die c_u -Werte an beiden Orten (analog der Konsistenzen) unterschiedlich sind. Diese Streuungen sind für den Tagebaubetrieb nicht ungewöhnlich, es sind beide Bereiche der Orte

3 und 4 der nassen Materialklasse zugeordnet, sodass diese hier auch zusammen ausgewertet werden. Eine genauere Einteilung der Materialklassen wäre für den Tagebaubetrieb aufgrund der großen Mengen an Bodentransport nicht realisierbar.

Die Bilder 5 und 6 zeigen, dass die Eigenschaften des Materials an einem Ort durchaus homogen sein können. So wird die undrainierte Scherfestigkeit beider Bohrkern von 19 m bis 30 m unter Geländeoberkante dargestellt. Ein Punkt stellt jeweils einen Einzelversuch dar. Wurden mehrere Versuche in gleicher Tiefe durchgeführt, so ist dies an dem Fehlerbalken zu erkennen, welcher jeweils den Mittelpunkt und den größten und kleinsten gemessenen Wert darstellt. Zudem ist in den Bildern 5 und 6 gut der Unterschied zur darüber liegenden (in braun dargestellten) Schicht, welche deutlich höhere Scherfestigkeiten aufweist, erkennbar.

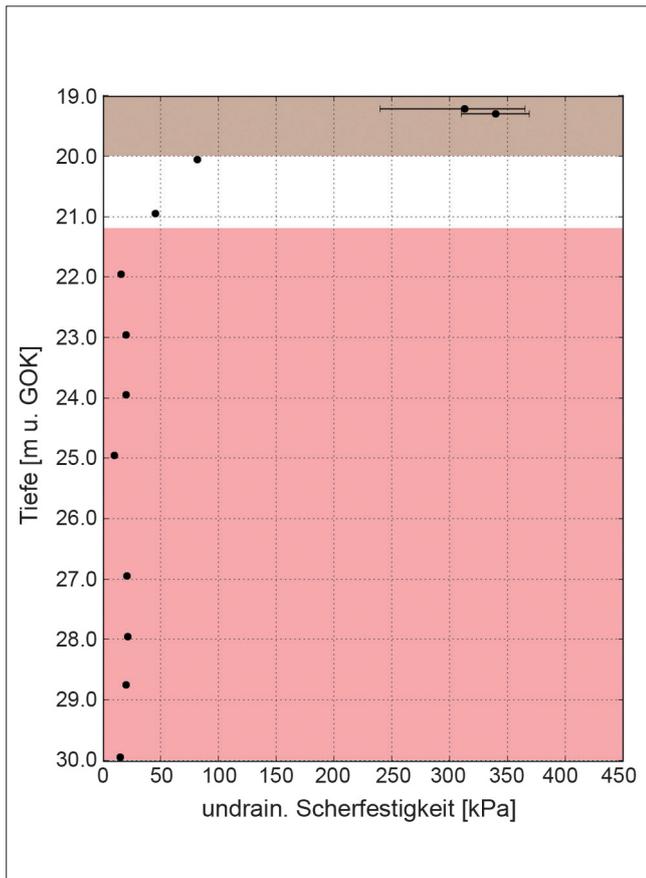


Bild 5: Undrainierte Scherfestigkeit aus UU-Triaxialversuchen am Ort O3 (roter Bereich: nasses Feinkorn, brauner Bereich: trockenes Feinkorn)
 Figure 5: Undrained shear strength from UU triaxial tests at location O3 (red: wet fine grain, brown: dry fine grain)

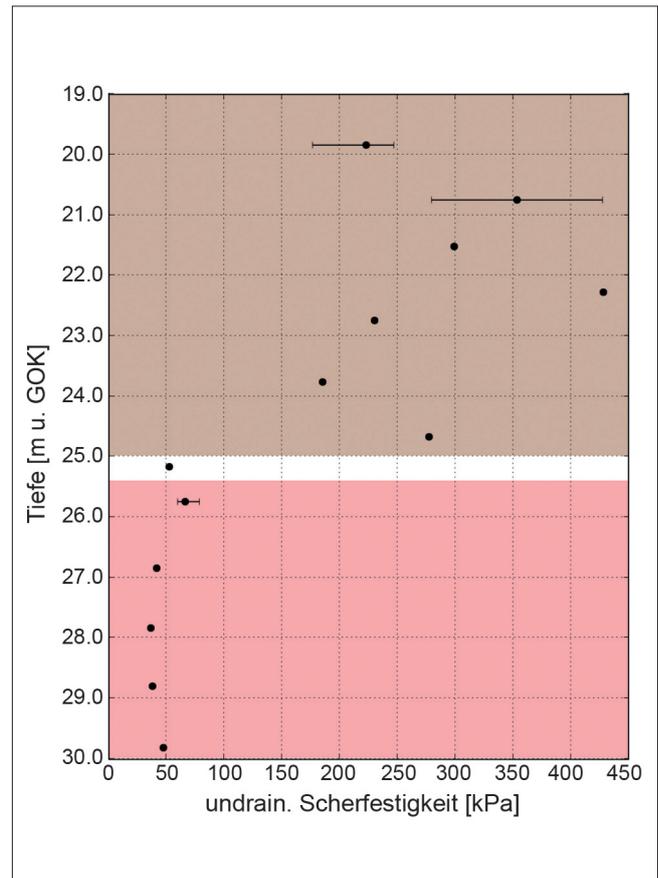


Bild 6: Undrainierte Scherfestigkeit aus UU-Triaxialversuchen am Ort O4 (roter Bereich: nasses Feinkorn, brauner Bereich: trockenes Feinkorn)
 Figure 6: Undrained shear strength from UU triaxial tests at location O4 (red: wet fine grain, brown: dry fine grain)

4 Auswertung des Cone-Faktors

Determination of the cone factor

Die im Abschnitt 3.1 festgelegten Bereiche des nassen Feinkorns wurden auch für die Auswertung der Drucksondierungen verwendet. So werden nachfolgend nur Daten aus diesem Bereich berücksichtigt.

In diesem Abschnitt wird der Cone-Faktor nach Formel 4 ausgewertet. Es werden unterschiedliche Auswertungen und damit zusammenhängende Annahmen durchgeführt. Zunächst wird eine Auswertung mit Tiefenbezug vorgestellt (siehe Abschnitt 4.1). D. h. die Ergebnisse des Netto-Spitzenwiderstandes und der undrainierten Scherfestigkeit aus dem Labor werden je nach ihrer Tiefenlage zusammengeführt und daraus ein N_k -Faktor ausgewertet. Abschließend kann eine Statistik über alle N_k -Faktoren durchgeführt werden.

Alternativ kann die Tiefe ausgeblendet (ohne Tiefenbezug) und zunächst alle Ergebnisse des kompletten Bereichs zusammengefasst werden (vgl. Abschnitt 4.2). Die Zusammenfassung ist dabei nur mit statistischen Auswertungen möglich. Es ist bekannt (Kammer Mortensen et al., 1991), dass neben der undrainierten Scherfestigkeit auch der Netto-Spitzenwiderstand einer logarithmischen Normalverteilung folgt. Somit können dann die N_k -Faktoren über die verteilungsbeschreibenden Parameter (z. B. den hier gewählten Medianwert) ausgewertet werden.

Neben den beiden benannten Auswertungsmethoden des Tiefenbezugs, wird zudem die Auswertung für die

- je drei CPTs an einem Ort,
- alle drei zusammengefassten CPTs an einem Ort
- und für alle sechs zusammengefassten CPTs beider Orte

aufgezeigt. Zudem kommen die drei Auswertungen zur Bestimmung der Bodentypen nach Abschnitt 2.1 zum Einsatz.

4.1 Zuordnung mit Tiefenbezug

Depth-dependent approach

Bei der Auswertung mit Tiefenbezug, wird zunächst die undrainierte Scherfestigkeit aus der Tiefe des Bohrkernes festgelegt. Die Bestimmung innerhalb des Bohr-

kernes (Liners) stellt dabei keine Herausforderung dar, allerdings ist es bei der Gewinnung der Bohrkern im Feld unmöglich, die Kerne aus exakt jedem Meter (ohne Verlust) zu gewinnen und demzufolge zuzuordnen. Dies bedeutet für diese Auswertung, dass die Tiefe der gewonnenen Probe im Bohrkern nicht präzise ist. Zudem wird der Netto-Spitzenwiderstand der Drucksondierungen für jede Probe bestimmt, dafür wird zunächst der nächstgelegene Punkt der Drucksondierung zur Mitte der Probe des Triaxialversuches gesucht. Da die Proben eine Höhe von 76 mm aufweisen, wurden für die zwei ober- und unterhalb des Mittelpunktes liegenden Messwerte der Drucksondierungen (in Summe ca. 10 cm) ausgewählt. Aus diesen fünf Messwerten der Sondierung wurde der Mittelwert des Netto-Spitzenwiderstandes gebildet.

Wurden in einer Tiefe mehrere Laborversuche durchgeführt, so wurde für diese Tiefe jedes Einzel-laborergebnis der undrainierten Scherfestigkeit mit dem (immer gleichen) Netto-Spitzenwiderstand der Drucksondierung(-en) der gleichen Tiefe verglichen und für diese Auswertung verwendet. Da an jedem Ort (O3 oder O4) drei Sondierungen und ein Bohrkern ausgeführt wurden, wird zudem jedes Laborergebnis dreimal verwendet, um für jede Sondierung einen N_k -Wert zu berechnen.

Aus den sieben bzw. acht Laborversuchen (für den Ort O4 bzw. O3) und den drei CPTs pro Ort ergeben sich so 45 Cone-Faktoren, welche zwischen -5,6 und 1.249,1 streuen. In weiteren Schritten müssen nun die „Ausreißer“ herausgefiltert werden, um für das bestehende Material einen Cone-Faktor zu finden. Daher wurden künstliche Klassenbereiche der Cone-Faktoren gewählt und die Faktoren einsortiert. Die gewählten Klassen und die noch in der Klasse verbleibenden Cone-Faktoren werden in Bild 7 für alle verfügbaren Daten (Ort O34) dargestellt. Es wird deutlich, dass in der ersten möglichen Klasse (Cone-Faktor von 0 bis 50) nur noch 24 Faktoren übrig bleiben und die Anzahl der Faktoren bis zur kleinsten Klasse (4-12) auf nur noch sieben reduziert werden.

Mit dem Herabsetzen der oberen Klassengrenze verkleinert sich auch der Mittelwert und der Medianwert. Im Bild 8 ist die Entwicklung der Medianwerte (log. Ordinate!) mit abnehmender Klassengröße für alle zur Verfügung stehenden Daten (Ort O34) dargestellt. Die Klassen mit einer Untergrenze der Cone-Faktoren gleich 0 wurden in blau, die mit einer Untergrenze von 4 in rot gekennzeichnet.

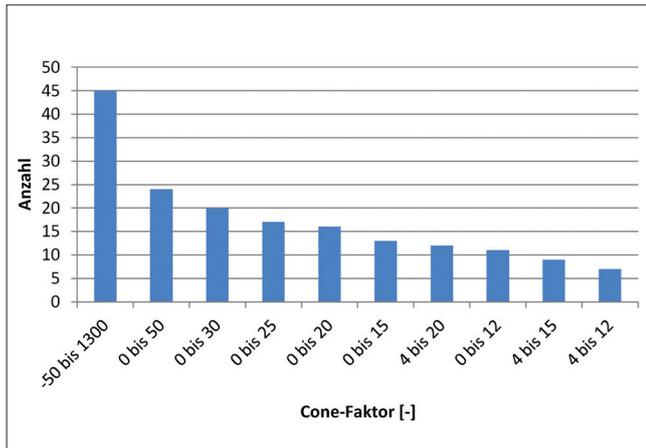


Bild 7: Faktorenanzahl über die Auswahl des Klassenbereiches des Cone-Faktors (O34)
 Figure 7: Number of samples for different cone factor intervals (O34)

Sieht man von den unrealistischen Werten einmal ab, wird der Medianwert von 12,3 (Klasse 0 bis 50) auf 4,3 (0 bis 12) reduziert. So erhält man je nach Klassenwahl aus den Drucksondierungen undrainierte Scherfestigkeiten, die sich bis zum Dreifachen unterscheiden. Die Wahl des N_k -Faktors ist also sehr stark von der Klassenwahl abhängig. Auch eine Betrachtung (siehe Bild 9) der einzelnen Orte ergibt das gleiche Bild. Dargestellt

werden die Medianwerte der Cone-Faktoren (logarithmisch!) über die Anzahl der zur Verfügung stehenden Faktoren. Es ist zu erkennen, dass je nach Sondierung unterschiedlich viele Punkte dargestellt werden. Der Grund hierfür ist die festgelegte Mindestanzahl von drei Faktoren unter der keine Statistik mehr durchgeführt wurde. Als Referenz für die Anzahl (Abszisse) dient für jeden Punkt (CPT) die zur Verfügung stehende Anzahl von N_k -Werten (z. B. bei allen Einzel-CPTs am Ort O3: Acht Faktoren, vgl. auch Tabelle 3). Werden alle Faktoren zusammen betrachtet (siehe Anzahl bei 100 %) so wird deutlich, dass die Sondierungen am Ort 3 sehr hohe Faktoren (von 95,8 bis 215,7) und die CPTs am Ort 4 deutlich niedrigere N_k -Werte (von 23,6 bis 31,1) ergeben.

Bei der Auswertung am Ort 3 wurde festgestellt, dass der Netto-Spitzenwiderstand sehr hoch war. Bei der Auswertung der Bodentypen ergab sich im unteren Bereich ein Sand und nur im oberen Bereich ein sehr weicher Boden. Ein weiteres Problem dieser Auswertung ist die sehr geringe Datenbasis, welche durch das Aussortieren von Daten noch deutlich verkleinert wird, daher wird im nächsten Abschnitt eine alternative Auswertung vorgestellt.

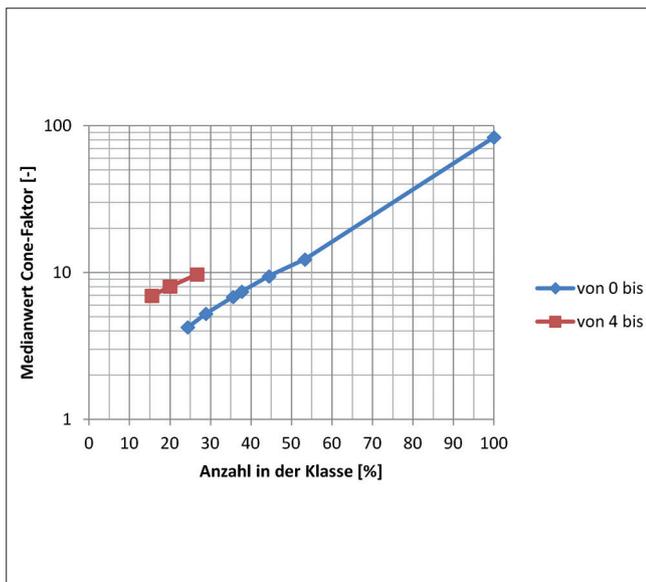


Bild 8: Entwicklung des Medianwertes des Cone-Faktors in Abhängigkeit der Bereichsgröße des Cone-Faktors (alle Werte, nur Ort O34)
 Figure 8: Median of the cone factor depending on the chosen cone factor intervals (all values, location O34 only)

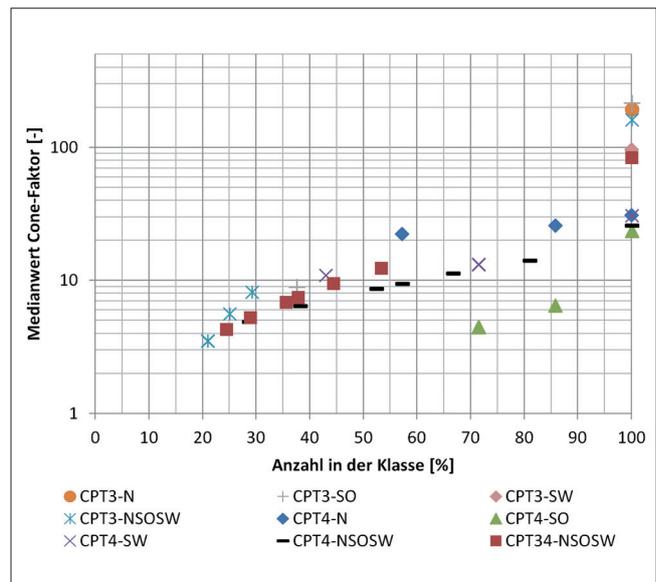


Bild 9: Entwicklung des Medianwertes des Cone-Faktors in Abhängigkeit der Bereichsgröße des Cone-Faktors (Faktorenanzahl); alle Werte und Orte
 Figure 9: Median of the cone factor depending on the chosen cone factor intervals (number of factors); all values and locations

4.2 Zuordnung ohne Tiefenbezug *Depth-independent approach*

In diesem Abschnitt werden die Cone-Faktoren über die Parameter der Log-Normalverteilungen (z. B. den Medianwert des Netto-Spitzenwiderstandes und der undrainierten Scherfestigkeit) bestimmt. Für die undrainierte Scherfestigkeit der Laborversuche werden die Werte nach Tabelle 3 verwendet. Da in den verkippten Böden mit größeren Sandeinschlüssen (bzw. grobkörnigerem Material) zu rechnen ist oder auch einige Bereiche komplett aus Sand bestehen (vgl. vorheriger Abschnitt), wurden die Einzelwerte der Netto-Spitzenwiderstände immer im Zusammenhang mit einer Bodentyp-Zuordnung (vgl. Abschnitt 2.1) gewählt. D. h. dass jeder verfügbare Datenpunkt innerhalb des zu untersuchenden Bereiches der Sondierung in Bezug auf den Bodentyp ausgewertet wurde. Die Auswertung erfolgte dabei für die drei in Abschnitt 2.1 vorgestellten Verfahren. Schlussendlich wurden nur Punkte (Netto-Spitzenwiderstände), deren Bodentyp als feinkörnig bestimmt wurde, verwendet. Die Bodentypen wurden zudem mit einem Glättungsalgorithmus über größere Abschnitte vergleichmäßig, welche nachfolgend als Schichten bezeichnet werden.

Bild 10 zeigt den Netto-Spitzenwiderstand aller CPTs unter der Verwendung der Bodentyp-Zuordnung DIN 4094. Es wurden alle Punkte, welche in den Berei-

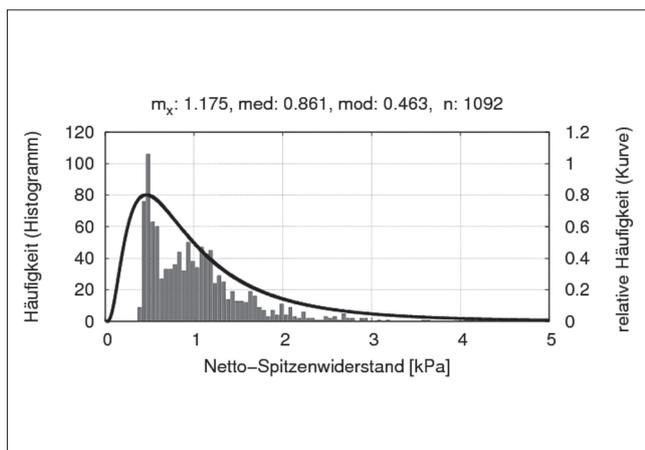


Bild 10: Log-Normalverteilung für den Netto-Spitzenwiderstand (Ort: O34, Originaldaten, DIN 4094 [1+2+3])

Figure 10: Log-normal distribution of net cone resistance (location: O34, DIN 4094 [1+2+3])

chen 1 bis 3 (alles Feinkorn) liegen, verwendet. Es zeigt sich, dass eine Log-Normalverteilung zutreffend ist.

4.2.1 Einfluss der Lage der CPTs *Influence of the location of the CPTs*

Analog zum Abschnitt 4.1 sollen zunächst die zwei Orte bzw. die sechs durchgeführten Drucksondierungen betrachtet werden. Das Bild 11 stellt die Medianwerte der Cone-Faktoren über die einzelnen Auswertungen dar. Die vier Kurven stellen jeweils eine Bodentyp-Zuordnung dar. Weiteres zu den Bodentypen kann dem Abschnitt 4.2.2 entnommen werden. Wird nur der Verlauf einer Kurve betrachtet, so ergeben sich für die Einzelsondierungen (CPT3-N bis CPT4-SW) aller Bodentyp-Zuordnungen große Schwankungen; dies deutet daraufhin, dass die Bodentypen während der Sondierungen (obwohl der Abstand nur wenige Meter beträgt) stark variieren. Bei einigen Auswertungen lassen sich innerhalb eines Ortes starke Schwankungen feststellen, welche nur von den Netto-Spitzenwiderständen hervorgerufen werden, da die undrainierten Scherfestigkeiten für einen Ort konstant sind. Werden die je drei Drucksondierungen an den beiden Orten (CPT3-NSOSW und CPT4-NSOSW) oder alle Ergebnisse zusammengefasst (CPT34-NSOSW), so gleichen sich die Werte an, da einzelne Ausreißer an Bedeutung verlieren (siehe rote und blaue Kurve).

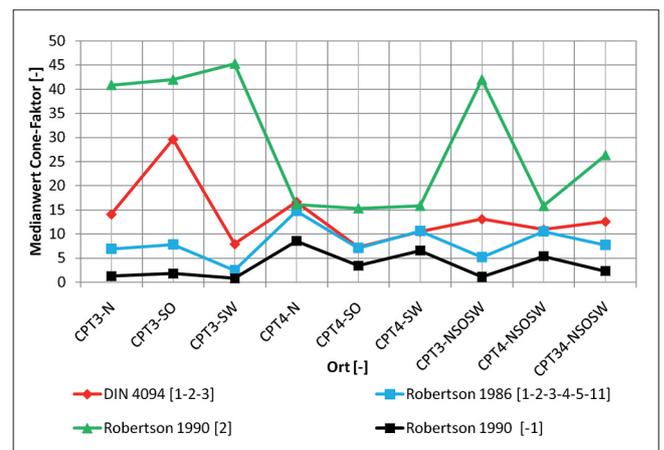


Bild 11: Medianwertes des Cone-Faktors für alle Orte und zusammengefassten Orte (Originaldaten: 0,02 m)

Figure 11: Median of the cone factors for all locations and summarized locations (original data: 0.02 m)

4.2.2 Einfluss der Methode für die Auswertung des Bodentyps *Influence of the approach for the determination of soil type*

Im Bild 11 wird deutlich, dass für alle drei Bodentyp-Zuordnungen unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden. Wird die DIN 4094 mit der Robertson 1986 Auswertung verglichen, so zeigen sich bis auf den Ort O3 geringe Unterschiede, was aufgrund des ähnlichen Aufbaus der Auswertungen (siehe Auswertungsdiagramme) nicht sehr überraschend ist. Die Unterscheide am Ort O3 kommen von einigen Punkten, welche in der DIN-Auswertung nicht erfasst werden, da sie unterhalb der zuordenbaren Bereiche [0] liegen (breiige bis flüssige Böden). Diese Punkte sind im Bild 1 gut zu erkennen. Die fehlenden niedrigen Netto-Spitzenwiderstände erhöhen somit auch den Cone-Faktor. Am Ort O4 kommen diese niedrigen Konsistenzen nicht vor und es sind beide Auswertungen nahezu gleich.

Ein Vergleich der DIN bzw. 1986er Auswertung und der 1990er Auswertung zeigt ein ähnliches Bild. Auch hier liegen die drei Kurven am Ort O4 wieder näher als am Ort O3 zusammen. Die Gründe hierfür sind die Normierung des Spitzendruckes mit der Vertikalspannung (vgl. Formel 2) und die Tatsache, dass das Diagramm erst normierte Spitzenwiderstände von größer als 1,0 erfasst. Somit fallen alle niedrigen Netto-Spitzenwiderstände, welche kleiner als die Vertikalspannung sind, heraus. Dies bedeutet beispielhaft für eine Tiefe von 25 m und eine Wichte von 20 kN/m^3 , dass der Netto-Spitzenwiderstand größer als 500 kPa und somit der Spitzendruck über 1 MPa liegen muss, damit dieser Punkt im Diagramm dargestellt wird. Die schwarze Kurve in Bild 11 fast alle außerhalb des Diagramms [-1] liegenden niedrigen Netto-Spitzenwiderstände zusammen. Im Diagramm ist nicht zu sehen, dass 145 Punkte (Netto-Spitzenwiderstände für die Originaldaten 0,02 m) im Bereich des Bodentypes 2 und 749 Punkte außerhalb des Diagrammes [-1] für den Ort O3 (CPT3-NSOSW) liegen. Im Vergleich dazu sind am Ort O4 (CPT4-NSOSW) 44 Punkte außerhalb des Diagrammes [-1] und 293 sind dem Bodentyp 2 zugeordnet. Demzufolge muss der Medianwert des Cone-Faktors aufgrund eines höheren Netto-Spitzenwiderstandes, vor allem in weichen Böden, wie im oberen Bereich des Ortes O3 vorliegend, deutlich steigen.

Des Weiteren kommt hinzu, dass die Böden noch nicht auskonsolidiert sind und so die effektive Vertikalspannung, welche hier für die Berechnung mit der totalen gleich gesetzt wurde, zu hoch angesetzt wurde. Dies wiederum hat zur Folge, dass der normierte Spitzenwiderstand (nach Formel 2) hier zu niedrig ist und somit für die Auswertung einem im Diagramm zu weit unten liegenden Bereich eines Bodentyps zugeordnet werden kann, sodass die Bodentypen als zu feinkörnig bestimmt werden. Als endgültige Veränderung sind dann der Netto-Spitzenwiderstand für die Bodentypen und auch der Medianwert der Cone-Faktoren zu hoch. Daher wurde für die Robertson 1990 Auswertung auch keine Kombination aus mehreren Bodentypen verwendet, da schon der Medianwert des Cone-Faktors des Bodentyps 3 (Ton bis schluffiger Ton) erheblich höhere Werte ergibt (85,3 für Originaldaten 0,02 m und alle Ergebnisse CPT34-NSOSW).

4.2.3 Einfluss der Datenglättung *Influence of the smoothing of the data*

Es werden zunächst die Originaldaten, welche ca. alle 2 cm aufgenommen wurden (der genaue vertikale Abstand ist geringer, da die Sonden eine Neigung haben) untersucht. Dies bedeutet, dass der Schwerpunkt (Mitte der Reibungshülse) der gemessenen Mantelreibung ca. 12,6 cm (bei einer hier verwendeten 15 cm^2 Sonde) oberhalb der Konusspitze liegt. Die Daten der Spitzenwiderstände und die Mantelreibung werden aber zum selben Zeitpunkt aufgezeichnet; dies bedeutet, dass beide Größen in unterschiedlichen Tiefen gemessen werden. Dadurch und durch die Länge der Reibungshülse von 16,4 cm werden die Daten bereits vorher schon etwas verschmiert, sodass dünne Bereiche im Zentimeter Bereich nicht mehr messbar sind. Zudem zeigt auch der Spitzenwiderstand bereits deutlich oberhalb des Eindringens in einen neuen Bereich mit veränderten Eigenschaften, eine Veränderung (Teh et al., 2006).

Daher lag es nahe, die Daten einer weiteren Glättung zu unterziehen. Wobei nicht die Spitzenwiderstände oder Mantelreibungen direkt geglättet wurden, sondern die Glättung über die Bodentypen erfolgte; die originalen Messdaten bleiben daher unberührt. Dabei wird eine Distanz vorgegeben, welche nachfolgend als Schichthöhe bezeichnet wird. Als Schichthöhen wurden dabei 0,04 m, 0,1 m, 0,25 m, 0,5 m und 1,0 m

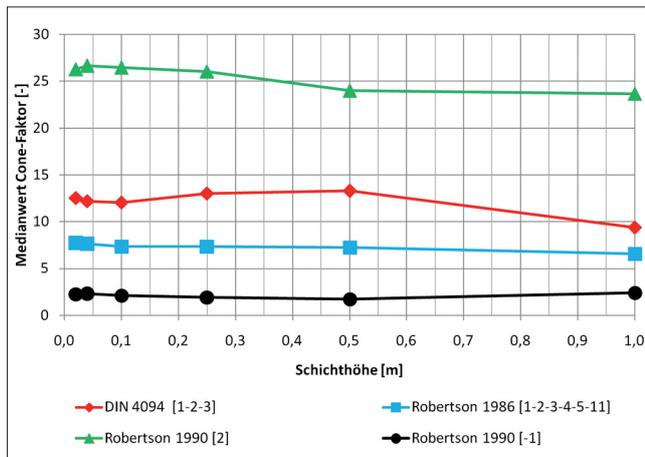


Bild 12: Medianwerte des Cone-Faktors für verschiedene Schichthöhen (Glättungen) für O34

Figure 12: Median of the cone factors for different smoothing at location O34

gewählt. Der Algorithmus beginnt mit dem ersten zu bestimmenden Bodentyp (ca. 0,1 m unter Geländeoberkante). Ausgehend von diesem wird der nächste größere als die Schichthöhe liegende Abschnitt mit gleich bleibenden Bodentypen gesucht und dann eine neue Schicht begonnen. Dieser vergleichsweise einfache Algorithmus erlaubte bei einer Vielzahl von Drucksondierungsinterpretationen sehr gute Ergebnisse. Die hier als Schichthöhe bezeichnete Distanz ist, genau genommen, die minimale Mächtigkeit einer Schicht gleichen Bodentyps.

In Bild 12 wird der Einfluss der Schichthöhe für alle Daten (O34, CPT34-NSOSW) auf den Medianwert des Cone-Faktors dargestellt. Der Cone-Faktor wird im Vergleich zur Auswahl des Auswerteverfahrens des Bodentyps weniger von der Glättung beeinflusst. Die zusammengefassten Daten (Bild 12) zeigen mit einer maximalen Cone-Faktor-Differenz von 4,1 (0,5 m: 13,3 und 1,0 m: 9,2) bei der DIN-Auswertung (rote Kurve) ein Ergebnis mit geringen Streuungen.

Die größten Streuungen sind bei der Auswertung der CPT3-SO (Bild 13) zu verzeichnen. Hier schwanken vor allem die Median-Cone-Faktoren der DIN (rote Kurve) von 6,7 (1,0 m) bis 28,3 (Originaldaten, 0,02 m). Der Grund hierfür ist im Bild 1 zu erkennen: Zum einen gibt es in diesem Bereich einige Abschnitte mit grobkörnigen Böden (welche nachfolgend nicht verwendet werden) und zum anderen liegen weiche Böden vor, welche größtenteils am Rand zum nicht zuordenbaren Bereich [0] liegen. Je nach Schichthöhe (Glättung) wer-

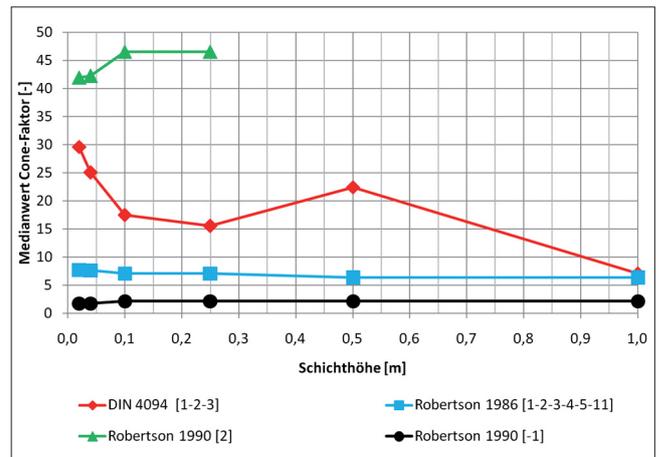


Bild 13: Medianwertes des Cone-Faktors für verschiedene Schichthöhen (Glättungen) für O3 (CPT3-SO)

Figure 13: Median of the cone factors for different smoothing at location O3 (CPT3-SO)

den nun einige außerhalb des Diagrammes liegende Punkte gerade noch oder gerade nicht berücksichtigt, sodass starke Streuungen entstehen.

Der Bodentyp 2 (Bild 13, grüne Kurve) bei der 1990er Auswertung zeigt sehr hohe Medianwerte und ab einer minimalen Schichthöhe von 0,5 m werden keine Daten mehr dem Bodentyp 2 zugeordnet.

Auffällig geringe Streuungen für alle Orte bzw. CPTs liegen für diesen Bereich des nassen Feinkorns immer bei der 1986er Auswertung vor.

5 Zusammenfassung Conclusions

In diesem Artikel wurden zwei Auswertungsmethoden zur Validierung des Cone-Faktors vorgestellt. Dieser kann für die Bestimmung der undrainierten Scherfestigkeit aus Drucksondierungen verwendet werden. Durchgeführt wurde die Validierung an zwei Bohrungen (ungestörte Proben für UU-Triaxialversuche) mit je drei nahe gelegenen Drucksondierungen für einen Tiefenabschnitt mit breiigen bis weichen und leicht bis mittelplastischen Tonen. Der Boden lag nicht auskonsolidiert und aufgrund des Verkippungsprozesses im Tagebau inhomogen (Ton-Schluff-Gemisch mit Sandeinlagerungen) vor.

In der ersten Auswertungsmethode erfolgte eine Zuordnung der Laborergebnisse (UU-Triaxialversuche)

und der Netto-Spitzenwiderstände je nach Tiefenlage. Für die Auswertung ist eine Aussortierung der Daten notwendig, um unrealistische (z. B. negative Cone-Faktoren) zu entfernen. Jedoch konnte kein geeigneter Klassenbereich identifiziert werden, welcher als „richtiger“ Cone-Faktorenbereich festgelegt werden konnte. So ergaben sich letztendlich die Cone-Faktoren von 4 bis 12 (je nach Klassenwahl).

Für die zweite Auswertungsmethode wurden alle verfügbaren Daten (undrainierten Scherfestigkeiten aus den Laborversuchen und Netto-Spitzenwiderstände von den CPTs) statistisch mit Log-Normalverteilungen ausgewertet. Die Tiefenlage der einzelnen Punkte ist daher nicht berücksichtigt worden. Zudem wurden nur Netto-Spitzenwiderstände verwendet, wenn für diese Punkte auch ein feinkörniger Bodentyp bestimmt wurde. Für die Bestimmung der Bodentypen wurden drei Auswertungen verwendet: DIN 4094-1 2006, Robertson et al. (1986) und Robertson (1990). Zudem wurde der Einfluss eines Glättungsalgorithmus untersucht. Es erfolgte eine Betrachtung der Einzelsondierungen bzw. wurden Sondierungen ortsweise oder alle zusammen betrachtet.

Als Ergebnis dieser Betrachtung kann festgestellt werden (die Ergebnisse beziehen sich auf die hier vorgestellten Untersuchungen und haben daher nicht in allen Fällen Allgemeingültigkeit!):

- Die Robertson-1990-Auswertung ist für weiche Böden ungeeignet und eignet sich daher nicht für den vorliegenden weichen Kippenboden.
- Gleiches gilt für die DIN-4094-Auswertung, auch sie ist für weiche Böden ungeeignet.
- Die besten Ergebnisse zeigte die Auswertung von Robertson 1986.
- Für eine robuste Auswertung (Robertson 1986) hat die verwendete Datenglättung einen sehr geringen Einfluss. Sie bringt aber die Sicherheit, Sandlagen aus dem Verfahren auszuschließen.
- Für die Robertson-1986-Auswertung ergab sich für die drei Sondierungen des Ortes O3 (überwiegend leicht plastische Tone, niedriger Labor- c_u -Medianwert: 17 kPa) zudem ein niedrigerer Median-Cone-Faktor von 5 als für die Sondierungen des Ortes O4 (überwiegend mittelpastische Tone, mittlerer Labor- c_u -Medianwert: 50 kPa) mit 10. Dies wiederum deckt sich mit früheren Untersuchungen (Aas et al., 1986),

in der an Tonen aus der Nordsee und Norwegen festgestellt wurde, dass mit zunehmender Plastizitätszahl der Cone-Faktor ansteigt.

Bei (inhomogenen) Kippenböden sollte die Validierung von empirischen Faktoren aus einem Vergleich von Laborergebnissen und einer Drucksondiergröße nicht über eine Auswertung mit Tiefenbezug erfolgen, da sich die Böden innerhalb kurzer Distanzen deutlich verändern können. Es empfiehlt sich daher aufwendigere statistische Auswertungen über gesamte Bereiche durchzuführen und dann aus den Verteilungen die für die Auswertung des empirischen Faktors notwendigen Größen zu bestimmen.

Letztendlich kann festgestellt werden, dass trotz schwieriger Bedingungen (Inhomogenität und nicht gewachsener Boden) die Drucksondierungen zur Abschätzung der undrainierten Scherfestigkeit ein geeignetes Mittel zur Erkundung sind, da die Daten wiederholbar und zuverlässig sind. Zudem ergeben die Drucksondierungen ein kontinuierliches Bild, was bei vielen anderen Untersuchungsmethoden, so z. B. bei der Flügelsonde, bei Pressiometer- oder Laborversuchen (UU-Triaxialversuchen) nicht der Fall ist.

In weiteren Untersuchungen werden aktuell die Bodentypen aus den CPTs mit den Bodenansprachen der Bohrkern verglichen, um das hier als tiefenunabhängige bezeichnete Verfahren mit verbesserter Genauigkeit einsetzen zu können. Zudem wird an semi-empirischen Verfahren gearbeitet (Uhlig und Herle, 2015), mit den zukünftig verbesserte Auswertungen der Porenzahl und daraus ableitbar die undrainierte Scherfestigkeit, möglich sind.

6 Danksagung *Acknowledgements*

Die Autoren möchten sich bei der RWE Power AG für die Zusammenarbeit und für die Erlaubnis zur Veröffentlichung der Daten bedanken. Ein besonderer Dank gilt dabei Herrn Dr. Karcher für die vielen fruchtbaren Diskussionen.

7 Literatur *References*

Aas, G.; Lacasse, S.; Lunne, T.; Madshus, C. (1986): Use of in situ tests for foundation design on clay. Proceedings of the „In Situ ‘86“, ASCE Specialty Conference, Blacksburg, S. 1-30.

DIN EN ISO 22476-1 (2013): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Felduntersuchungen – Drucksondierungen mit elektrischen Messwertaufnehmern und Messeinrichtungen für den Porenwasserdruck, Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 4094-1; (2002): Felduntersuchungen – Drucksondierungen, Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 18137-2 (2011): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Scherfestigkeit – Triaxialversuch, Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 18196 (2011): Erd- und Grundbau – Bodenklassifikationen für bautechnische Zwecke, Deutsches Institut für Normung e.V.

Herle, I.; Mašín, D.; Kostkanová, V.; Dahmen, D.; Karcher, C. (2010): Experimentelle Untersuchung und theoretische Betrachtung von weichen Kippenmischböden. 31. Baugrundtagung, S. 65-70.

Kammer Mortensen, J.; Hansen, G.; Sørensen, B. (1991): Correlation of CPT and Field Vane Tests for Clay Tills. Danish Geotechnical Society.

Knight, P. C.; Muir Wood, A. (2015): Scientific selection of cone penetration test N_k correlation factors. Proceedings of the XVI ECSMGE, S. 3681-3686.

Larsen, M.; Hvilsom, E.; Krogsbøll, A. (2015): A parameter study of CPTs in Palaeogene clay. Proceedings of the XVI ECSMGE, S. 3687-3692.

Lunne, T.; Robertson, P.K.; Powell, J.J.M. (1997): Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Taylor & Francis Verlag, New York.

Robertson, P.K.; Campanella, R. G.; Gillespie, D.; Greig, J. (1986): Use of Piezometer Cone Data. Proceedings of the „In Situ ‘86“, ASCE Specialty Conference, Blacksburg., S. 1263-1280.

Robertson, P.K. (1990): Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, Nr. 27, S. 151-158.

Teh, K.L.; Leung, C.F.; Chow, Y.K. (2006): Characterization of layered soil using miniature piezocone. Proceedings of the 6th ICPMG, S. 151-158.

Uhlig, M.; Herle, I. (2015): Bestimmung der Porenzahl aus Drucksondierungen, Tagungsband zur 2. Deutschen Bodenmechanik Tagung, S. 85 – 100.