

Vergleich von gemessenen und numerisch nachgerechneten Verformungen bei spannungspfadgesteuerten Triaxialversuchen

Comparison of Measured and Recalculated Deformations in Stress-Path Controlled Triaxial Tests

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

Beobachtungen und Messungen im Labor und in-situ zeigen, dass Bodenbewegungen trotz eines statischen Gleichgewichtes bei unveränderlichen äußeren Lasten auftreten. Zeitabhängige Verschiebungen können bspw. bei Böschungsaushüben beobachtet werden, wenn der eigentliche Aushubvorgang schon vor längerer Zeit abgeschlossen wurde. Diese Verformungen werden z.B. durch Konsolidationsprozesse, Kriechvorgänge, progressiven Bruch, Witterungseinflüsse oder induzierte zyklische Beanspruchung mit sehr kleinen Amplituden durch Bauarbeiten in anliegenden Bereichen verursacht. Auf diese Weise kann sich eine standsichere Böschung einem Versagenszustand nähern, ohne dass äußerliche Lasten explizit aufgebracht werden. Für die Beurteilung der Langzeitstandsicherheit einer Böschung ist es notwendig, zeitabhängige Verformungen in die Untersuchung mit einzubeziehen, was jedoch mit konventionellen Standsicherheitsberechnungen nicht möglich ist. Hierfür ist eine Studie von Verschiebungstendenzen für unterschiedliche Randbedingungen erforderlich.

Bei der numerischen Modellierung eines Böschungsaushubs in homogenem Boden konnten für verschiedene physikalische Mechanismen entsprechende Verschiebungsmuster identifiziert werden. Die Modellierung des Aushubs erfolgte mit drei unterschiedlichen Stoffmodellen. Da Abweichungen in den Verschiebungsbildern bezüglich der verwendeten Stoffmodelle beobachtbar sind, wurden mit Hilfe von lastgesteuerten Triaxialversuchen am Institut für Geotechnik (IGT) charakteristische Spannungspfade des Aushubs abgebildet. Für die gemessenen Verformungen erfolgte eine Gegenüberstellung mit Ergebnissen aus numerischen Elementversuchen.

Observations and measurements in the laboratory as well as in-situ reveal that soil deformations occur at static equilibrium even when there are no changes in the external loading state. Time-dependent behaviour can be seen in deep excavations, for example, where displacements of slopes are still observed long after the excavation process has come to an end. The displacements may arise due to consolidation processes, creep effects, progressive failure, weathering, induced vibrations in the ground caused by ongoing construction activities nearby or a combination of such events. Thus, a stable slope can reach a state approaching failure without any explicit application of external forces. For the assessment of long-term slope stability, the time-dependent deformations need to be considered which is, however, not feasible with conventional stability analysis. For this purpose a numerical study of deformation patterns with different boundary conditions is required.

Within the numerical analyses of an excavated homogeneous slope, varying displacement patterns were identified for various physical mechanisms. The numerical calculations were performed with three different constitutive models. Due to discrepancies within the displacement patterns regarding the constitutive models, load controlled triaxial tests were conducted at the Institute of Geotechnical Engineering (IGT) to determine characteristic stress paths for an excavation. The measured deformations were compared with the results of numerical element tests.

1 Einführung Introduction

Verschiedene physikalische Mechanismen, bspw. Konsolidationsprozesse, Kriechvorgänge, progressiver Bruch oder Witterungseinflüsse, rufen unterschiedliche Verschiebungsmuster hervor. Gleichfalls liefern verschiedene Stoffmodelle auf Grund ihres unterschiedlichen mathematischen Aufbaus voneinander abweichende Verschiebungstendenzen, wenn ein bestimmter physikalischer Mechanismus betrachtet wird.

Ein Böschungsaushub in homogenem Boden wurde für drainierte und gekoppelte Bedingungen mit jeweils drei verschiedenen Stoffmodellen nachgerechnet. Bei den verwendeten mathematischen Modellen handelt es sich um das elasto-plastische Modified-Cam-Clay Modell (Wood 1990), das hypoplastische Stoffmodell für Tone von Mašín (Mašín 2005) und das visko-hypoplastische Stoffmodell von Niemunis (Niemunis 2003).

Um die Berechnungsergebnisse der unterschiedlichen Stoffmodelle bezüglich des Verformungsverhaltens bei einem Aushub miteinander vergleichen zu können, wurden zuvor mehrere Elementversuche mit ödometrischen und triaxialen Randbedingungen durchgeführt. Ein Parametersatz für das visko-hypoplastische Stoffmodell wurde aus der Literatur (Meier 2009) entnommen. Die Materialparameter der beiden anderen Stoffmodelle wurden anhand dieses gewählten Parametersatzes kalibriert. Der Spannungs- und Dehnungsbereich für die Kalibrierung wurde entsprechend den voraussichtlichen Werten während des modellierten Aushubs gewählt.

Im Diagramm linker Hand in Bild 1 ist der Spannungs-Porenzahl-Verlauf für eine Be- und Entlastung unter ödometrischen Bedingungen zu sehen. Die beiden anderen Diagramme in Bild 1 zeigen den q - p' -Spannungspfad für eine axiale Entlastung bei konstantem Seitendruck unter drainierten Bedingungen sowie das dazugehörige Spannungs-Dehnungsverhalten. Die vertikale Ausgangsspannung ist für alle drei Stoffmodelle identisch. Auf Grund von unterschiedlichen K_0 -Werten, die aus den jeweiligen Stoffmodellen folgen, weicht der Ausgangsspannungszustand im q - p' -Diagramm ab. Eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen den Stoffmodellen ist für die gezeigten Elementversuche feststellbar. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass die betrachteten Stoffmodelle auch eine gute Übereinstimmung von Ergebnissen in Berechnungen von Randwertproblemen liefern.

2 Numerisch simulierter Böschungsaushub Numerical analysis of a simulated excavation

Der simulierte Aushub einer idealisierten Böschung wurde in feinkörnigem, homogenem Boden durchgeführt. Der Boden hat vor Beginn der Entlastung keine Vorbelastung erfahren. Die Aushubtiefe beträgt 20 m, wobei die entstehende Böschungslänge 50 m und deren Neigung somit 1:2,5 beträgt. Ein anstehender Grundwasserspiegel wurde nicht berücksichtigt. Der Aushub erfolgt lagenweise in zehn Aushubschritten, wobei verfahrenstechnische Vorgehensweisen keine Berücksichtigung fanden. Eine grafische Darstellung des Randwertproblems findet sich in Bild 2.

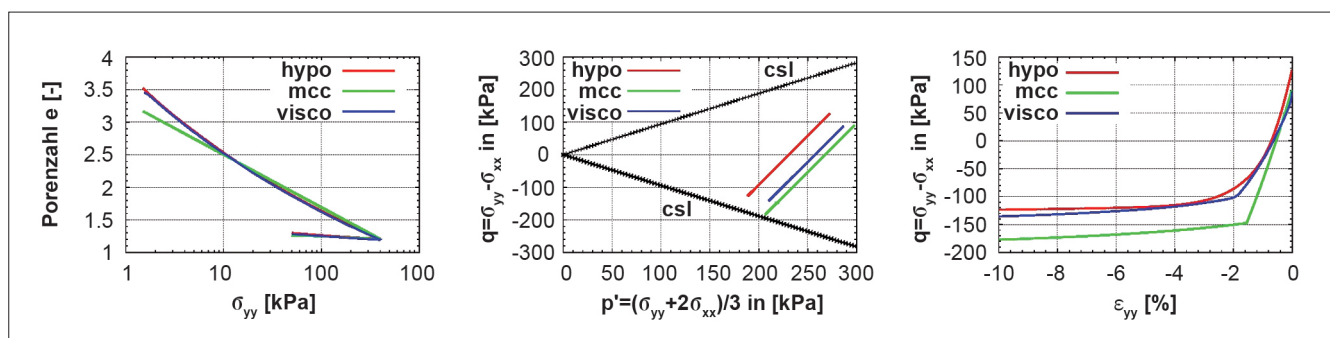


Bild 1: Elementversuche unter ödometrischen und triaxialen Randbedingungen zur Bestimmung der Materialkennwerte für das elasto-plastische und hypoplastische Stoffmodell

Figure 1: Element test with oedometric and triaxial boundary conditions for the determination of the material parameters for the elasto-plastic and hypoplastic constitutive models

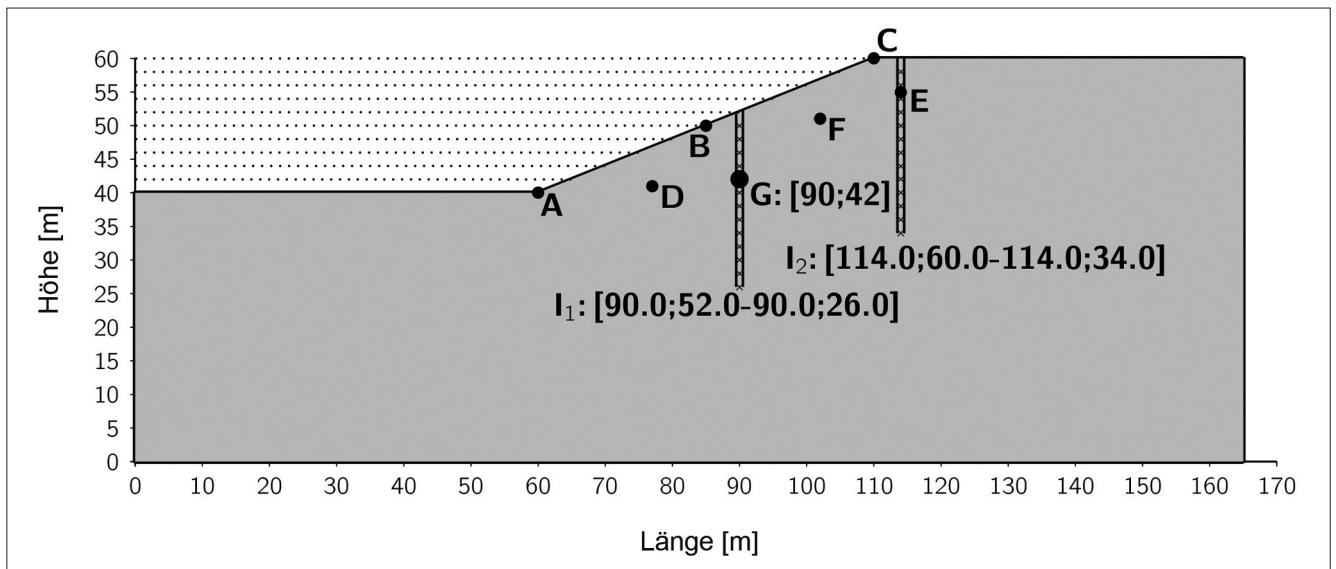


Bild 2: Berechnungsmodell der idealisierten Böschung mit den gekennzeichneten Beobachtungspunkten für die Auswertung von Spannungs- und Verformungsverhalten sowie den Schnitten I_1 und I_2 zur Aufzeichnung von horizontalen und vertikalen Verschiebungen

Figure 2: Calculation model for the idealized slope showing representative points for the evaluation of stress, strain and displacement paths. The two axes I_1 and I_2 within and behind the slope indicate measuring devices to detect horizontal and vertical displacements

Die markierten Punkte in und auf der Böschung in Bild 2 kennzeichnen Beobachtungspunkte, für welche Spannungs-, Dehnungs- und Verschiebungsentwicklungen während des simulierten Aushubs aufgezeichnet wurden. Die Schnitte I_1 und I_2 im Böschungsinnen und hinter der Böschung symbolisieren Messvorrichtungen zum Aufzeichnen von Horizontal- und Vertikalverschiebungen.

Die Auswertung von Verschiebungstendenzen erfolgte für drei verschiedene Berechnungsmodelle. Für das Erlangen eines besseren Verständnisses sind im ersten Berechnungsdurchlauf die Porenwasserdrücke weggelassen und eine gänzlich drainierte Böschung angenommen worden. Im darauffolgenden Schritt wurde die Entstehung von Porenwasserunterdrücken während der Entlastung einbezogen. Dafür wurde ein vollständig gesättigter Boden vorausgesetzt. Eine Drainagemöglichkeit wurde während und nach dem Aushub entlang der entstehenden Böschungsränder, der Geländeoberkante und der Baugrubensohle angeordnet. Anschließend konzentrierten sich die numerischen Berechnungen noch auf das zeitabhängige Verhalten, vordergründig den Kriechprozess.

Die Gesamtzeit für den Aushub lag bei 30 Tagen, sodass ein Aushubschritt drei Tage dauerte. Für das ratenunabhängige hypoplastische und das elasto-plastische Stoffmodell ist die Aushubzeit unbedeutend, vorausgesetzt

drainiertes Verhalten wird angenommen. Demnach entspricht ein Aushubschritt einem Berechnungsschritt. Unter Berücksichtigung der Generierung von Porenwasserdrücken wurde die Böschung nach Fertigstellung des Aushubs über einen weiteren Zeitraum von 1850 Tagen beobachtet, bis die Porenwasserunterdrücke im Modell gegen Null tendierten. Die Durchlässigkeit wurde entsprechend dem Bodentyp gewählt und als identisch in horizontaler als auch vertikaler Richtung festgesetzt. Die Untersuchung des zeitabhängigen Verhaltens wurde über einen Zeitraum von weiteren fünf Jahren nach Vollendung des Aushubs fortgesetzt.

Der Anfangszustand vor Beginn des Aushubs in Form von Vertikalspannungs- und Porenzahlverteilung wird für alle Stoffmodelle festgelegt und ist bei den einzelnen Berechnungsmodellen immer identisch. Da die vertikale Spannungsverteilung von der Wichte und Tiefe abhängig ist, ist sie für alle Stoffmodelle gleich. Jedoch unterscheidet sich das Verhältnis von horizontaler und vertikaler Spannung, da es über die jeweiligen Stoffgesetzgleichungen bestimmt wird. Dies hat einen Einfluss auf den Anfangsspannungszustand wie im q - p -Spannungspfaddiagramm in Bild 3 zu sehen. Somit wird auch die Anfangsporenzahlverteilung beeinflusst und unterscheidet sich geringfügig bei allen drei Stoffmodellen. Für alle Stoffmodelle gilt, dass der Boden im Anfangszustand normalkonsolidiert ist.

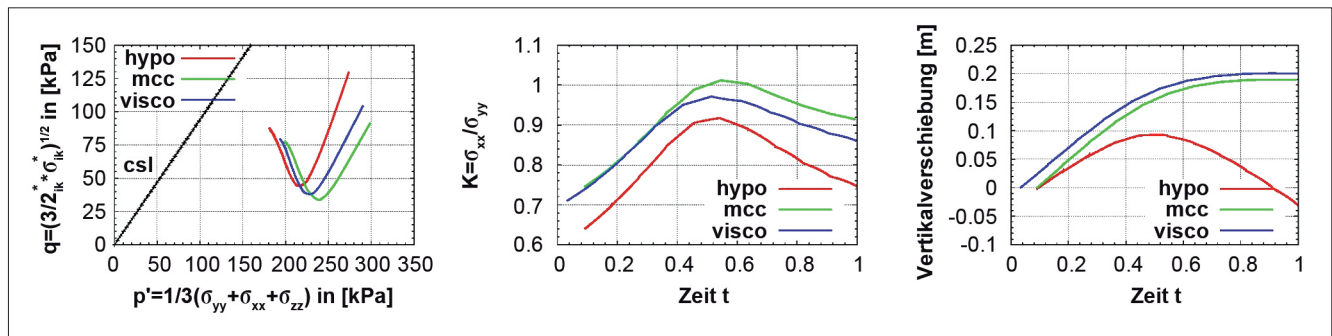


Bild 3: Charakteristische q - p' -Spannungspfade, Änderung des K -Wertes sowie dazugehörige Vertikalverschiebung während der Entlastung im Punkt G (siehe Bild 2) für alle drei untersuchten Stoffmodelle

Figure 3: Characteristic path in the q - p' plane, alteration of the ratio of horizontal and vertical stress (K -value) and vertical displacements during removal of the load at point G (see figure 2) for all three constitutive models

Bild 3 zeigt die q - p' -Spannungspfade und die Entwicklung des Verhältnisses von Horizontal- und Vertikalspannung im Punkt G (siehe Bild 2) für das drainierte Berechnungsmodell. Zusätzlich sind für denselben Punkt die Vertikalverschiebungen abgebildet. Obwohl die Spannungspfade eine sehr gute Übereinstimmung zeigen, ist ein deutlicher Unterschied in den Verschiebungstrends während des Wiederanstieges der Deviatorspannung q zu erkennen. Die Zunahme der Scherspannung ist mit dem Aushubfortschritt gekoppelt. Ist der letzte Aushubschritt senkrecht über dem betrachteten Punkt komplettiert, verringert sich vornehmlich nur noch die Horizontalspannung in diesem Punkt. Dies bedeutet, dass das Verhältnis von Horizontal- und Vertikalspannung wieder kleiner wird und die Deviatorspannung anwächst. Je nach Lage des Beobachtungspunktes, ist dieser Effekt mehr oder weniger ausgeprägt. Der Spannungszustand im Boden kann sich daher auch während der Entlastung dem Grenzzustand annähern oder diesen sogar erreichen.

In Bild 4 sind die Verschiebungsvektoren entlang der Achse I_1 (siehe Bild 2) für einen drainierten Aushub, unterteilt für die zehn Aushubschritte, abgebildet. Auch hier wird deutlich sichtbar, dass sich mit Aushubbeginn die Verschiebungstendenzen ähneln, jedoch mit zunehmender Aushubtiefe deutliche Unterschiede vor allem für das hypoplastische Modell zu erkennen sind.

Anhand Bild 4 wird deutlich, dass trotz übereinstimmenden Spannungspfaden die drei Stoffmodelle Abweichungen in den Verschiebungstendenzen zeigen. Da keine Verschiebungsmessungen aus realen Aushubvorgängen vorliegen, können demzufolge auch keine Vergleiche mit Messungen erfolgen.

Um die unterschiedlichen berechneten Verschiebungstendenzen zu bewerten, wurden Experimente im Labor geplant. Ziel war es, mit Hilfe von lastgesteuerten Triaxialversuchen das Stoffmodell zu ermitteln, welches für vergleichbare Spannungspfade wie in Bild 3 die zutreffendsten Verschiebungstendenzen liefert.

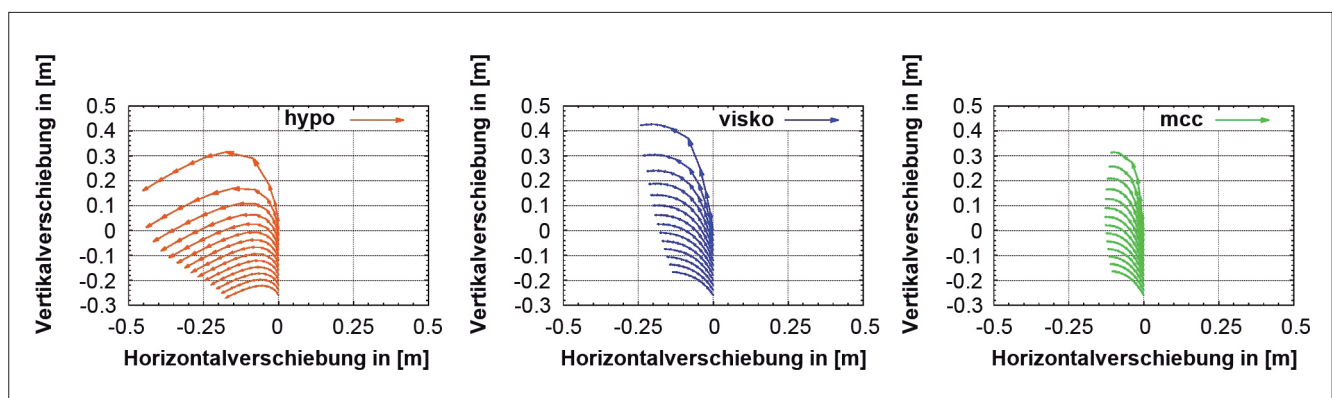


Bild 4: Vergleich der Verschiebungsvektoren während eines drainierten Aushubs entlang der Achse I_1

Figure 4: Comparison of the displacement vectors along the axis I_1 during a drained excavation

3 Spannungspfadgesteuerte Triaxialversuche

Stress path controlled triaxial tests

Mit Hilfe von zwei lastgesteuerten Triaxialversuchen wurde ein wie in Bild 3 dargestellter Spannungspfad am IGT nachgestellt. Ein weiterer Versuch wurde gefahren, welcher dazu diente, das Verformungsverhalten in Abhängigkeit von der Neigung des q-p'-Spannungspfades während des Wiederanstieges der Deviatorspannung q zu analysieren. Im Gegensatz zu den konventionellen Triaxialständen verfügt das lastgesteuerte Triaxialgerät (siehe Bild 5) nicht über einen elektronisch oder hydraulisch bewegbaren Druckstempel.

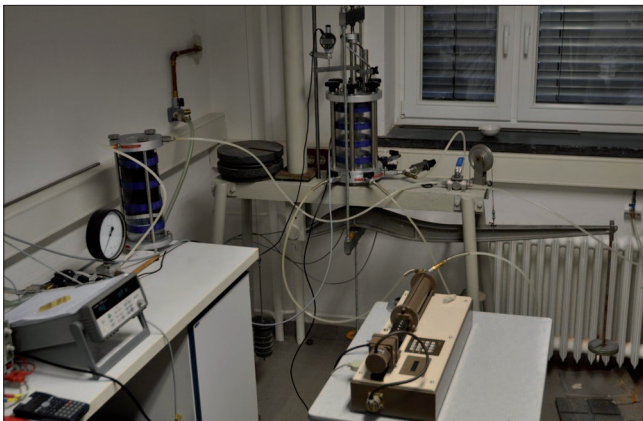


Bild 5: Lastgesteuertes Triaxialgerät am Institut für Geotechnik der Technischen Universität Dresden

Figure 5: Load controlled triaxial device at the Institute of Geotechnical Engineering at the Technical University of Dresden

Das gewünschte Belastungsregime muss manuell über Totlasten aufgebracht werden, wobei die Lasten über die Traversenkonstruktion axial auf den Belastungskolben und damit auf die Bodenprobe eingetragen werden. Der in der Triaxialzelle allseitig wirkende Zeldruck sowie der an Probenober- und unterseite anliegende Porenwasserdruck werden maschinell geregelt bzw. registriert. Die Laststeuerung durch Totlasten simuliert realistisch die Spannungsänderung während einzelner Aushubsschritte.

Bei dem verwendeten Probenmaterial handelt es sich nicht um den Boden, welcher demjenigen in der numerischen Simulation des Aushubs genau entsprechen würde. Es wurde ein Referenzmaterial des Institutes verwendet, welches als ein stark schluffiger, leicht- bis mittelplastischer Ton charakterisiert werden kann. Die Bestimmung der Materialparameter für die drei verwendeten Stoffmodelle erfolgte anhand von durchgeführten Ödometer- und Triaxialversuchen am IGT.

Spannungspfade wie in Bild 3 (links) dargestellt, sind charakteristisch für einen Aushub und nahezu unabhängig vom Bodentyp. Eine numerische Simulation des drainierten Aushubs für das verwendete Referenzmaterial ergab ähnliche Abweichungen im Verschiebungsverhalten wie in Bild 3 (rechts).

Bild 6 zeigt das Belastungsregime einer der drei am IGT untersuchten Bodenproben. In diesem Versuch erreicht die Deviatorspannung q während des Entlastungsvor-

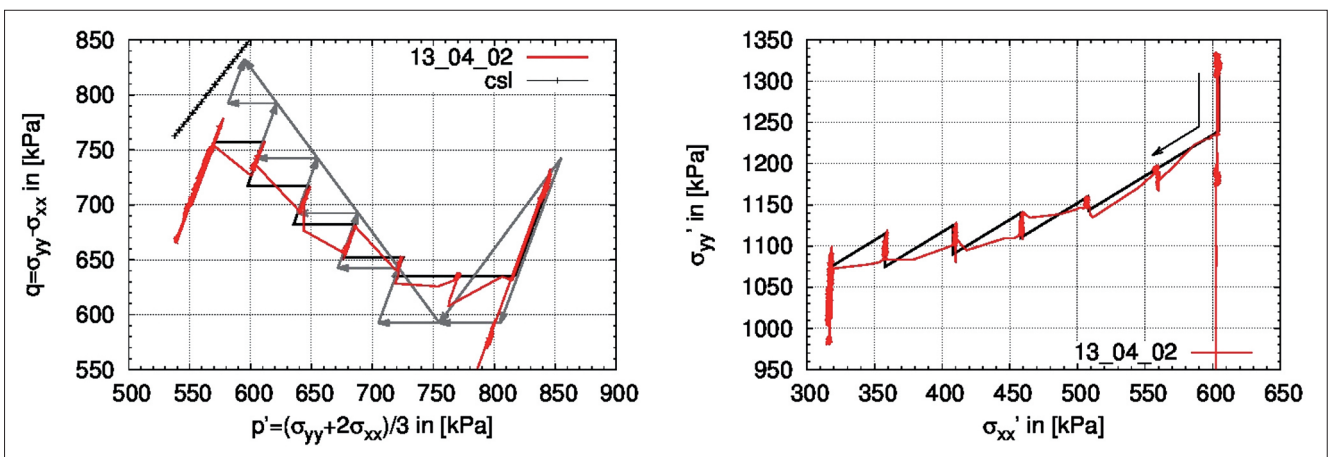


Bild 6: Spannungspfade des ersten lastgesteuerten Triaxialversuches im q-p'- und σ_{xx} - σ_{yy} -Diagramm. Die grauen Vektoren im linken Diagramm kennzeichnen das festgelegte Belastungsregime, die roten Kurven entsprechen dem tatsächlichen Spannungspfad. Der schwarze Kurvenverlauf in beiden Diagrammen beschreibt den Pfad des nachgerechneten Elementversuches.

Figure 6: Stress path in the q-p' and σ_{xx} - σ_{yy} planes of the first load controlled triaxial test. The grey vectors in the left-hand diagram indicate the specified load regime, the red curves the effective stress path. The black curves in both diagrams define the stress path of the calculated element test.

ganges einen höheren Wert als vor Entlastungsbeginn. Dies würde einem Bereich in einer Böschung entsprechen, der durch eine größere Verringerung der Horizontal- als Vertikalspannung charakterisiert ist, d.h. im oberen Bereich einer durch Aushub entstehenden Böschung. Der Spannungspfad, welcher im Labor nachgestellt wurde, endet in der Nähe der Critical State Line (CSL), um die Verschiebungstendenzen nahe dem Grenzzustand genauer betrachten zu können.

Der Ausgangsspannungszustand vor Entlastung wurde nach Probensättigung über eine Konsolidation bis 600 kPa und eine in drei Schritten erfolgte Erhöhung der axialen Totlast erreicht. Das Spannungsverhältnis σ_{xx}/σ_{yy} beträgt vor Entlastung $K=0,45$ und befindet sich somit näherungsweise im K_0 -Zustand. Im ersten Entlastungsschritt wurde die Axialspannung um 150 kPa und die Radialspannung um 50 kPa reduziert. Bei den vier darauffolgenden Laststufen erfolgte eine Zelldruckminderung um 50 kPa und eine Erhöhung der Axialspannung um ebenfalls 50 kPa. Im letzten Schritt wurden Zelldruck und Axialspannung um jeweils 40 kPa verringert bzw. vergrößert. Die Neigung des q - p' -Spannungspfad während des Wiederanstieges der Deviatorspannung q beträgt damit $m=-1,5$ (vgl. Bild 10 oben), und die effektive Axialspannung dürfte sich während des Versuches nicht ändern.

Um auf dem festgelegten Spannungspfad zu bleiben, muss bei einem lastgesteuerten Triaxialgerät eine Aufteilung des Entlastungsabschnittes in eine Änderung

der Axialspannungskomponente sowie Änderung des Zelldrucks erfolgen. Ein Entlastungsschritt wurde in zwei unmittelbar aufeinander folgende Arbeitsschritte gegliedert. Zwischen zwei Entlastungsphasen befand sich jeweils eine Wartezeit von 24 Stunden, da davon ausgegangen werden kann, dass auch ein Böschungsaushub schrittweise erfolgt.

Bei dem Entlastungsschritt, in welchem es zu einer Verringerung der Deviatorspannung q kam, wurde die Probe zunächst in axialer Richtung entlastet und direkt danach der Zelldruck verringert sowie gleichzeitig die entsprechende Gegenlast für den Druckstempel entfernt. Im Bereich des Anstieges der Deviatorspannung q erfolgten anfänglich die Zelldruckminimierung und anschließend die Erhöhung der Axialspannung.

Die Gegenlast für den Druckstempel, welche bei Zelldruckreduzierung oder -erhöhung angepasst werden muss, resultiert aus der Fläche des Druckstempels und dem in der Triaxialzelle vorherrschenden Zelldruck. Die Kraftdifferenz zwischen der außer- und innerhalb der Triaxialzelle gemessenen Axialkraft entspricht der Gegenlast, um den Zelldruck auf den Druckstempel auszugleichen (siehe Bild 7 links).

Während der Zelldruck bei Änderung einer Laststufe graduell verringert wird, muss die Gegenlast manuell entfernt werden, wodurch es kurzzeitig zu einer höheren bzw. kleineren Axialspannung kommt. Dies ist eine der Erklärungen für die Abweichung des ermit-

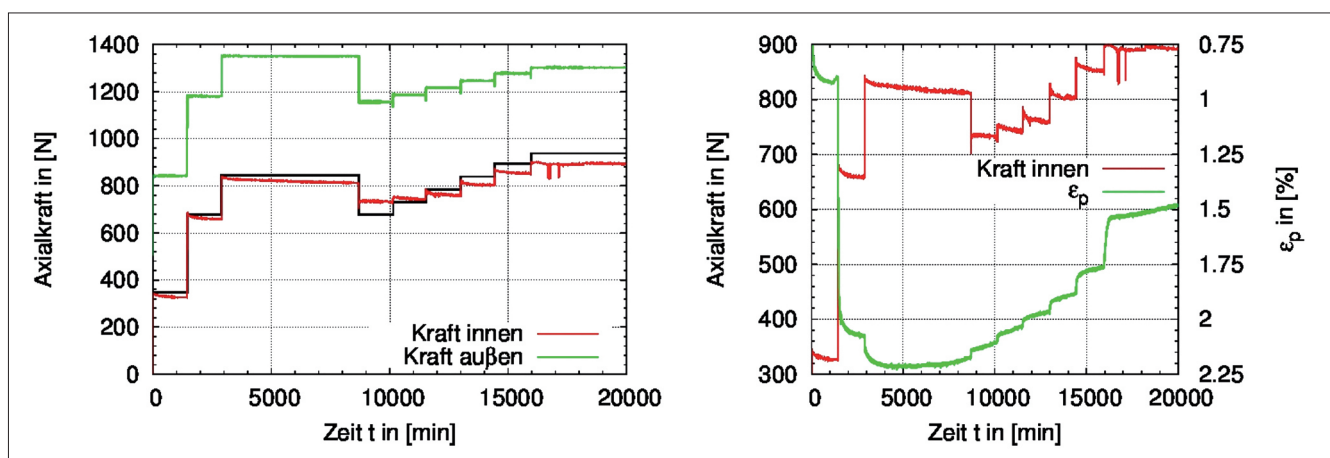


Bild 7: Verlauf der außer- und innerhalb der Triaxialzelle gemessenen Axialkraft, Verlauf der Axialkraft ohne Berücksichtigung der Reibung (schwarz) sowie Axialkraftverlauf und gleichzeitige Volumenänderung ab Konsolidation und bis 24 Stunden nach Aufbringung der letzten Laststufe für den ersten Versuch

Figure 7: Curve of the axial force measured within and outside the triaxial cell, curve of the axial force without consideration of friction (black) as well as curves of the axial force and the volumetric change between consolidation and up until 24 hours after the last loading stage for the first triaxial test

telten Spannungspfades vom festgelegten Belastungsregime in Bild 6 (rechts). Zudem verursacht die Reibung zwischen dem Druckstempel und der Aussparung in der Triaxialzelle, dass die von außen aufgebrachte Axiallast nicht vollständig auf die Probe übertragen werden kann. Der Einfluss der Reibung auf die gemessene Axialkraft ist in Bild 7 (links) dargestellt.

Der dargestellte Verlauf der gemessenen Axialkraft von außen und innen in Bild 7 (links) ist ab der Konsolidation veranschaulicht. In dem Diagramm ist zudem der eigentliche Axialkraftverlauf ohne den Einfluss von Reibung skizziert. Zusätzlich sind der Verlauf der in der Triaxialzelle gemessenen Axialkraft und die gleichzeitige Volumenänderung während der Be- und Entlastung dargestellt. Weiterhin ist in Bild 7 zu erkennen, dass es nach Änderung der Laststufen zu einem geringfügigen Abfall der Axialkraft im inneren der Triaxialzelle kommt. Dies ist dadurch bedingt, dass sich die Probe setzt, aber der Druckstempel auf Grund von Reibung nicht nachrutschen kann.

Der zweite untersuchte Spannungspfad zeigt nicht den gesamten Verlauf, wie er während eines Entlastungsvorganges in der Nähe der Böschungsoberfläche beobachtet werden kann. Der Bereich, in welchem die Deviatorspannung q verringert wird, wurde weggelassen und nur der Teil des Wiederanstieges betrachtet. Das Belastungsregime setzt sich aus fünf Laststufen zusammen. Der Zelldruck wird in jeder Laststufe zunächst um 80 kPa reduziert und unmittelbar danach die Axialspan-

nung um 120 kPa erhöht. Damit stellt sich eine Neigung des q - p' -Spannungspfades von $m = -3,0$ ein und es kann von einer Belastung gesprochen werden, da die Änderung der Spannung in axialer Richtung größer als in horizontaler Richtung ist. Die Probe wurde vor Beginn auf eine effektive, mittlere Hauptspannung von 600 kPa konsolidiert. Bild 8 zeigt den q - p' -Spannungspfad und das σ_{xx} - σ_{yy} -Diagramm dieses Versuches.

In Bild 8 (links) ist zu erkennen, dass infolge der Versuchsdurchführung der gemessene q - p' -Spannungspfad oberhalb des festgelegten Belastungsregimes verläuft. Dadurch wird das Verformungsverhalten maßgebend durch die Änderung der Deviatorspannung q beeinflusst. Im Vergleich zwischen dem geplanten Belastungsregime und den tatsächlichen Spannungsänderungen ist zu erkennen, dass in der letzten Laststufe nur noch die Reduzierung des Zeldruckes, aber keine Erhöhung der Axialkraft erfolgte. Diese Abweichung vom Versuchsplan ist damit begründet, dass der tatsächliche Spannungszustand vor Ausführung der letzten Laststufe bereits deutlich näher am Grenzzustand lag als ursprünglich geplant.

Der Einfluss der Reibung ist bei der Belastung weniger deutlich ausgeprägt wie bei den Entlastungsvorgängen, vgl. Bilder 7 und 9. Jedoch zeigt sich auch hier ein Abfall der Axialkraft zwischen den Laststufen, welcher durch ein verhindertes Nachrutschen des Druckstempels bei sehr kleinen Setzungen der Probe verursacht wird.

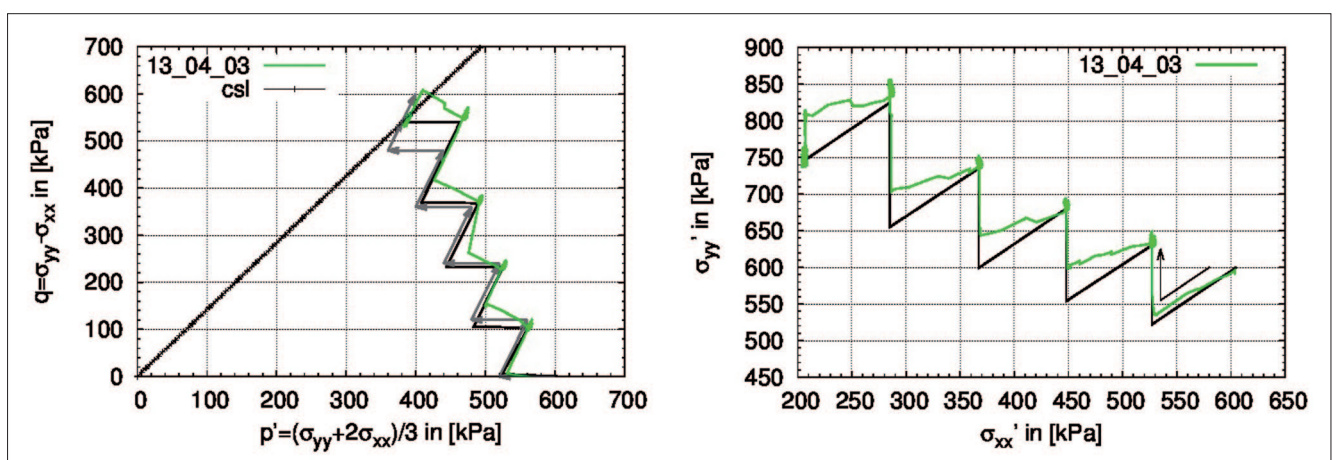


Bild 8: Spannungspfade im q - p' - und σ_{xx} - σ_{yy} -Diagramm des zweiten lastgesteuerten Triaxialversuches. Die grauen Vektoren im linken Bild kennzeichnen das festgelegte Belastungsregime, die grünen Kurven entsprechen dem tatsächlichen Spannungspfad. Der schwarze Kurvenverlauf in beiden Diagrammen beschreibt den Pfad des nachgerechneten Elementversuches.

Figure 8: Stress path in the q - p' and σ_{xx} - σ_{yy} planes of the first load controlled triaxial test. The grey vectors in the left-hand diagram indicate the specified load regime, the green curves the effective stress path. The black curves in both diagrams define the stress path of the calculated element test.

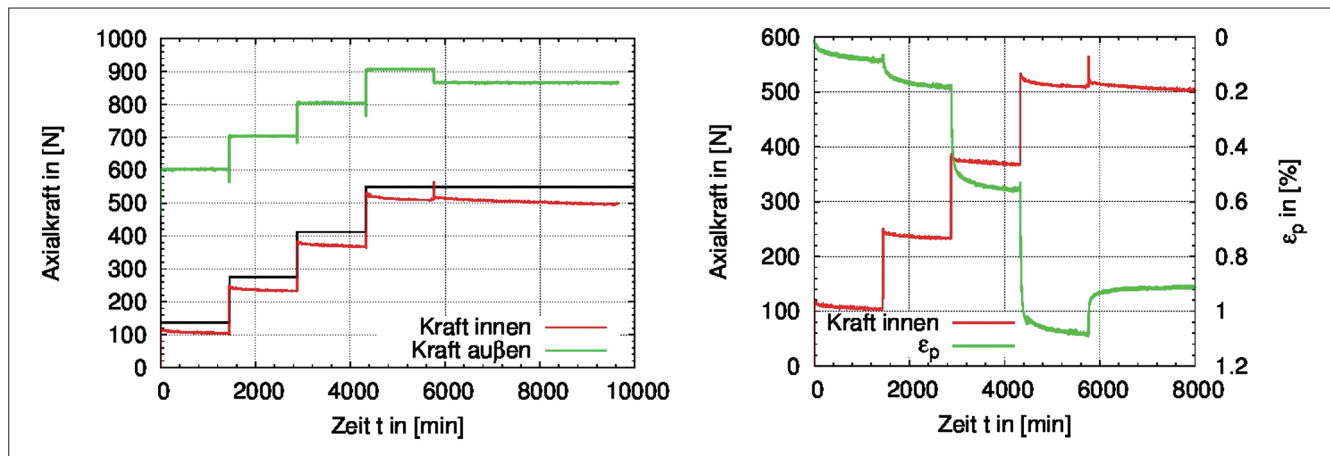


Bild 9: Verlauf der außer- und innerhalb der Triaxialzelle gemessenen Axialkraft, Verlauf der Axialkraft ohne Berücksichtigung der Reibung (schwarzer) sowie Axialkraftverlauf und gleichzeitige Volumenänderung ab Konsolidation und bis 24 Stunden nach Aufbringung der letzten Laststufe für den zweiten Versuch

Figure 9: Curve of the axial force measured within and outside the triaxial cell, curve of the axial force without consideration of friction (black) as well as curves of the axial force and the volumetric change between consolidation and up until 24 hours after the last loading stage for the second triaxial test

4 Auswertung der Versuchsergebnisse und Vergleich mit Ergebnissen aus Elementversuchen

Evaluation of the laboratory results and comparison with results of the element tests

In den Bildern 6 und 8 sind die für die Nachrechnung mit TOCHNOG definierten q - p' -Spannungspfade abgebildet. Die Reibung zwischen dem Druckstempel und der Triaxialzelle sowie der Einfluss der Versuchsdurchführung hat eine Abweichung zwischen den geplanten Belastungsregimen und den gemessenen Spannungspfaden zur Folge. Um die gemessenen und die gerechneten Verschiebungstendenzen so gut wie möglich miteinander vergleichen zu können, wurde nicht der Spannungspfad des festgelegten Belastungsregimes, sondern der des tatsächlichen Spannungspfades modelliert.

Jede Art von Spannungsänderung während des Laborversuches wurde im nachgerechneten Versuch als ein Berechnungsschritt betrachtet, sodass für den ersten Versuch ab Entlastungsbeginn 12 und für den zweiten Versuch 9 Berechnungsschritte nötig gewesen sind. Um den numerischen Einfluss der intergranularen Dehnung bei den hypoplastischen Modellen zu berücksichtigen, wurde der gesamte Laborversuch ab Konsolidationsbeginn simuliert. Der Versuch wurde drainiert gerechnet, auch wenn erwartungsgemäß während der Entlastung

Porenwasserunterdrücke im Probeninneren entstehen. Das visko-hypoplastische Stoffmodell ist ein ratenabhängiges Modell und die Belastungsgeschwindigkeit muss während der FE-Berechnung in Betracht gezogen werden. Da der Zeitraum für die Durchführung der einzelnen Laststufen sehr kurz war, wurden auch für dieses Modell lediglich 12 bzw. 9 Berechnungsschritte gewählt und der Zeitraum von 24 Stunden während den jeweiligen Laststufen vernachlässigt. Dies lässt sich damit begründen, dass das verwendete Referenzmaterial nur einen sehr niedrigen Viskositätsindex ($l_v = 0,001$) besitzt und während der Wartezeit von 24 Stunden keine Setzungen infolge Kriechen zu erwarten sind, welche das Verschiebungsmuster maßgeblich beeinflussen.

Das Verformungsverhalten wird durch zwei voneinander unabhängigen Prozessen gesteuert. Zum einen kommt es infolge der Zelldruckverringering zu einer isotropen Volumenvergrößerung, aber gleichzeitig auch auf Grund der Zunahme der Deviatorspannung q zu Setzungen und zu einer Volumenverkleinerung. Diese beiden Vorgänge überlagern sich und bestimmen je nach Verhältnis $\Delta q/\Delta p'$ die Ausprägtheit der einzelnen Faktoren.

Auf Grund des Einflusses der Versuchsdurchführung hat der q - p' -Spannungspfad des ersten Versuches, welcher sich in Richtung der CSL bewegt, einen Anstieg $m = -0,75$, d.h. die Änderung der mittleren effektiven Hauptspannung ist größer als die der Deviatorspannung. Somit ist

der allgemeine Einfluss der isotropen Volumenvergrößerung infolge der Zelldruckreduzierung größer als die Volumenverkleinerung durch Erhöhung der Scherspannung, was sich im Verlauf der gemessenen Volumenänderung widerspiegelt (siehe Bild 11 rechts). Durch den Wiederanstieg der Scherspannung nehmen die Setzungen zu. Die Setzungsänderungen vergrößern sich mit der Annäherung des Spannungspfades an die CSL bedeutend, da die Bodensteifigkeit abnimmt.

Generell nehmen bei der Scherung eines normalkonsolidierten Bodens und Annäherung an den Grenzzu-

stand die Dehnungsänderungen in vertikaler Richtung weiterhin zu, obwohl die Scherspannungsänderungen nur noch sehr gering sind. Gleichzeitig beobachtet man keine wesentliche Volumenverkleinerung mehr, da sich der Zustand der Probe bereits in der Nähe der CSL befindet (siehe Bild 10 unten). Dem entgegen wirkt hier die Volumenvergrößerung, die mit reduzierender Hauptspannung größer wird. Überlagern sich die jeweiligen Dehnungsänderungen aller drei Richtungen von beiden Effekten, sind zwar Setzungen zu beobachten, aber die horizontalen Dehnungen sind wesentlich größer, so dass sich der Boden insgesamt auflockert, siehe Bild 11.

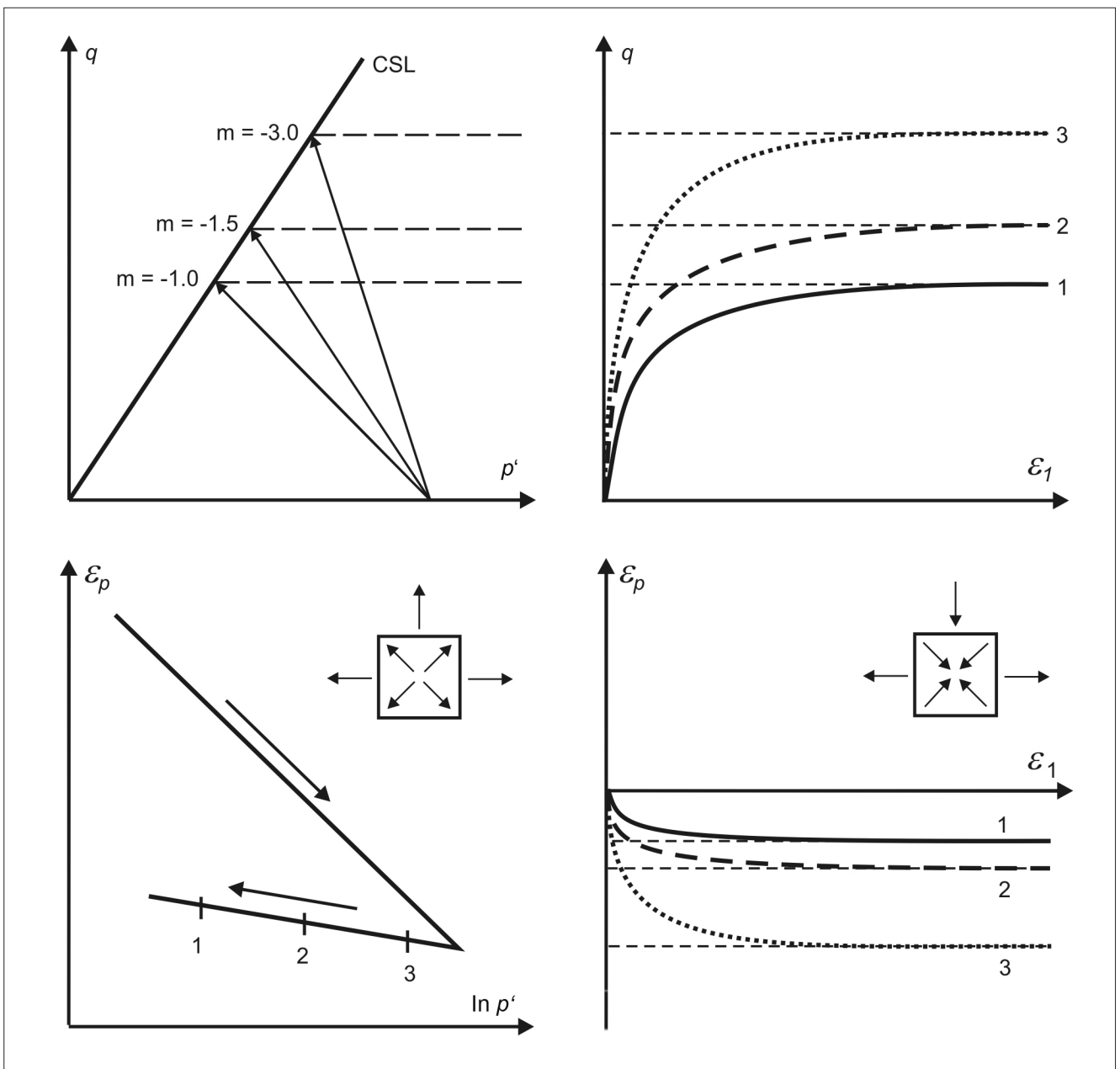


Bild 10: Einfluss der Neigung von Spannungspfaden im q-p'-Diagramm auf das Verformungsverhalten
 Figure 10: Influence of the inclination of stress paths in the q-p' plane on the deformation behaviour

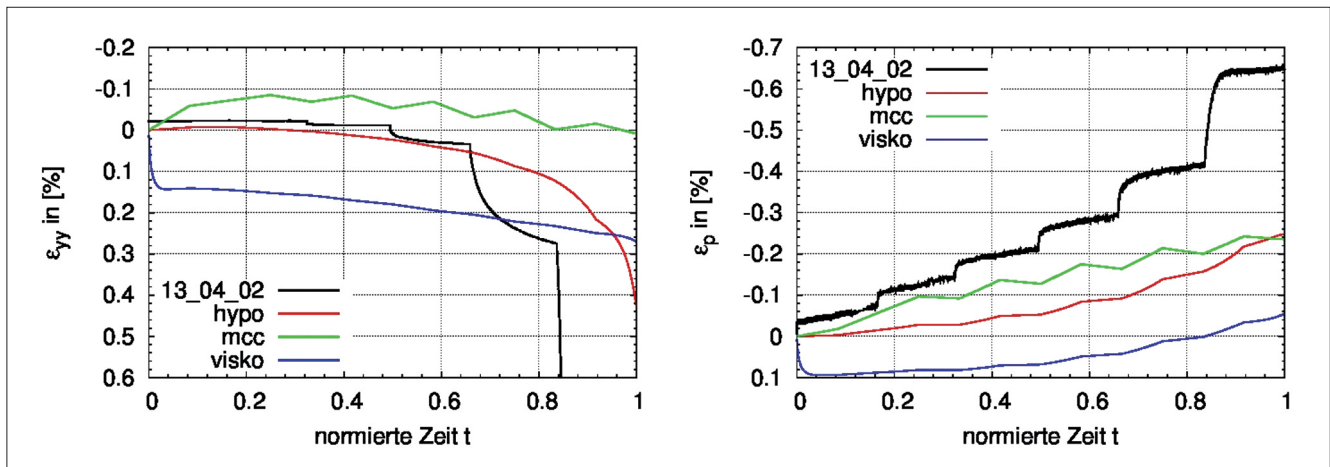


Bild 11: Vergleich von gemessener und berechneter Vertikal- und Volumendehnung für den ersten Versuch (ab der Entlastung und bis 24 Stunden nach Aufbringung der letzten Laststufe)

Figure 11: Comparison of measured and calculated vertical and volumetric strains for the first triaxial test (from removal of the load up until 24 hours after the last loading stage)

In Bild 11 sind die gemessenen Dehnungen in vertikaler Richtung und die volumetrischen Dehnungen ab Entlastungsbeginn gezeigt. Infolge Entlastung ist für die ε_{yy} -Versuchskurve anfänglich eine geringfügige Hebung zu beobachten. Ab der dritten Entlastungsstufe beginnt sich die Probe zu setzen, wobei die Setzungsdifferenzen ab dem dritten Entlastungsschritt stetig zunehmen. Setzungen bis ca. 2% werden während der letzten Laststufe gemessen, sind aber hier für einen besseren Vergleich mit den Ergebnissen aus den Elementversuchen nicht dargestellt. Infolge der Zeldruckreduzierung und der nur geringen Volumenverkleinerung durch Scherung lässt sich eine ständige Volumenzunahme beobachten. Auch lässt sich eine größere Änderung in der Volumenvergrößerung ab dem vierten Entlastungsschritt beobachten, da sich der Betrag aus der Volumenverkleinerung infolge Scherung verringert (siehe Bild 10 unten).

Für das elasto-plastische Modified-Cam-Clay-Modell (mcc) ist der Einfluss der Hauptspannungsänderung $\Delta p'$ und der Deviatorspannungsänderung Δq (siehe Bild 11 links) sehr auffällig. Während den ersten drei Berechnungsschritten kommt es natürlich zu Hebungen und Volumenvergrößerungen, da sowohl p' als auch q verringert werden. Danach lassen sich Setzungen und Volumenverkleinerungen bei einer Änderung von q und Hebungen und Volumenvergrößerungen bei einer Änderung von p' beobachten. Für die volumetrische Dehnung führt dies tendenziell zu Auflockerungen und die Probe setzt sich geringfügig nach anfänglichen Hebungen wieder.

Auch für das ratenunabhängige hypoplastische Stoffmodell (hypo) ist dieser Verschiebungstrend deutlich wiederzuerkennen. Vor allem bildet dieses Modell die Verschiebungstendenzen mit Annäherung an die CSL wesentlich besser ab, d. h. die Zunahme der Setzungs- und Volumenänderungsrate. Auch wird für das hypoplastische Stoffmodell die Kernaussage, dass sich die Probe trotz Volumenvergrößerung anfangs nur minimal hebt, sich jedoch anschließend bedeutend mehr setzt, besser wiedergegeben.

Das ratenabhängige Stoffmodell (visko) zeigt bei Entlastungsbeginn ein von den beiden anderen Stoffmodellen abweichendes Verschiebungsmuster. Demnach setzt sich die Probe sehr stark bei Belastungsumkehr und nur noch unerheblich während des verbleibenden Entlastungsvorganges. Mit den eingangs sehr großen Setzungen kommt es gleichzeitig zu einer Verdichtung der Probe. Während der Entlastung sind eine Auflockerung und auch ein Anstieg der Volumendehnungsrate beobachtbar.

Gut sichtbar in Bild 12 ist die Entkoppelung von Scher- und Volumendehnung im elastischen Raum für das elasto-plastische Stoffmodell. Dies zeigt sich deutlich durch den Kurvenverlauf im ε_p - p' - und ε_q - q -Diagramm. Damit wird das eigentlich Bodenverhalten nur tendenziell wiedergegeben.

Eine sehr gute Übereinstimmung lässt sich für das hypoplastische Modell beobachten. Der Einfluss von Haupt- und Deviatorspannungsänderung auf das vo-

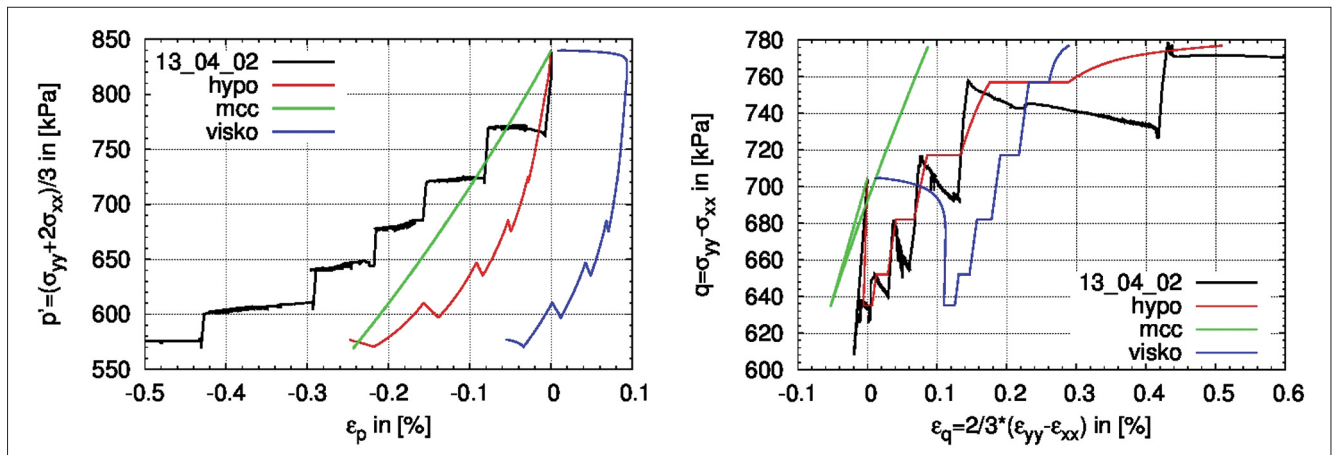


Bild 12: ε_p - p' -Diagramm und ε_q - q -Diagramm für den ersten spannungspfadgesteuerten Versuch
 Figure 12: ε_p - p' plot and ε_q - q plot for the first stress path controlled triaxial test

lumetrische und deviatorische Dehnungsverhalten ist zudem gut nachvollziehbar. Die Verschiebungstendenzen, d.h. die Zunahme der Rate von Volumen- und Deviatordehnung mit jedem Lastschritt, ist für das hypoplastische Modell deutlich zu erkennen. Der wesentliche Unterschied beim visko-hypoplastischen Stoffmodell liegt in der Prognose des Verformungsverhaltens bei Entlastungsbeginn. Zudem liefern die beiden hypoplastischen Stoffmodelle jeweils voneinander abweichende Verformungstrends für die Scherdehnung während der Zelldruckreduzierung (siehe ε_q - q -Diagramm in Bild 12). Während beim Stoffmodell von Mašin ein Anstieg der Verformungsrate während dieses Abschnittes feststellbar ist, und dies obwohl die Zelldruckänderung $\Delta p'$ stets konstant bleibt, ist die Rate der Scherdehnung für das visko-hypoplastische Stoffmodell nahezu gleich.

Für den zweiten Versuch hat der gemessene q - p' -Spannungspfad einen Anstieg $m \approx -4,5$. Damit ist die Änderung der Deviatorspannung q größer als die der effektiven mittleren Spannung p' (siehe Bild 8 links) und die Volumenverkleinerung infolge Scherung (siehe Bild 10 unten) überwiegt somit.

Die Dehnungsänderungen in vertikaler Richtung nehmen wieder zu, wenn sich der Pfad der CSL nähert (siehe Bild 10 oben). Der Einfluss vertikaler Verformung auf die Volumenverkleinerung ist größer als die Volumenvergrößerung infolge isotroper Druckentlastung (siehe Bild 10 unten). Daher nimmt auch die Volumenstauchung unmittelbar zu. Im letzten Lastschritt wurde lediglich der Zelldruck reduziert, da sich der gegenwärtige Spannungszustand bereits näher als geplant am Grenz-

zustand befand (siehe Bild 8 links). Vergleicht man den Betrag der Volumenvergrößerung des letzten Schrittes mit der Volumenverkleinerung der vorletzten Laststufe (siehe Bild 13 rechts), lässt sich feststellen, dass dieser wesentlich kleiner ist. Mit Annäherung an die CSL wird generell die Volumenänderung durch Scherung verringert. Es wird daher geschlossen, dass die beobachtbare zunehmende Verdichtung infolge der Änderung der Belastungsrichtung während einer Laststufe hervorgerufen wird.

Da während des Versuchsablaufes zunächst der Zelldruck reduziert und anschließend erst die Axialkraft erhöht wurde, kommt es zusätzlich zu einer kurzzeitigen Volumenvergrößerung, sehr gut sichtbar in Bild 14. Die geringfügigen Setzungen während der letzten Laststufe lassen sich mit der Reduzierung des Zelldruckes und des dadurch kleiner werdenden Spannungsverhältnisses und folglich der anteilig zunehmenden Axialspannung begründen.

Zwischen den jeweiligen Laständerungen sind minimale Volumenverkleinerungen infolge Konsolidation zu beobachten.

Alle drei Stoffmodelle zeigen bei dem Verformungsverhalten in axialer Richtung dieselben Tendenzen. Dieses ist charakterisiert durch minimale Setzungen bis zur dritten Laststufe bzw. bis zum sechsten Berechnungsschritt. Danach kommt es während der Erhöhung der Deviatorspannung q im achten Berechnungsschritt zu sehr hohen Stauchungen beim visko-hypoplastischen und elasto-plastischen Stoffmodell. Bei den beiden hypoplastischen Modellen lassen sich im letzten Be-

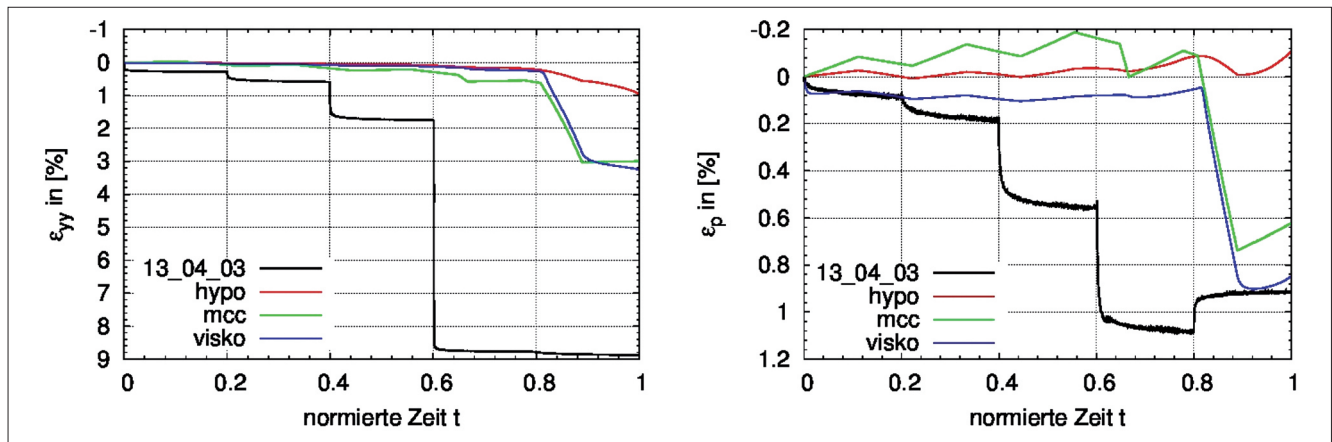


Bild 13: Vergleich der gemessenen und berechneten Vertikal- und Volumendehnung bis 24 Stunden nach Aufbringung der letzten Laststufe für den zweiten Versuch

Figure 13: Comparison of measured and calculated vertical and volumetric strains up until 24 hours after the last loading stage for the second triaxial test

rechnungsschritt während der Zelldruckreduzierung, vergleichsweise mit dem Versuch, ebenfalls minimale Setzungen nachweisen. Auf Grund einer Reduzierung der effektiven Mittelspannung und einer damit verbundenen Volumenvergrößerung prognostiziert das elastoplastische Modell Hebungen.

Hinsichtlich des volumetrischen Verhaltens sind, wie im ersten Versuch, für das visko-hypoplastische Modell generell Volumenverkleinerungen bei Belastungsumkehr zu beobachten. Danach sind leichte Oszillationen in der Volumendehnung, in Abwechslung mit der Verringerung der Hauptspannung bzw. Erhöhung der Deviatorspannung, registrierbar. Beim achten Rechnungsschritt, d.h. mit der letzten Steigerung der Deviatorspannung, verringert sich das Volumen wesentlich, um danach bei Reduzierung der effektiven mittleren Hauptspannung wieder minimal anzuwachsen. Auch bei dem ratenunab-

hängigen hypoplastischen Stoffmodell ist die Volumenschwankung während der ersten 3 Laststufen sichtbar. Mit der letzten Erhöhung der Deviatorspannung kommt es aber nur zu kleinen Volumenverkleinerungen und tendenziell hat sich das Probenvolumen bis zu diesem Zeitpunkt nicht geändert. Anschließend folgt auch hier eine minimale Auflockerung der Probe.

Bild 14 zeigt für den zweiten Versuch und die dazugehörigen Elementversuche das volumetrische und deviatorische Verhalten mit Änderung der effektiven Hauptspannung p' und Deviatorspannung q . Für das hypoplastische Stoffmodell wird vor allem das sehr steife Bodenverhalten sichtbar, während bei den anderen beiden Modellen klar die großen Dehnungsänderungen während der letzten Erhöhung der Scherspannung deutlich hervorragen.

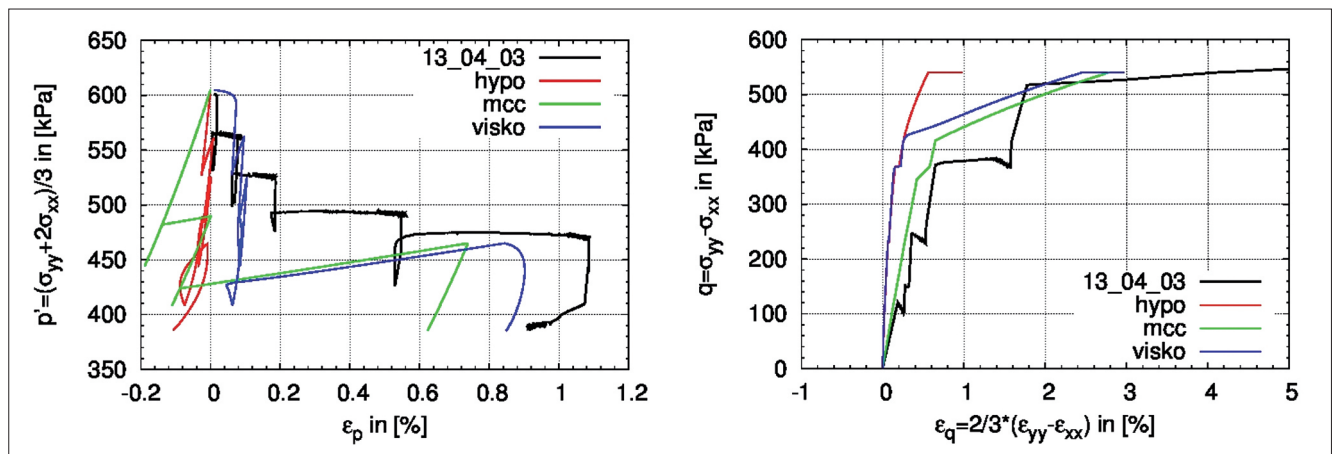


Bild 14: ϵ_p - p' -Diagramm und ϵ_q - q -Diagramm für den zweiten spannungspfadgesteuerten Versuch

Figure 14: ϵ_p - p' plot and ϵ_q - q plot for the second stress path controlled triaxial test

5 Zusammenfassung

Summary

Numerische Berechnungen eines simulierten Böschungsaushubes mit verschiedenen Stoffmodellen zeigen, dass trotz übereinstimmender Kalibrierungskurven aus Laborversuchen für vorgegebene Spannungspfade Abweichungen hinsichtlich der Verschiebungsmuster auftreten können. Mit Hilfe eines lastgesteuerten Triaxialgerätes wurde ein solcher beobachtbarer Spannungspfad am IGT nachgestellt. Zudem erfolgte ein weiterer Versuch, um das spannungspfadabhängige Verhalten untersuchen zu können. Dieser Laborversuch wurde als Elementversuch mit dem FE-Programm TOCHNOG nachgerechnet. Die gemessenen Verformungen während des Versuchsdurchlaufes sind mit den Verschiebungen der numerischen Simulation verglichen worden.

6 Literatur

References

Mašín, D. (2005): A Hypoplastic constitutive model for clay. *Methods in Geomechanics*, 29, 311–336.

Meier, T. (2009): Application of hypoplastic and visco-hypoplastic constitutive models for geotechnical problems. PhD thesis.

Niemunis, A. (2003): Extended hypoplastic models for soils. PhD thesis.

Wood, D. M. (2003): A particular elastic-plastic model: Cam-Clay. *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics*, Cambridge University Press, New York, 112-138.

