

Von der Hyperelastizität feinkörniger Böden zum Bodenverhalten unter zyklischer Beanspruchung

M.Sc. Sabine Gehring, Karlsruher Institut für Technologie
Dr.-Ing. Lukas Knittel, Karlsruher Institut für Technologie
Dr.-Ing. Merita Tafili, Ruhr-Universität Bochum

Mit Hilfe einer thermodynamisch fundierten Formulierung der Steifigkeit kann das Verhalten feinkörniger Böden bei kleinen Dehnungen akkurat beschrieben werden. Zur Kalibrierung der Hyperelastizität sind hochgenaue Messungen von Spannungen und Dehnungen in zyklischen Triaxialversuchen notwendig. Anhand von drei Versuchen wird die Formulierung und Kalibrierung des hyperelastischen Potentials zur Bestimmung der Hyperelastizität gezeigt und mit Hilfe von Antwortpolaren dargestellt. Des Weiteren wird auf Effekte der inhärenten Anisotropie eingegangen.

1 Einleitung

Bei der Planung von geotechnischen Bauwerken ist es äußerst wichtig, eine möglichst genaue Vorhersage der durch die Baumaßnahme zu erwartenden Verformungen am Bauwerk selbst und in seiner Umgebung zu erstellen und diese mit den zulässigen Grenzwerten zu vergleichen. Dies ist insbesondere bei Baumaßnahmen im innerstädtischen Bereich vonnöten, bei denen die dichte Bebauung, setzungsempfindliche historische Gebäude sowie komplizierte Baugrund- oder Grundwasserverhältnisse eine Herausforderung für die Planung darstellen.

Die Auswirkung einer geotechnischen Baumaßnahme, wie beispielsweise der Aushub einer Baugrube, wird bei komplizierteren Verhältnissen immer häufiger in numerischen Berechnungen mit der Finite-Elemente-Methode untersucht. Hierfür ist die Wahl eines geeigneten Stoffmodells für den Boden von entscheidender Bedeutung. Solch ein Stoffmodell muss berücksichtigen, dass die Steifigkeit des Bodens stark nichtlinear ist und von zahlreichen Einflussfaktoren abhängt. Für Verformungsprognosen ist es insbesondere wichtig, dass das Stoffmodell die starke Abnahme der Steifigkeit mit zunehmender Dehnung abbildet, wie sie das Schema in Abbildung 1 zeigt. Dort ist die Beziehung zwischen dem Schubmodul G und der Scherdehnungsamplitude γ^{ampl} abgebildet. Es ist ersichtlich, dass die Steifigkeit bei kleinen Scherdehnungen maximal ist und mit größer werdender Scherdehnung abnimmt. Ein wichtiger Bestandteil eines Stoffmodells für Boden ist die Elastizität bei kleinen Verformungen (siehe elastischer Bereich in Abbildung 1). Auch dann, wenn der elastische Bereich nur infinitesimal klein sein soll, wird die lineare Beziehung $\sigma_{ij} = E_{ijkl}\epsilon_{kl}$ als ein wichtiger

Grenzfall formuliert. Auf der theoretischen Seite resultiert das Hauptproblem daraus, dass eine thermomechanisch fundierte Formulierung eine Energiefunktion, z.B. $\bar{\psi}(\sigma_{ij})$, erfordert, aus der sich die Tangentensteifigkeit $E_{ijkl} = (\partial^2 \bar{\psi} / (\partial \sigma_{ij} \partial \sigma_{kl}))^{-1}$ berechnet. Die Energiefunktion soll für unterschiedliche Drücke und Spannungsverhältnisse geeignet sein. Die resultierende Steifigkeit des Bodens muss vor allem stark druckabhängig sein und die Anisotropie des Materials berücksichtigen. Dies erschwert die Formulierung von $\bar{\psi}(\sigma_{ij})$. Zur Kalibrierung der Energiefunktion sind Messungen der Steifigkeit bei kleinen Verformungen in Laborversuchen notwendig. In zyklischen Triaxialversuchen können ausgehend von einem bestimmten Spannungszustand kleine Spannungszyklen in unterschiedliche Richtungen aufgebracht werden. Dazu ist eine simultane Oszillation der axialen und der radialen Spannung erforderlich. Die resultierende Dehnung wird gemessen. Aus den erhaltenen Spannungs- und Dehnungsincrementen wird die Steifigkeit berechnet. Die gemessene Steifigkeit kann in Form von sog. Antwortpolaren anschaulich dargestellt und mit der numerischen Lösung eines Stoffmodells verglichen werden, welches wiederum die Voraussetzung einer exakten FE-Rechnung eines baupraktischen Problems darstellt.

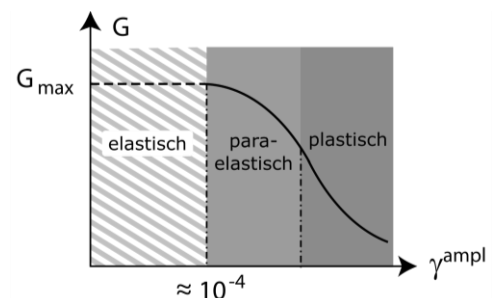


Abbildung 1: Abnahme des Schubmoduls G mit zunehmender Scherdehnungsamplitude γ^{ampl} für einen feinkörnigen Boden

2 Zyklische Triaxialversuche

2.1 Probenpräparation

Als Testmaterial wurde in allen Versuchen Kaolinmehl verwendet, das mit demineralisiertem Wasser zu einer Schlämme angerührt und in einen Konsolidiertopf gefüllt wurde. Anschließend erfolgte eine stufenweise Aufbringung der vertikalen Konsolidierungsspannung bis $\sigma_1 = 100$ kPa bei behinderter Seitendehnung. Danach konnten Proben mit den Abmessungen $d = h = 50$ mm aus der vorkonsolidierten Masse mit Hilfe einer Vorrichtung vertikal ausgestochen werden (siehe Abbildung 2). Es folgte der Probeneinbau in das Triaxialgerät unter Verwendung der Ausstechvorrichtung als Zentrierhilfe.



Abbildung 2: Ausstechvorrichtung zur Gewinnung einer Probe aus einer vorkonsolidierten Kaolinmasse unter Verwendung einer Gummihülle aus Butyl.

Der tonige Schluff mittlerer Plastizität mit den charakteristischen Kenngrößen $w_L = 47,2$ %, $w_P = 35$ %, $I_P = 12,2$ % und $\rho_s = 2,675$ g/cm³ weist eine Durchlässigkeit von $k = 1,3 \cdot 10^{-9}$ m/s auf. Aufgrund der geringen Durchlässigkeit des Kaolins muss eine lange Versuchsdauer in Anspruch genommen werden, um dranierte Bedingungen gewährleisten zu können. Um etwaige Diffusionsprozesse zu vermeiden, wurden Gummihüllen aus Butyl verwendet.

Alle Versuche wurden bei einer konstanten Temperatur in einem klimatisierten Raum durchgeführt. Zusätzlich wurde eine Dämmung sämtlicher Anschlüsse zur Aufbringung des Porenwasserdrucks vorgenommen, um eine optimale Temperaturstabilität zu gewährleisten.

2.2 Versuchsdurchführung

Um die elastische Steifigkeit ermitteln zu können, werden quasi-statische Triaxialversuche mit kleinen Spannungsamplituden durchgeführt, sodass die erhaltenen Dehnungspfade im elastischen Bereich liegen. Nach dem Probeneinbau, der Probensättigung und dem B-Test wurde zunächst eine Vorbelastung der Probe zur Erzielung eines Überkonsolidierungsverhältnisses $OCR = 3$ durchgeführt. Durch die Vorbelastung können plastische Verformungen vorweggenommen werden. Diese Konditionierung lässt sich

im P - Q -Spannungsraum unter Verwendung der isometrischen Variablen des mittleren Drucks $P = \sqrt{3} \cdot p$ mit $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ und der Deviatorspannung $Q = \sqrt{2/3} \cdot q$ mit $q = \sigma_1 - \sigma_3$ darstellen (siehe Abbildung 3). Dabei wurde der mittlere Druck P zunächst stufenweise erhöht, um ihn dann auf den Anfangsspannungszustand zu reduzieren.

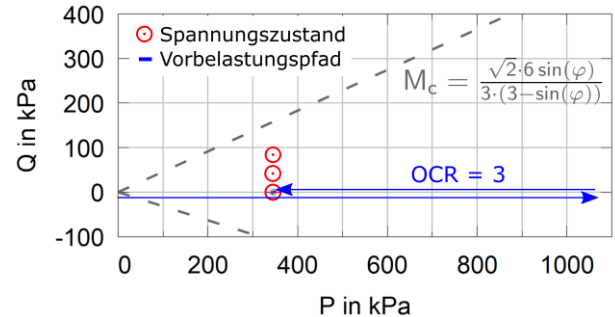


Abbildung 3: Untersuchte Spannungszustände (rot) und Vorbelastungspfad (blau) der Kaolinprobe unter triaxialen Bedingungen

Abbildung 3 zeigt des Weiteren die untersuchten mittleren Spannungsverhältnisse $\eta^{av} = Q^{av}/P^{av} = 0,00; 0,11$ und $0,24$ für einen isometrischen mittleren Druck $P^{av} = 346$ kPa (Gehring, 2020). Dabei wurden in jedem der untersuchten Spannungszustände Spannungszyklen in sechs verschiedene Richtungen aufgebracht (siehe Abbildung 5). Die Spannungsamplituden wurden so gewählt, um Dehnungen im Bereich von $\varepsilon \approx 10^{-4}$ zu erhalten (siehe Abbildung 6).

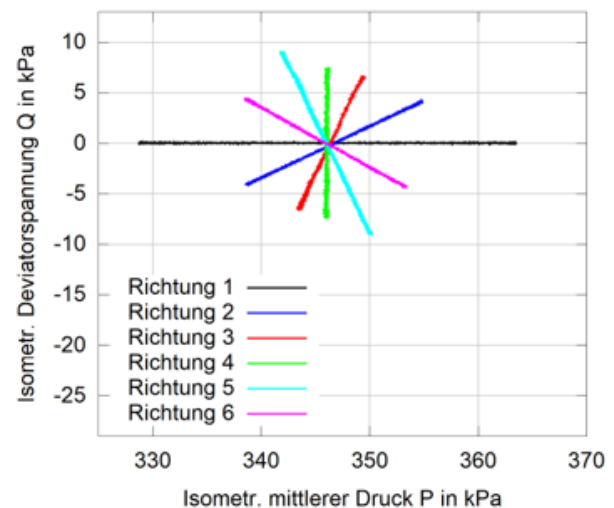


Abbildung 4: Aufgebrachte Spannungspfade in sechs verschiedene Richtungen für den untersuchten mittleren Spannungszustand $\eta^{av} = 0$.

Zur Beurteilung der gemessenen Dehnungspfade werden die isometrischen Variablen der volumetrischen Dehnung $\varepsilon_p = 1/\sqrt{3} \cdot \varepsilon_p$ mit $\varepsilon_p = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$ und der deviatorischen Dehnung $\varepsilon_Q = \sqrt{2/3} \cdot \varepsilon_q$ mit $\varepsilon_q =$

$2/3(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$ verwendet. Die Dehnungspfade der Richtungen 1 bis 6 in Abbildung 4 zeigen hierbei nur geringe hysteretische Effekte, woraus sich auf eine nahezu rein elastische Materialantwort schließen lässt. Ein ähnliches Verhalten wurde für die Dehnungspfade in den Versuchen mit den Spannungsverhältnissen $\eta^{av} = Q^{av}/P^{av} = 0,11$ und $0,24$ erhalten.

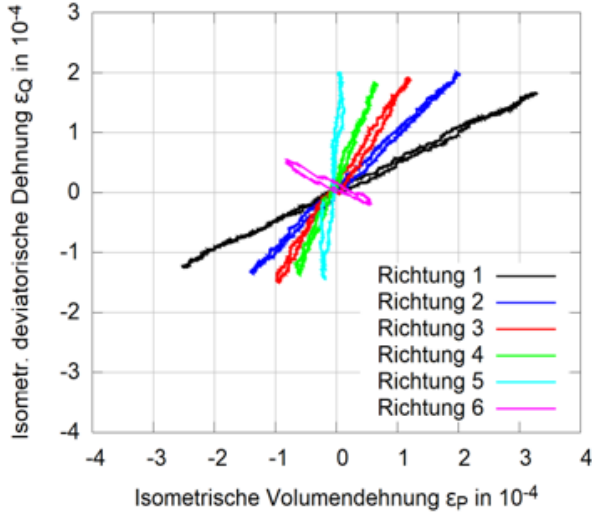


Abbildung 4: Gemessene Dehnungspfade in sechs verschiedene Richtungen für den untersuchten mittleren Spannungszustand $\eta^{av} = 0$.

2.3 Versuchsauswertung

Die elastische Steifigkeit bei kleinen Dehnungen kann auf verschiedene Weise abgeleitet werden. Eine Sekantensteifigkeit ergibt sich als Verhältnis der Spannungsamplitude zur Dehnungsamplitude. Aufgrund der erhaltenen rein elastischen Dehnungspfade kann die Steifigkeit aus den gemessenen Spannungs- und Dehnungsspanweiten ermittelt werden. Zur Ermittlung des inkrementellen elastischen Steifigkeitstensors werden die Anteile der Dehnungsspanweite

$$\Delta\varepsilon = \sqrt{(\Delta\varepsilon_P)^2 + (\Delta\varepsilon_Q)^2} \quad (1)$$

und der Spannungsspanweite

$$\Delta\sigma = \sqrt{(\Delta P)^2 + (\Delta Q)^2} \quad (2)$$

entsprechend Abbildung 5 und 6 verwendet. Dabei werden die Anteile ΔP und ΔQ sowie $\Delta\varepsilon_P$ und $\Delta\varepsilon_Q$ ausgehend von den Umkehrpunkten der Schleifen im Spannungs- und Dehnungsraum bestimmt und mit

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{PP} & E_{PQ} \\ E_{QP} & E_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_P \\ \Delta\varepsilon_Q \end{bmatrix} \quad (3)$$

die Komponenten des Steifigkeitstensors E_{PP} , E_{PQ} , E_{QP} und E_{QQ} ermittelt.

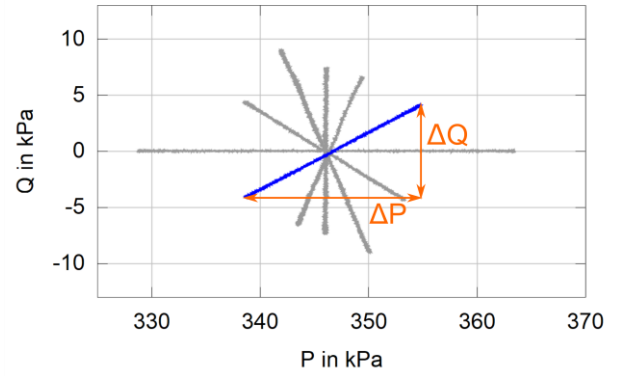


Abbildung 5: Zerlegung eines Spannungspfades (blau) in dessen inkrementelle Anteile ΔP und ΔQ .

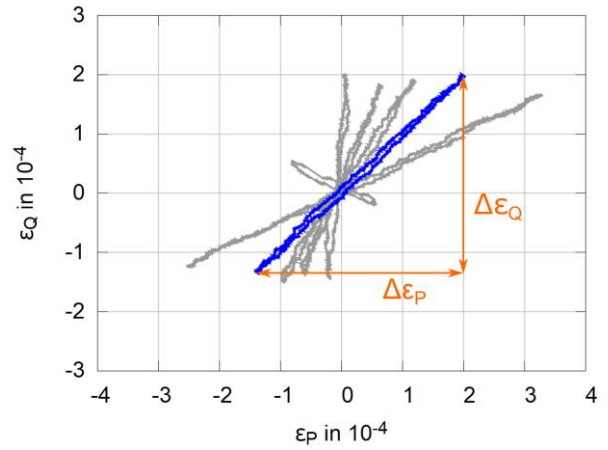


Abbildung 6: Zerlegung eines Dehnungspfades (blau) in dessen inkrementelle Anteile $\Delta\varepsilon_P$ und $\Delta\varepsilon_Q$.

Da es bei sechs verschiedenen Spannungsrichtungen, die mit den Zyklen aufgebracht wurden, mehr Gleichungen als Unbekannte gibt, wird die Steifigkeit anhand des Fehlers zwischen approximiertem Wert und den Laborergebnissen wie in (Niemunis & Loges, 2015) bestimmt. Der Fehler wird als Summe über alle Paare von Umkehrpunkten m definiert:

$$F = \sum_m (\Delta\sigma_A - E_{AB}\Delta\varepsilon_B)(\Delta\sigma_B - E_{AC}\Delta\varepsilon_C) \quad (4)$$

Dabei ist:

- $\Delta\sigma_A$: Differenz der Spannungen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Umkehrpunkten, mit den Komponenten: $\Delta\sigma_A = (\Delta P_m, \Delta Q_m)^T$
- $\varepsilon_A, \varepsilon_B, \varepsilon_C$: Differenz der Spannungen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Umkehrpunkten, mit den Komponenten: $\Delta\varepsilon = (\Delta\varepsilon_{P,m}, \Delta\varepsilon_{Q,m})^T$
- E_{AB}, E_{AC} : Unbekannte Steifigkeit mit den Komponenten $E_{PP}, E_{PQ}, E_{QP}, E_{QQ}$

Für das Minimum des Fehlers ist folgende Bedingung notwendig:

$$\frac{\partial F}{\partial E_{AB}} = -2 \sum_m \Delta \varepsilon_B (\Delta \sigma_A - E_{AC} \Delta \varepsilon_C) = 0 \quad (5)$$

Aus Gleichung (5) folgt für die Steifigkeit:

$$E_{AC} = [\sum_m \Delta \varepsilon_C \Delta \varepsilon_B]^{-1} [\sum_m \Delta \varepsilon_C \Delta \sigma_A] \quad (6)$$

Die Komponenten des elastischen Steifigkeitstensors für die drei untersuchten Spannungszustände sind in Tabelle 1 dargestellt.

P^{av} kPa	Q^{av} kPa	E_{PP} kPa	E_{PQ} kPa	E_{QP} kPa	E_{QQ} kPa
346,3	0,0	72009	-28929	-31264	57147
346,2	40,9	82358	-29016	-24850	63849
345,2	81,6	79150	-32945	-30469	50675

Tabelle 1: Ermittelte Komponenten des elastischen Steifigkeitstensors für die untersuchten Spannungszustände mit den Komponenten P^{av} und Q^{av}

2.4 Darstellung des elastischen Steifigkeitstensors als Antwortpolaren

Die Komponenten des inkrementellen elastischen Steifigkeitstensors, der für einen bestimmten mittleren Spannungszustand abgeleitet wurde, werden nun für eine grafische Darstellung in Form von Antwortpolaren verwendet. Abbildung 7 zeigt schematisch das Prinzip der Erstellung einer Polare. Der Mittelpunkt einer Antwortpolare fällt mit dem mittleren Spannungszustand im Versuch zusammen. Die Punkte auf den Antwortpolaren, die rein deviatorischen oder rein volumetrischen Dehnungszyklen entsprechen, sind durch rote bzw. blaue Punkte markiert. Der kreisförmige Dehnungspfad mit dem Radius ist dabei gekoppelt über die Steifigkeit mit der Antwortpolare im P - Q -Spannungsraum.

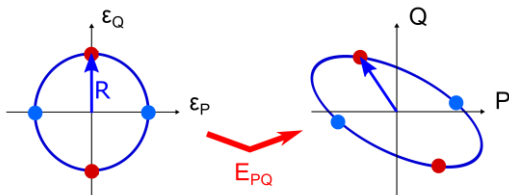


Abbildung 7: Prinzip der Darstellung einer Steifigkeit mittels einer Antwortpolare im P - Q -Spannungsraum

Die ermittelten Steifigkeiten aus den Versuchen sind in Abbildung 8 in Form von Antwortpolaren dargestellt. Alle Polaren, insbesondere auch im isotropen Spannungszustand mit $Q = 0$, weisen eine Drehung auf. Dieses Verhalten liegt in der inhärenten Anisotropie begründet, welche in Abschnitt 3.2 näher erläutert wird.

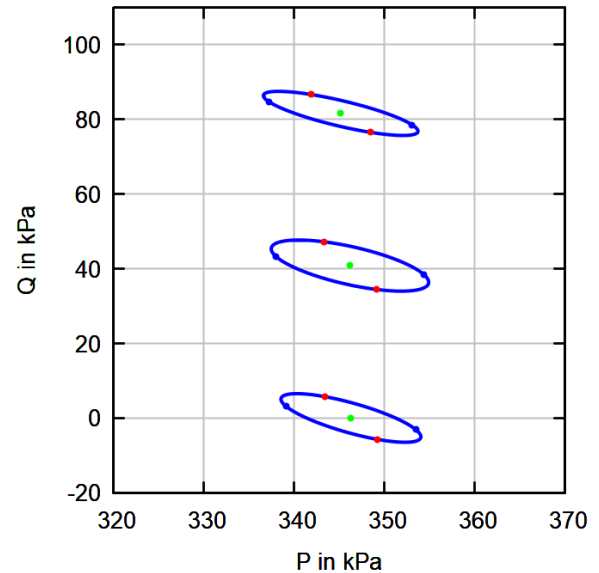


Abbildung 8: Antwortpolaren von Kaolin im P - Q -Spannungsraum für einen Dehnungskreis mit dem Radius $R = 1 \cdot 10^{-4}$ entsprechend Abbildung 7.

3 Numerische Beschreibung

3.1 Hyperelastizität

Es gibt verschiedene Stoffmodellfamilien, mit denen das elastische Bodenverhalten beschrieben werden kann. Einige dieser Stoffmodellfamilien sind in ihrer Formulierung nicht thermodynamisch konform. Bei geschlossenen Dehnungsschleifen kann die Erhaltung der Spannung oder der Energie nicht gewährleistet werden (vgl. Abbildung 9).

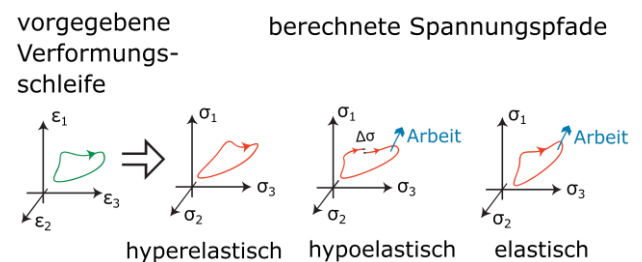


Abbildung 9: Stoffmodellfamilien im Vergleich - Erfüllung der Erhaltungssätze. Modifiziert nach (Prada Sarmiento, 2011)

Im Falle einer elastischen Formulierung mit der Spannung als einfacher Funktion der Dehnung ist die Erhaltung der Spannung gegeben, die Energieerhaltung aber nicht gewährleistet. Ein Stoffmodell, das einen hypoelastischen Steifigkeitstensor anwendet, kann eine Akkumulation sowohl der Spannung als auch der Energie hervorrufen (Prada Sarmiento, 2011). Das Konzept der Hyperelastizität dagegen verspricht eine thermodynamische Konformität mit Erhaltung der Spannung und der Energie. Falls nicht-

monotone Belastungspfade auftreten, bietet die Hyperelastizität daher den Vorteil, das Bodenverhalten bei Zyklen akkurat abzubilden.

Bei Verwendung einer hyperelastischen Beschreibung wird nicht direkt eine Funktion zur Berechnung der Steifigkeit entwickelt, sondern diese aus einer Energiefunktion, dem sogenannten Potential $\psi(\varepsilon_{ij})$, hergeleitet. Zweckmäßiger ist die Verwendung eines komplementären Potentials $\bar{\psi}(\sigma_{ij})$, das als skalare Funktion das Energieniveau in Abhängigkeit der Spannung beschreibt. Aus der komplementären Potentialfunktion lässt sich mittels zweimaligen Differenzierens die Nachgiebigkeit, die Inverse der Steifigkeit, in jedem Spannungszustand ableiten. Zur Beschreibung der Steifigkeit des Bodens ist also eine Funktion $\bar{\psi}$ gesucht, für die gilt:

$$\frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial \sigma_{ij} \partial \sigma_{kl}} = C_{ijkl} = E_{ijkl}^{-1} \quad (7)$$

Die Potentialfunktion soll abhängig vom Spannungszustand sein und mit verschiedenen konstanten Parametern als Materialeigenschaften kalibriert werden können. Eine Materialeigenschaft, mit der das Potential beschrieben wird, ist die Homogenitätsordnung n . Diese beschreibt den Grad der Abhängigkeit der Steifigkeit von der Spannung. Bei Tonen wird dieser Grad von (Smolczyk, 1992) als ungefähr eins angegeben:

$$E_{ijkl}(a \cdot p) = a^n \cdot E_{ijkl}(p) \quad \text{für Tone: } n \approx 1 \quad (8)$$

3.2 Berücksichtigung der Anisotropie

Zylindrische Kaolinproben, die vertikal zur Sedimentationsachse ausgestochen werden, weisen ein axialsymmetrisches Materialverhalten zur Zylinderachse auf. Die Steifigkeit senkrecht zur Sedimentationsrichtung ist größer als die Steifigkeit parallel zur Sedimentationsrichtung und damit anisotrop. Die anisotrope Steifigkeit eines Materials kann spannungsinduziert sein, das heißt, aufgrund einer höheren vertikalen Spannung (die Steifigkeit ist spannungsabhängig) ist auch die Steifigkeit in vertikaler Richtung höher. Kaolin verhält sich auch bei einer isotropen Spannung anisotrop – es besitzt eine sogenannte inhärente Anisotropie. Das ist auch an den Antwortpolaren zu erkennen: Auch die Polare im isotropen Spannungszustand ($Q = 0$) weist eine Drehung auf (vgl. Abbildung 8).

Im Gegensatz zur spannungsinduzierten Anisotropie kann die in Abschnitt 3.3 verwendete Potentialfunktion die inhärente Anisotropie nicht direkt abbilden. Dies ist beim Vergleich von Laborergebnissen und dem Modell ohne Verwendung des Anisotropieten-

sors gut zu erkennen (vgl. Abbildung 10), da die Drehung der Polare im isotropen Spannungszustand nicht nachgebildet werden kann.

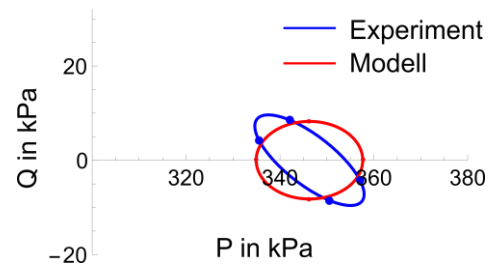


Abbildung 10: Vergleich von Laborergebnissen und Modell anhand von Antwortpolaren ohne die Berücksichtigung der inhärenten Anisotropie

Um die inhärente Anisotropie dennoch berücksichtigen zu können, wird die aus der Potentialfunktion erhaltene isotrope Steifigkeitsmatrix \mathbf{E} mithilfe des Anisotropietensors \mathbf{Q} nach (Graham & Houlsby, 1983) in die anisotrope Steifigkeitsmatrix \mathbf{H} überführt:

$$\mathbf{E}_{trans} = \mathbf{H} = \mathbf{Q} : \mathbf{E} : \mathbf{Q} \quad (9)$$

Analog kann auch die Nachgiebigkeit mithilfe der Inversen des Anisotropietensors transformiert werden:

$$\mathbf{C}_{trans} = \mathbf{Q}^{-1} : \mathbf{C} : \mathbf{Q}^{-1} \quad (10)$$

Der Anisotropietensor ist abhängig von der Sedimentationsrichtung $m = [1, 0, 0]$ und dem Anisotropieeffizienten α , der das Verhältnis zwischen den horizontalen und vertikalen Materialparametern darstellt:

$$\alpha = \frac{G_h}{G_v} = \sqrt{\frac{E_h}{E_v}} \quad (11)$$

Mit diesen Eigenschaften ergibt sich der Anisotropietensor zu:

$$Q_{ijkl} = \mu_{ik}\mu_{jl} \quad \text{mit } \mu_{ij} = \sqrt{\alpha}\delta_{ij} + (1 - \sqrt{\alpha})m_i m_j \quad (12)$$

Für die Drehung des hier verwendeten Potentials wurde ein Anisotropiefaktor von $\alpha = 1,8$ für Kaolin berücksichtigt.

3.3 Kalibrierung einer Potentialfunktion

(Knittel, et al., 2020) entwickelten und kalibrierten eine hyperelastische Potentialfunktion für Sand. Für feinkörnige Böden stand eine experimentelle Untersuchung bisher aus. (Niemunis & Cudny, 1998) stellten theoretische Überlegungen zu einer hyperelastischen Potentialfunktion für Ton an. Dabei entwickelten sie auch einen neuen Term, der in folgender modifizierter Form kalibriert wurde:

$$\bar{\psi} = C_1 \frac{Q}{P} + C_2 \sqrt{Q} + C_4 P(1 - \ln(-P)) \quad (13)$$

Die obige Potentialfunktion ist abhängig von drei zu kalibrierenden Parametern (C_1, C_2, C_3) sowie den Spannungsinvarianten $P = \sigma_{ij}$ und $Q = \sigma_{ij}\sigma_{ij}/2$.

Für die Kalibrierung wird ein Fehler F aus den quadratischen Differenzen aller Komponenten der isometrischen Steifigkeit zwischen dem Modell E_{PQ}^M und aus den experimentellen Laborwerten E_{PQ}^E definiert:

$$F = \sum_m (E_{PP}^M - E_{PP}^E)^2 + 2(E_{PQ}^M - E_{PQ}^E)^2 + (E_{QQ}^M - E_{QQ}^E)^2 \quad (14)$$

Die Aufsummierung erfolgt dabei über jeden untersuchten Spannungszustand m für jedes E^M und E^E . Da die aus dem Modell (der Potentialfunktion) abgeleiteten Steifigkeitsmatrizen immer symmetrisch sind, wird als Vergleich zur Steifigkeitskomponente $E_{PQ}^M = E_{QP}^M$ aus dem Modell der Mittelwert der beiden Diagonaleinträge aus dem Experiment $\frac{1}{2}(E_{PQ}^E + E_{QP}^E)$ herangezogen. Der Fehler wird mit der MATHEMATICA-Funktion *Nminimize* minimiert und die Parameter bestimmt. Der Anisotropiefaktor α wird dabei manuell angepasst. Die ermittelten Parameter sind in Tabelle 2 aufgeführt.

α	C_1	C_2	C_3
1,8	0,881	$1,19 \cdot 10^{-3}$	$-2,18 \cdot 10^{-2}$

Tabelle 2: Kalibrierte Parameter der hyperelastischen Potentialfunktion für Kaolin

Das Ergebnis der Kalibrierung ist in Abbildung 11 dargestellt. Der Vergleich zwischen den experimentell ermittelten Steifigkeiten und den mit der Potentialfunktion ermittelten Steifigkeiten anhand von Antwortpolaren für ein Dehnungsincrement von $1,5 \cdot 10^{-4}$ zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen den Laborergebnissen und dem numerischen Modell. Dank der Verwendung des Anisotropietensors Q (vgl. Abschnitt 3.2) kann auch die Drehung der Polare im isotropen Spannungszustand gut nachgebildet werden.

Mit der Kalibrierung einer geeigneten Potentialfunktion ist hiermit der Grundstein für eine Verbesserung von Stoffmodellen für feinkörnige Böden gelegt. Für eine Verwendung zur Erstellung von Verformungsprognosen muss die hyperelastische Beschreibung in ein hochwertiges Stoffmodell, wie beispielsweise das AVISA Modell von (Tafili & Triantafyllidis, 2020) implementiert werden. Damit kann eine realistischere Berechnung von komplexen geotechnischen Bauwerken erreicht und so ihre Planung verbessert werden.

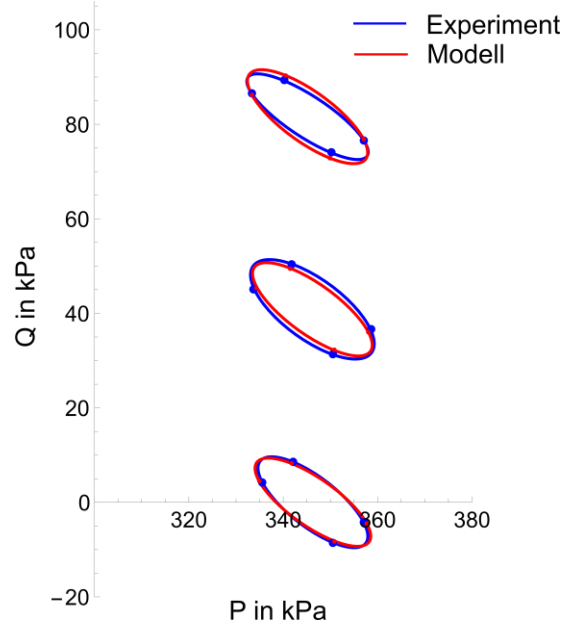


Abbildung 11: Vergleich der ermittelten Steifigkeiten aus Experiment und Modell in Form von Antwortpolaren für ein Dehnungsincrement von $1,5 \cdot 10^{-4}$.

Literaturverzeichnis

- Gehring, S. (2020). *Fortgesetzte Untersuchungen zur hyperelastischen Steifigkeit von Ton. Masterarbeit.* Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (KIT)
- Graham, J., & Houlsby, G. (1983). *Anisotropic elasticity of a natural clay.* Géotechnique, 33(2), S. 165-180.
- Knittel, L., Wichtmann, T., Niemunis, A., Huber, G., Espino, E., & Triantafyllidis, T. (2020). *Pure elastic stiffness of sand represented by response envelopes derived from cyclic triaxial tests with local strain measurements.* Acta Geotechnica, 15(4); S.2075-2088.
- Niemunis, A., & Cudny, M. (1998). *On hyperelasticity for clays.* Computers and Geotechnics, 23, S. 221-236.
- Niemunis, A., & Loges, I. (06 2015). *Neohypoplasticity – estimation of small strain stiffness.* Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics(77), S. 163–180.
- Prada Sarmiento, L. (2011). *Paraelastic description of small strain soil behavior.* Dissertation. Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (KIT)
- Smolczyk, U. (1992). *Grundbau-Taschenbuch, Teil 1, Tabelle 1.* W. Ernst und Sohn.
- Tafili, M., & Triantafyllidis, T. (2020). *AVISA: Anisotropic Visco ISA model and its performance at cyclic loading.* Acta Geotechnica, 15:, S. 2395-2413.