

Experimentelle Untersuchung und theoretische Betrachtung von weichen Kippenmischböden

Prof. Dr.-Ing. habil. I. Herle, Technische Universität Dresden
RNDr. D. Mašín, PhD MPhil, Karls-Universität-Prag
Mgr. V. Kostkanová, Akad. Wiss. Tschech. Rep. / Technische Universität Dresden
Dr.-Ing. D. Dahmen, RWE Power AG
Dr.-Ing. Ch. Karcher, RWE Power AG

Die in den Tagebauen der RWE Power AG zu verkippenden Böden entstehen bei der Gewinnung mit Schaufelradbaggern. Während des Transports auf kilometerlangen Förderbändern wird der Boden weitgehend vermischt und dadurch – im geotechnischen Sinne – aufbereitet. Betrieblich werden die Böden in selektiv behandelte Materialien (z.B. Kies, Sand, Löß) und sogenannte Mischböden unterschieden; letztere werden in Abhängigkeit des Feinkornanteils in zwei Hauptgruppen unterteilt. Die Materialgruppe mit hohem Feinkornanteil wird entsprechend ihrer Konsistenz in zwei weitere Unterklassen gegliedert.

Die Unterbringung der Mischböden in Kippen erfolgt – soweit notwendig – in sog. Regelprofilen, deren Geometrie und Aufbau so dimensioniert sind, dass die Anfangs- und Endstandsicherheit gewährleistet ist. Für die Nachweisführung werden zuverlässige geotechnische Kennwerte benötigt, welche die Größe und Entwicklung der Scherfestigkeit dieser Mischböden repräsentieren. Entscheidend ist dabei die Anfangsstandsicherheit, da die Scherfestigkeit der Mischböden mit der Liegezeit i.d.R. zunimmt. Die aus Labor- und Feldversuchen ermittelte undrained Scherfestigkeit weist jedoch eine erhebliche Streuung auf, was die Festlegung maßgebender Werte erschwert.

Vorgestellt wird ein Konzept, das eine zuverlässige Bestimmung der undrained Scherfestigkeit von Mischböden der Tagebaukippen ermöglicht. Die Grundlage bildet das hypoplastische Stoffgesetz für feinkörnige Böden nach Mašín, welches den Einfluss des Bodenzustands (in diesem Fall der Konsistenz) auf die Scherfestigkeit berücksichtigt. Die begleitenden experimentellen Untersuchungen umfassen umfangreiche Feld- und Laborversuche, was eine statistische Auswertung der Ergebnisse möglich macht. Die statistische Verteilung der Eingangsgrößen wurde in die numerische Analyse unter Verwendung des Stoffgesetzes einbezogen.

1. Einleitung

Die im Tagebau zu verkippenden Mischböden entstehen bei der Gewinnung mit dem Schaufelradbagger. Eine Materialsteuerung ist dabei im Rahmen der selektiven Gewinnung des anstehenden Lockergebirges möglich. In den Tagebauen der RWE Power AG werden neben den gezielt gewonnenen und verkippten Materialien, wie z.B. Kies, Sand

oder Löß, folgende Mischböden unterschieden: M1 – Mischboden mit bis zu 30% bindigen Anteilen, M2 – Mischboden mit mehr als 30% bindigen Anteilen. Abstufungen der Materialklassen M2 hinsichtlich ihrer Konsistenz erfolgen als M2n (n...nass bzw. nicht aufbaufähig) und M2t (t...trocken bzw. aufbaufähig). Die Verkippung der M2-Materialien erfolgt innerhalb von gestuft aufgebauten Kippenbereichen in sogenannten Regelprofilen

(Pierschke, 1995), siehe Bild 1. Für eine realitätsnahe und gebirgsmechanisch begründete Bewertung der Scherfestigkeit von Kippenböden und der Standsicherheit von Regelprofilen ist es für den Tagebaubetrieb von außerordentlicher Bedeutung, die genannten Bodenarten und die beeinflussenden bodenmechanischen Eigenschaften möglichst zutreffend berücksichtigen zu können.

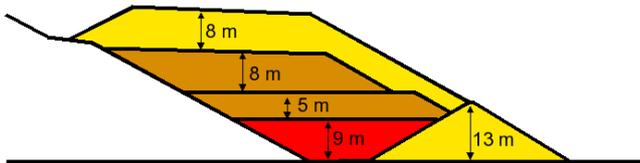


Bild 1. Beispiel eines Regelprofils.

Boden ist kein Medium mit konstanten mechanischen Eigenschaften. Vielmehr sind diese innerhalb gewisser Grenzen (Zustandsgrenzen) veränderlich. Neben einer Einteilung hinsichtlich seiner Grundzusammensetzung in eine bindige oder nichtbindige Materialklasse muss deshalb eine Bewertung seines Zustandes erfolgen. In der geotechnischen Praxis erfolgt die Bodenklassifizierung meist nach DIN 18196. Böden werden z. B. für den Straßenbau oder für Deponieabdichtungen künstlich so aufgearbeitet, dass sie den Erfordernissen entsprechen. Dazu werden vorab an Proben Laborversuche durchgeführt, entsprechende Bauregeln für den Boden abgeleitet und das schließlich hergestellte Bauwerk beprobt. Für die Kippen der RWE Power AG schließt sich eine kontinuierliche künstliche Änderung der Kippenböden aus, da dies tagebautechnisch nicht möglich ist.

Mit der Theorie der kritischen Zustände (Schofield & Wroth, 1968) wurde ein Konzept entwickelt, das die Scherfestigkeit des Bodens nicht anhand konstanter Materialparameter φ und c , sondern als eine zustandsabhängige Größe definiert. Die entscheidenden Einflussfaktoren sind dabei Spannungszustand und Dichte, welche bei wassergesättigten Böden auch als Wassergehalt ausgedrückt werden kann. Je nach den Randbedingungen (dräniert oder undräniert) ergeben sich unterschiedliche Scherwiderstände, die aus den Zustandsgrößen und anhand einiger, klar definierter Materialparameter berechnet werden können. Die Liegezeit wirkt sich auf die Entwicklung der Scherfestigkeits-

kennwerte und damit auf die Standsicherheit ebenfalls aus.

In früheren Studien wurde der Zusammenhang zwischen Zusammendrückbarkeit und Scherfestigkeit untersucht, was zu verschiedenen sinnvollen Korrelationen mit den Klassifikationseigenschaften führte. Für grobkörnige Böden wurde anhand des hypoplastischen Stoffmodells demonstriert (Herle, 1997), dass die Modellparameter aus den granulometrischen Eigenschaften abgeschätzt bzw. mit einfachen Laborversuchen ermittelt werden können. Für feinkörnige Böden ist dieselbe Vorgehensweise ebenfalls möglich und sinnvoll.

In der klassischen Geotechnik werden für die Charakterisierung bindiger Böden zwei wichtige Kenngrößen verwendet. Der Plastizitätsindex I_P beschreibt die Sensibilität des Bodens gegenüber Änderungen des Wassergehaltes und die Konsistenzzahl I_c die momentane Zustandsform (flüssig bis fest). Weiterhin kann sich der Sättigungsgrad S_r des Kippenbodens nicht nur während des Transports, sondern auch nach dem Verkippen ändern. Der Wassergehalt und dessen zeitliche Änderung (Konsolidation und Sättigung) spielen also eine wichtige Rolle bei der Beurteilung der Standsicherheit der Kippe.

Die undränierte Scherfestigkeit c_u ist vor allem als Funktion der Porenzahl und der Spannung zu betrachten. Da die Porenzahl in situ nur sehr aufwändig messbar ist, kann auch vom Wassergehalt und dem Sättigungsgrad S_r ausgegangen werden, wobei für $S_r = 1$ die undränierte Scherfestigkeit c_u mit der Abnahme des Wassergehalts exponentiell zunimmt. Aus der Theorie der kritischen Zustände folgt, dass die undränierte Scherfestigkeit ebenfalls von der Kompressibilität des aufbereiteten Bodens abhängt, da für c_u der Abstand vom kritischen Zustand von entscheidender Bedeutung ist.

2. Bodenmechanische Untersuchungen und Bestimmung der Stoffparameter

Die erhebliche Streuung der undränierten Scherfestigkeit in oberen Schichten einer Kippe ist im Bild 2 zu sehen. Die Laboruntersuchungen erfolgten an aus Bohrkernen ent-

nommenen ungestörten Proben der M2n-Materialklasse. Sie gaben Auskunft über den Materialzustand nach der Verkipfung, insbesondere über Dichte, Sättigung und undränierete Scherfestigkeit c_u (in UU-Versuchen bestimmt). Der Sättigungsgrad lag zwischen 0,75 und 1,0, wobei die meisten Proben der Materialklasse M2n fast vollständig gesättigt waren.

Die für in situ Verhältnisse übliche Abhängigkeit der c_u -Werte von der Tiefe ist im Bild 2 nicht zu beobachten, da der Kippenboden unter geostatischer Spannung noch nicht auskonsolidiert war. Die Ergebnisse der UU-Versuche am aus den Bohrkernen entnommenen Material weisen jedoch eine deutliche Zunahme der undräniereten Scherfestigkeit im Vergleich zum durch den Bandtransport im labortechnischen Sinne aufbereiteten Material vor der Verkipfung auf. Die konventionelle Mittelwertbildung zur Definition der repräsentativen Scherfestigkeit würde in diesem Fall zu großen Unsicherheiten führen, da sehr viele einzelne Messwerte darunter liegen. Um eine subjektive Wahl der Scherfestigkeit auszuschließen, wurde bei der RWE Power AG ein umfangreiches Untersuchungsprogramm angelegt, mit dem objektive und repräsentative Scherfestigkeiten für die Stand-sicherheitsberechnungen ermittelt werden sollten.

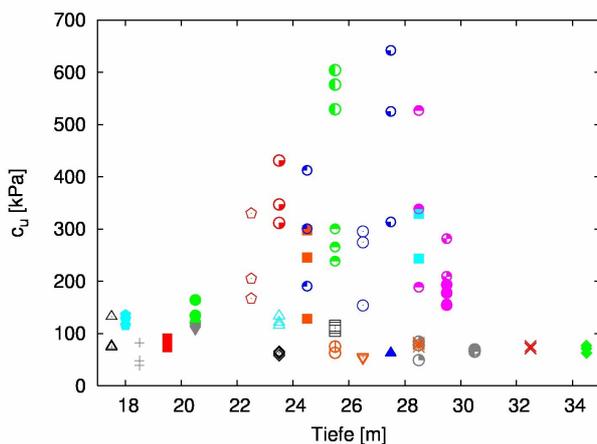


Bild 2. Undränierete Scherfestigkeit von ungestörten Proben der M2n-Materialklasse in Abhängigkeit von der Tiefe.

Die erste Bewertung von Materialeigenschaften erfolgte anhand von Daten aus einem aufwendig angelegten RWE Power-internen Untersuchungsprogramm zur direkten Ansprache der am Absetzer direkt vom Band

genommenen Proben. Es zeigte sich, dass die Trennung des Materials in die M2-Materialklassen allein anhand der Konsistenz erfolgt. Anschließende bodenmechanische Laboruntersuchungen an einem ausreichend großen Probensatz präzisieren die Klassifikationskennwerte (hauptsächlich Kornverteilung, Wassergehalt und Konsistenz) der M2-Materialklassen. Diese Kennwerte weisen für jede Materialklasse eine bestimmte Bandbreite auf, deren Verteilung sich mit statistischen Methoden beschreiben lässt. In erster Näherung kann man von einer Normalverteilung ausgehen, die durch den Mittelwert und die Standardabweichung definiert ist (Bild 3).

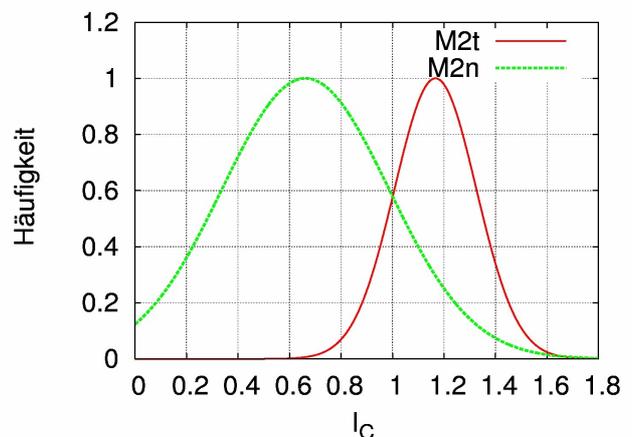


Bild 3. Normierte Häufigkeitsverteilung der Konsistenzzahl I_c in M2-Materialklassen.

Die Klassifikationsversuche ergaben weiterhin, dass die M2n-Materialklasse überwiegend aus einem Schluff-Sand-Mischboden besteht (Bild 4), während in der Materialklasse M2t hinsichtlich der Kornverteilung alle Bodentypen vertreten sind (Bild 5).

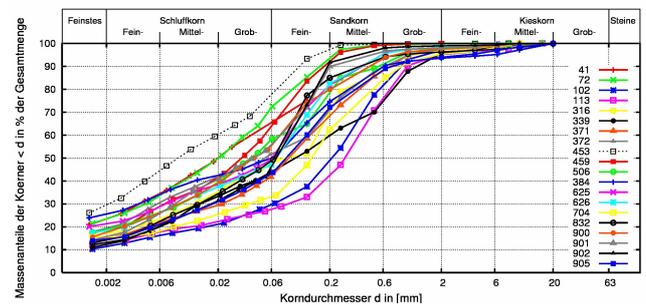


Bild 4. Kornverteilungslinien von Proben aus der M2n-Materialklasse.

Für die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften wurden sieben repräsentative

Absetzerproben aus dem breiten Spektrum der verschiedenen Kornverteilungen ausgewählt (vgl. Bild 11). Für diese Proben wurden anhand von Ödometer- (Bild 6) und Rahmen-scher- bzw. Triaxialversuchen (Bild 7) die hypoplastischen Parameter des Stoffgesetzes nach Mašin (2005) bestimmt. Die Eignung des Stoffgesetzes für das untersuchte Material wurde durch erfolgreiche Nachrechnung des Materialverhaltens in undrännierten Triaxialversuchen validiert (Bild 8).

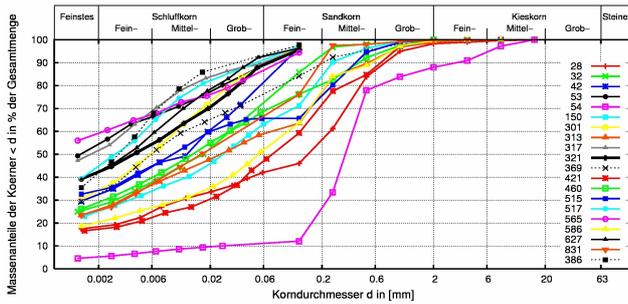


Bild 5. Kornverteilungslinien von Proben aus der M2t-Materialklasse.

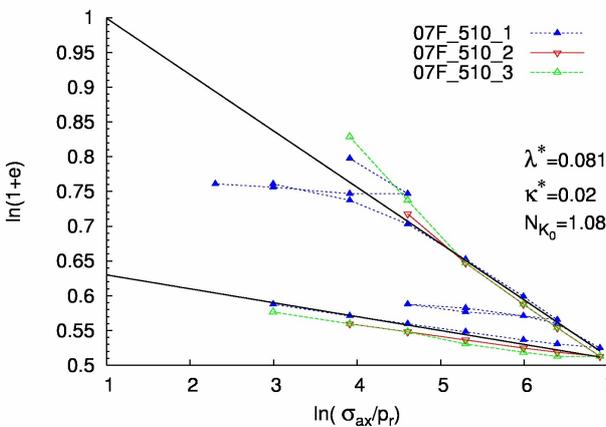


Bild 6. Ödometerversuche an aufbereiteten M2-Proben zur Bestimmung der hypoplastischen Stoffparameter ($p_r=1$ kPa ist Referenzspannung).

Die undrännierte Scherfestigkeit c_u feinkörniger Böden hängt ausgeprägt vom Wassergehalt und damit von der Konsistenz ab. Unter der später überprüften Annahme eines hohen Sättigungsgrades S_r während der Verkipfung kann für einen bestimmten Wassergehalt w die entsprechende undrännierte Scherfestigkeit aus dem hypoplastischen Stoffgesetz berechnet werden (c_u im normal-

konsolidierten Zustand ist eine Funktion allein der Porenzahl e und damit des Wassergehalts w). Die Abhängigkeit zwischen den für sechs repräsentative Proben berechneten c_u -Werten und der logarithmischen Konsistenz I_{clog} ist im Bild 9 (strichlierte Linien) dargestellt. Zum Vergleich sieht man die in den CU-Triaxialversuchen gemessenen c_u -Werte (Punkte). Durch die strichlierte (berechnete) Verläufe wurde eine Regressionsgerade gelegt (durchgezogene Linie). Diese ersetzt die berechneten Beziehungen vor allem im Bereich $I_{clog} < 1$. I_{clog} bezeichnet hier $(\log w_L - \log w) / (\log w_L - \log w_P)$. Für $I_{clog} > 1$ ist die Regressionsgerade weniger zutreffend, d.h. für halbfeste und feste Konsistenzen soll die undrännierte Scherfestigkeit ggf. möglichst aus dem Stoffgesetz direkt berechnet werden.

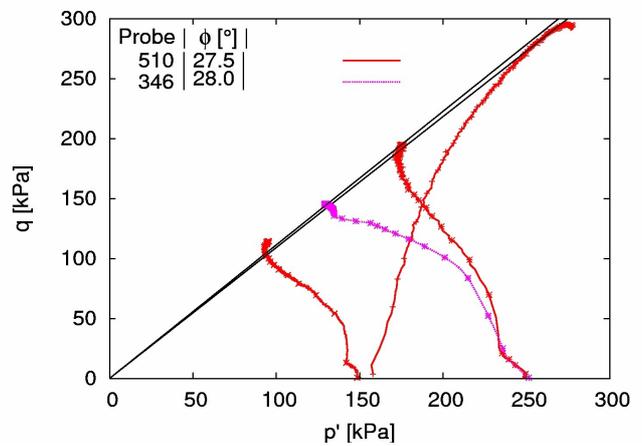


Bild 7. Spannungspfade zur Bestimmung des kritischen Reibungswinkels des aufbereiteten M2-Bodens aus CU-Triaxialversuchen.

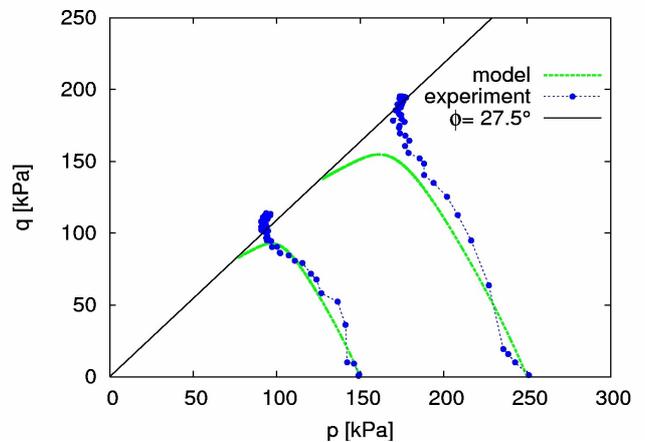


Bild 8. Validierung der Stoffparameter anhand Nachrechnung von CU-Triaxialversuchen.

Durch eine weitere Probenentnahme aus M2t-Bereichen der aufgebauten Regelprofile mittels Bohrungen konnte eine große Anzahl von ungestörten Bodenproben gewonnen und in UU-Triaxialversuchen zusätzlich untersucht werden. Die ausgewertete Abhängigkeit zwischen der undränierten Scherfestigkeit c_u und der Konsistenzzahl I_c wird durch die mit dem hypoplastischen Stoffgesetz vorher berechneten Verläufe hervorragend abgedeckt (Bild 10).

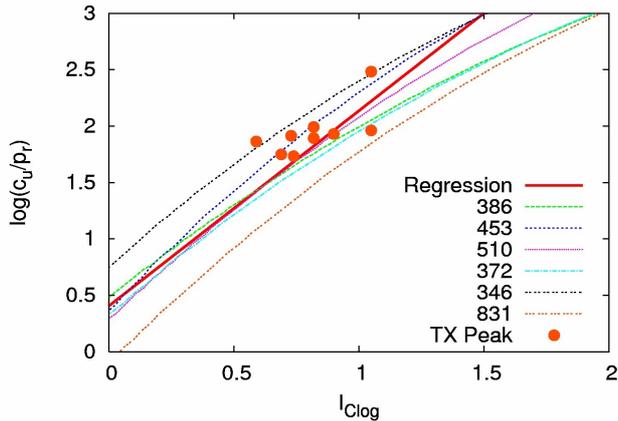


Bild 9. Berechnete Abhängigkeit zwischen c_u und I_{clog} im normalkonsolidierten Zustand ($p_r=1$ kPa ist Referenzspannung).

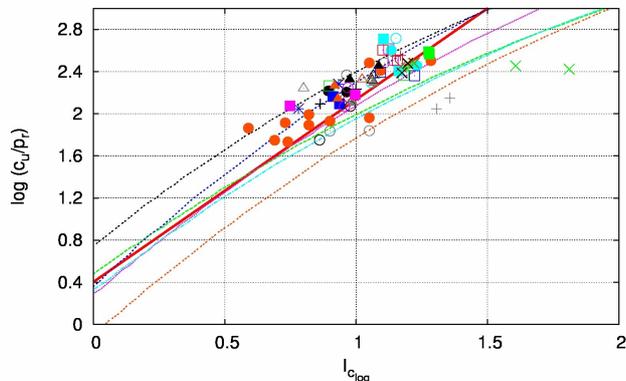


Bild 10. An ungestörten Proben bestimmte undränerte Scherfestigkeit der M2t-Materialklasse (Punkte) und Vergleich mit der hypoplastischen Prognose (Linien).

Die Kornverteilungen der sieben detailliert untersuchten Proben decken den Bereich sowohl der M2n- als auch der M2t-Materialklasse ab (Bild 11). Da die Regressionsgerade im Bild 9 mit dem berechneten Verlauf der Probe Nummer 510 gut übereinstimmt, wurden die hypoplastischen Stoffparameter dieser Probe als der repräsentative Parametersatz für die beiden M2-Materialklassen ange-

nommen. Letztlich werden die M2-Materialklassen prinzipiell aufgrund der Bodenkonsistenz unterschieden, während die hypoplastischen Stoffparameter zustandsunabhängig und vor allem durch die Granulometrie des Bodens beeinflusst sind.

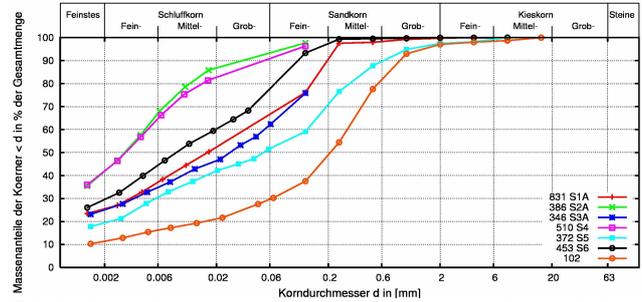


Bild 11. Kornverteilungskurven der sieben detailliert untersuchten Proben.

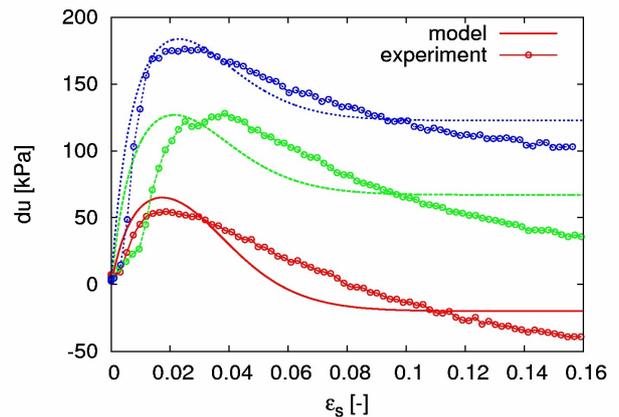
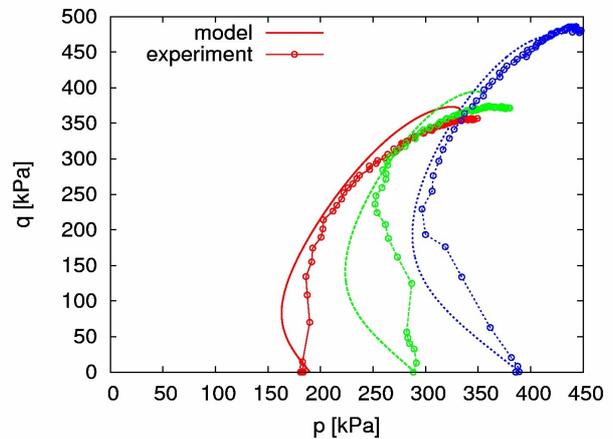


Bild 12. Nachrechnung der CU-Triaxialversuche für Proben der M2t-Materialklasse mit unabhängig bestimmten hypoplastischen Stoffparametern (Spannungspfade und Änderung des Porenwasserdrucks).

Die ausgewählten repräsentativen hypoplastischen Stoffparameter wurden anhand der

Nachrechnung mehrerer ungestörter Proben der M2t-Materialklasse überprüft. Wie dem Bild 12 zu entnehmen ist, wird das Materialverhalten in CU-Triaxialversuchen sehr gut wiedergegeben. Die Annahme eines einzigen Stoffparametersatzes für die beiden Materialklassen M2n und M2t wird damit bestätigt.

3. Repräsentative Scherfestigkeiten

Wie im Bild 3 gezeigt wurde, kann für die M2-Materialklassen von der Normalverteilung der Konsistenz ausgegangen werden. Diese für die Absetzerproben festgestellte Beschreibung trifft auch für die aus der Kippe mittels Bohrungen entnommenen Proben zu, wie im Bild 13 exemplarisch dargestellt ist.

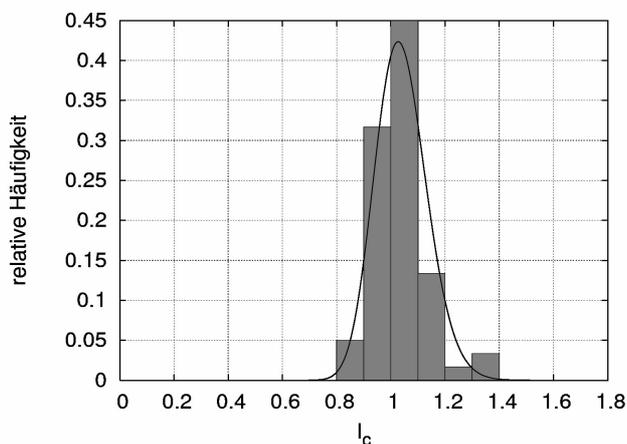


Bild 13. Häufigkeitsverteilung der Konsistenzzahlen von ungestörten Proben der M2t-Materialklasse.

Da die undränierete Scherfestigkeit des normalkonsolidierten Bodens eine Funktion des Wassergehalts (d.h. auch der Konsistenz) ist, sind die berechneten c_u -Werte ebenfalls statistisch verteilt. Aufgrund der Beziehung zwischen c_u und I_c ist die Häufigkeitsverteilung der undräniereten Scherfestigkeit jedoch logarithmisch. Bei Anwendung der im Bild 9 dargestellten Regressionsgerade und der Häufigkeitsverteilung von I_c kann für die M2n-Materialklasse die Häufigkeitsverteilung von c_u bestimmt werden, siehe Bild 14.

Für eine solche Log-Normalverteilung können mehrere besondere Werte definiert werden. Der *Erwartungswert* entspricht dem aus der Normalverteilung bekannten arithmetischen Mittelwert, d.h. alle Werte werden ad-

diert und dann durch die Gesamtzahl der Werte dividiert. Der *Medianwert* ist der mittlere Wert in einer Werteliste, wenn diese vom niedrigsten Wert zum höchsten Wert sortiert ist. Der *Modalwert* ist der Wert, der statistisch am häufigsten auftritt.

Betrachten wir nun ein hypothetisches Beispiel, in welchem die statistische Auswertung der undräniereten Scherfestigkeit von insgesamt 33 Proben aus UU-Versuchen durchgeführt wird. Die gemessenen c_u -Werte werden in 10-kPa-Intervalle aufgeteilt (von 5 bis 15 kPa, 15 bis 25 kPa usw.), siehe Tabelle 1. Die Häufigkeitsverteilung der Messwerte ist im Bild 15 dargestellt.

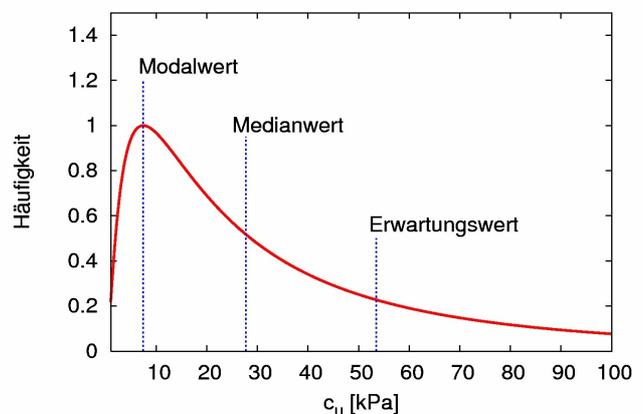


Bild 14. Berechnete Verteilung der undräniereten Scherfestigkeiten der M2n-Materialklasse.

c_u [kPa]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Anzahl	10	6	5	3	3	2	1	1	1	1

Tabelle 1. Beispiel von Messwerten einer Log-Normalverteilung.

Der am häufigsten gemessene Wert (Modalwert) beträgt 10 kPa und wurde bei insgesamt 10 Proben festgestellt. Hinsichtlich der Gesamtzahl von Proben und deren arithmetischen Mittelwerts (Erwartungswert) der Scherfestigkeit von 33 kPa wäre jedoch $c_u=10$ kPa als der repräsentative Wert stark konservativ. Etwa die Hälfte aller Proben weist $c_u>20$ kPa auf (Medianwert), womit die Festlegung eines repräsentativen Werts $c_u=20$ kPa viel sinnvoller erscheint.

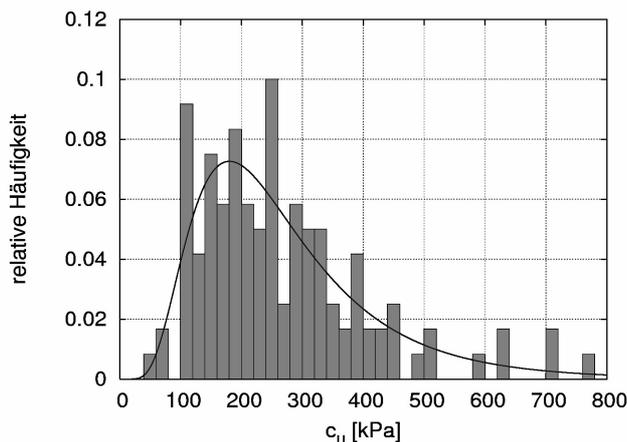


Bild 16. Häufigkeitsverteilung der gemessenen undrännierten Scherfestigkeiten der M2t-Klasse.

Auch für die I_c -Häufigkeitsverteilung der M2t-Klasse (siehe Bilder 3 und 13) kann die c_u -Verteilung mit Hilfe der Regressionsgerade (Bild 9) berechnet werden (Modalwert von 65 kPa, Medianwert von 154 kPa und Erwartungswert von 237 kPa). Ein Vergleich mit der durch Versuchsergebnisse approximierten Log-Normalverteilung (Bild 16) deutet auf konservative Ergebnisse der Berechnung hin. Es muss dabei jedoch beachtet werden, dass die Versuchsproben erst nach einer mehrwöchigen Liegezeit aus der Kippe gewonnen wurden.

Für eine deterministische Betrachtung der Scherfestigkeit wird der Medianwert als am besten geeignet betrachtet. Die Festlegung des Medianwerts als repräsentativer Wert in einer deterministischen Berechnung impliziert, dass der tatsächliche c_u -Wert mit der gleichen Wahrscheinlichkeit (50%) über bzw. unter diesem Wert liegt¹. Darüber hinaus umfassen potentielle Gleitflächen in einer Kippe i.d.R. ein großes Materialvolumen, was die Festlegung des repräsentativen Werts als Medianwert ebenfalls gerechtfertigt.

4. Zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit

Die undrännierte Scherfestigkeit eines frisch aufgeschütteten Materials bleibt nicht kon-

¹ Die hier dargestellte Philosophie der Festlegung eines repräsentativen Werts entspricht nicht der DIN 1054, deren Gültigkeitsbereich die Braunkohlentagebaue explizit ausschließt.

stant, sondern erhöht sich infolge Konsolidation mit der Zeit. Die Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung der Scherfestigkeit für den Fall von Tagebaukippen ist aufwendig, da die Konsolidation nicht unter einer konstanten Belastung stattfindet. Der Aufbau von Kippen entwickelt sich zeitlich und räumlich, was für eine genaue numerische Analyse äußerst komplexe Modelle voraussetzt.

Auch die Durchlässigkeit des Kippenmaterials spielt bei der Betrachtung des Konsolidationsverhaltens eine wichtige Rolle. Für die Bestimmung der Durchlässigkeit wurde daher nicht nur das Zeit-Setzungsverhalten von Laborproben in Ödometerversuchen herangezogen, sondern auch in situ Durchlässigkeitsversuche als Auffüllversuche durchgeführt. Die Laborversuche haben dabei eine starke Spannungsabhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwerts gezeigt.

Um die Auswirkung der Konsolidation auf die Scherfestigkeit zu beurteilen, wurde in einem vereinfachten 1D-Modell die zeitliche Zusammendrückung einiger Schichtpakete mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode simuliert, um die Veränderung der Porenzahl des Kippenmaterials mit der Zeit zu erhalten. Aus der berechneten Porenzahl ergibt sich – wie im vorherigen Abschnitt dargestellt – die undrännierte Scherfestigkeit. Da der Konsolidationsgrad in unterschiedlichen Tiefen variiert, muss eine räumliche Mittelwertbildung über eine bestimmte Schichtmächtigkeit durchgeführt werden.

Die prognostizierte zeitliche Änderung der undrännierten Scherfestigkeit ist im Bild 17 dargestellt. Es ist deutlich zu beobachten, dass die anfängliche Log-Normalverteilung mit der Zeit verloren geht. Die niedrigen c_u -Werte erhöhen sich schneller als die höheren, was die Häufigkeitsverteilung verändert.

Das Gesamtverhalten wurde anschließend in einem 2D-FE-Modell eines Regelprofils simuliert und mit den in situ gemessenen Verformungen (hydrostatische Linienvermessung) verglichen. Die Übereinstimmung zwischen den Berechnungen und Messungen war zufriedenstellend – damit hat sich das ermittelte Konsolidationsverhalten bestätigt.

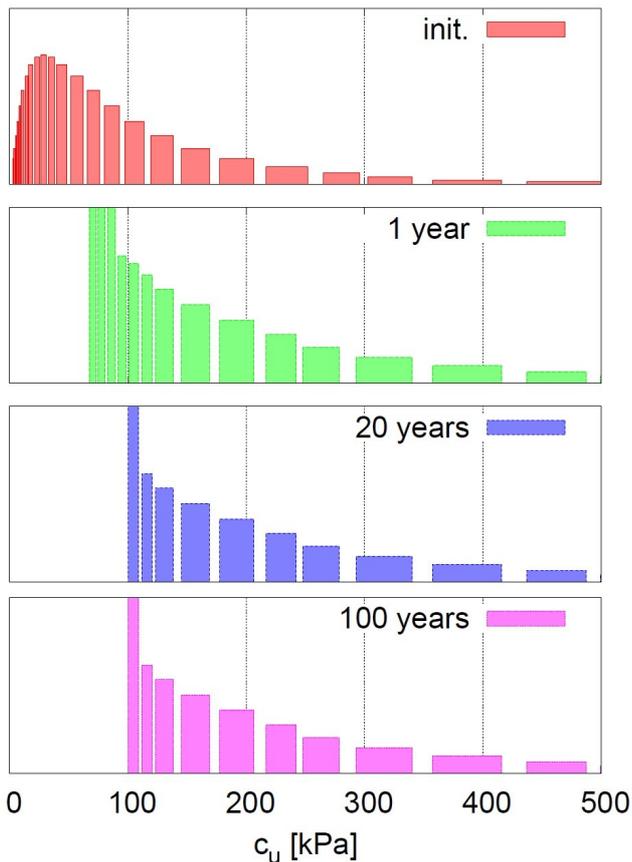


Bild 17. Zeitliche Änderung der statistischen Verteilung der undrained Scherfestigkeit der M2n-Materialklasse (qualitativ).

5. Schlussfolgerungen

Das hier vorgestellte Konzept der Bestimmung von undrained Scherfestigkeiten basiert auf grundlegenden bodenmechanischen Konzepten, die eine objektive Ermittlung von c_u ermöglichen. Die undrained Scherfestigkeit ist kein konstanter Bodenkennwert, sondern eine zeitlich veränderliche Variable, die sich aus dem momentanen Bodenzustand ergibt. Das hypoplastische Stoffgesetz wurde für diese Aufgabe anhand von Laborversuchen kalibriert und seine Prognosen durch Vergleich mit zahlreichen Ergebnissen von UU-Versuchen erfolgreich validiert.

Die Streuung der Materialeigenschaften führt unausweichlich zur Streuung der Scherfestigkeiten. Es wurde gezeigt, dass die c_u -Werte des frisch verkippten Bodens der M2-Materialklasse der Log-Normalverteilung entsprechen, die jedoch mit der Konsolidationszeit verändert wird. Als repräsentativer Wert

der Häufigkeitsverteilung wird der Medianwert vorgeschlagen, der insbesondere für großräumige Bereiche eines Regelprofils in der Kippe geeignet ist.

6. Danksagung

Die Autoren möchten sich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. N. Vogt und Herrn Dipl.-Ing. E. Birle für zahlreiche konstruktive Diskussionen bedanken.

7. Quellennachweis

1. Herle, I.: *Hypoplastizität und Granulometrie einfacher Korngerüste*. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe. Heft 142, 1997.
2. Mašín, D.: *A hypoplastic constitutive model for clays*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 39, 311-336, 2005.
3. Pierschke, K.-J.: *Standfestigkeit bei der Verkipfung von nicht aufbaufähigen Mischböden im rheinischen Braunkohlenrevier*. Braunkohle, Nr. 12, 5-12, 1995
4. Schofield, A.N. ; Wroth, C.P.: *Critical state soil mechanics*. McGraw-Hill, 1968.