

Kurzfassung

Die Wahl eines passenden Materialmodells, welches in der Lage ist, das Bodenverhalten realistisch darzustellen, hat einen maßgeblichen Einfluss auf die bei Finite-Elemente Berechnungen erhaltenen Ergebnisse. In dieser Arbeit wird das Verhalten der *Barodesie für Ton* in Bezug auf die Wiederbelastung behandelt. Die Barodesie ist ein Materialmodell, das auf dem asymptotischen Verhalten des Bodens beruht und gut zur Abbildung monotonen Materialverhaltens geeignet ist. Es zeigen sich jedoch, wie auch bei hypoplastischen Modellen, Schwächen bei der Modellierung des Wiederbelastungsverhaltens. Im Zuge dieser Arbeit wurden Ansätze zur verbesserten Modellierung des Wiederbelastungsverhaltens mit der *Barodesie für Ton* entwickelt. Zur Berücksichtigung der Steifigkeit für (sehr) kleine Verzerrungen wurde das Konzept der *intergranularen Dehnung* adaptiert, womit dieses direkt mit der Barodesie verwendet werden kann. Zusätzlich wurde ein Ansatz entwickelt, mit welchem die Überkonsolidierung des Bodens in Bezug auf *asymptotische Zustände* berücksichtigt werden kann. Dies wird zur Anpassung der Steifigkeit im Zuge der Wiederbelastung verwendet.

Des Weiteren wurden Subroutinen zur Anwendung der Barodesie bei Finite-Elemente Berechnungen entwickelt. Ein Fokus liegt dabei auf der Anwendung des Konzepts der intergranularen Dehnung zur verbesserten Verformungsprognose. Ein weiterer Punkt ist die Ermittlung der globalen Standsicherheit durch *Festigkeitsreduktion*. Hierfür wurde ein Projektionsverfahren eingeführt, welches eine robustere Abschätzung der globalen Standsicherheit ermöglicht. Mit den entwickelten Finite-Elemente Routinen wurden Vergleichsrechnungen durchgeführt, in welchen die Einflüsse der implementierten Adaptierungen auf typische geotechnische Problemstellungen untersucht wurden.

Abstract

The choice of a suitable material model, which is able to represent the soil behavior realistically, has a significant influence on the results obtained in finite-element calculations. This work deals with the extension of *barodesy for clay* to improve the reloading behaviour. Barodesy is a constitutive model that is based on the asymptotic behaviour of the soil and that is well suited for monotonic deformations. However, as with hypoplastic models, there are shortcomings in the modeling of the reloading behavior. As part of this work, approaches for improved modeling of the reloading behavior with barodesy for clay were developed. To account for the small strain stiffness of the soil, the *intergranular strain* concept was adapted to allow its direct application with barodesy. In addition, an approach was developed to account for the overconsolidation of the soil with respect to *asymptotic states*. This is employed to allow for a better prediction of the reloading stiffness.

In addition, subroutines for the application of barodesy in finite-element calculations have been developed. One focus in this area is the application of the intergranular strain concept for an improved prediction of the deformation. Another issue deals with the determination of the overall stability by means of *strength reduction*. For this purpose, a projection method was introduced, which allows a more robust estimation of the overall stability. The influences of the developed finite element routines are investigated by comparative calculations of typical geotechnical problems.

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Für die Behandlung vieler geotechnischer Problemstellungen werden numerische Lösungsverfahren verwendet. Um hierbei möglichst realitätsnahe Aussagen treffen zu können, ist es unter anderem sehr wichtig, das Materialverhalten des Bodens korrekt abzubilden. Die Entwicklung passender Materialmodelle ist ein großes Forschungsgebiet in der Bodenmechanik. Es werden die verschiedensten Aspekte des Bodenverhaltens untersucht und Modelle speziell dahingehend entwickelt, das jeweilige Verhalten zu modellieren. Somit stehen heute eine Vielzahl an Materialmodellen zur Verfügung, welche mit ihren jeweiligen Stärken und Schwächen entsprechend für eine jeweilige Problemstellung geeignet sind. Dabei werden in der Bodenmechanik verschiedene Wege und Modellierungsansätze verfolgt [46]. In dieser Arbeit wird die Weiterentwicklung der Barodesie für Ton [84] in Bezug auf das Wiederbelastungsverhalten behandelt. Bei der Barodesie handelt es sich um eine Gruppe von Materialmodellen, welche aus der Entwicklung hypoplastischer Materialmodelle entstanden ist [63]. Die Untersuchungen und Entwicklungen in dieser Arbeit sollen dabei helfen, das Steifigkeitsverhalten der Wiederbelastung realistischer zu modellieren. Hierfür werden zum einen die Effekte der Steifigkeitserhöhung zufolge einer (sprunghaften) starken Verformungsänderung (*small strain stiffness*) und zum anderen der Einfluss der Überkonsolidierung und der asymptotischen Zustände des Bodens betrachtet.

Es gibt viele unterschiedliche Herangehensweisen an die Materialmodellierung in der Bodenmechanik und die dabei verfolgten Ansätze unterscheiden sich teilweise stark. Dennoch ist es wichtig, auch die Aspekte anderer Entwicklungsgruppen zu betrachten. Nur so ist es möglich, dass den Fortschritten in anderer Bereiche zu profitiert werden kann. Daher sollen die in dieser Arbeit entwickelten Ansätze nicht nur für die Barodesie für Ton anwendbar sein, sondern es soll eine leichte Kombination mit anderen Modellen ermöglicht werden. Nur durch diesen Erfahrungsaustausch ist es möglich, das Verständnis bodenmechanischer Prozesse zu stärken und effiziente Modellierungsansätze zu entwickeln. Auch wenn einige Entwicklungen zu Beginn nicht zielführend

oder zu komplex erscheinen, werden viele Erkenntnisse auch Jahre später noch aufgegriffen und helfen bei der Ideenfindung effizienterer Ansätze. Somit ist es über die Jahre gelungen eine Vielzahl an hochwertigen und effizienten Modellierungsansätzen zu entwickeln.

Ein wichtiges Ziel der Forschung an hochwertigen Materialmodellen sollte auch der Weg von der reinen Grundlagenforschung zur Lösung praktischer Anwendungen sein. Hierfür muss ein Kompromiss zwischen einer möglichst perfekten Abbildung der bodenmechanischen Prozesse und der Möglichkeit der praktischen Kalibrierung und der Anwendbarkeit der Modelle gefunden werden. Aus diesem Grund werden die hier vorgestellten Ansätze und Entwicklungen nicht nur anhand von Elementversuchen untersucht, sondern es wird auch der Einfluss der Entwicklungen auf realitätsnahe Problemstellungen betrachtet.

Es ist ein weiter Weg von der rein theoretischen Materialmodellierung zu einer praxistauglichen Anwendbarkeit. Daher sind auch die in dieser Arbeit vorgestellten Anwendungsfälle und FE-Berechnungen reine fiktive Beispiele und theoretischer Natur. Dennoch soll die Demonstration der Anwendungsmöglichkeiten höherwertiger Materialmodelle den Weg in Richtung der praktischen Anwendbarkeit vorbereiten. Die Möglichkeit diese Modelle und die dafür entwickelten Ansätze direkt, in gängigen Programmen verwenden zu können, ohne dass diese erst mühsam selbständig programmiert werden müssen, senkt die Hemmschwelle, diese auch tatsächlich anzuwenden.

Aus dem Vergleich der Leistungsfähigkeit verschiedener Ansätze lassen sich die Vorteile mehrerer Entwicklungswege effizient nutzen und weiterentwickeln. Nicht jeder Forschung muss jedoch das Ziel der praktischen Anwendbarkeit zugrunde liegen. Viele Ansätze dienen rein dem Prozessverständnis und helfen der späteren Entwicklung neuer Konzepte.

Im Zuge dieser Arbeit werden die folgenden Themen behandelt:

- Entwicklung von FE-Subroutinen zur Anwendung der Barodesie
- Adaptierung des Konzepts der intergranularen Dehnung zur Berücksichtigung der Steifigkeit für kleine Verzerrungen
- Einführung eines Abbruchkriteriums zur Reduktion des Überschreitens zulässiger Zustände mit der intergranularen Dehnung
- Entwicklung eines Konzepts zur Abstandsmessung zur asymptotischen State Boundary Surface und Anwendung dieses Konzepts zur Modellierung der Wiederbelastung

- Erweiterter Ansatz zur Parameterreduktion bei der Ermittlung der Standsicherheit
- Untersuchung über die Wirksamkeit der entwickelten Ansätze in FE-Anwendungen

1.2 Publikationsliste

Die nachfolgend aufgelisteten Publikationen sind Bestandteil dieser kumulativen Dissertation und werden in den jeweiligen Kapiteln direkt in die Arbeit eingebunden. Zusätzlich wird eine kurze Zusammenfassung des Inhalts und eine Übersicht über die Beiträge der einzelnen Autorinnen und Autoren gegeben.

Artikel I M. Bode, F. Schranz, G. Medicus, W. Fellin (2019), Vergleich unterschiedlicher Materialmodelle an einer Aushubsimulation. *geotechnik*, 42(1): 11-20.

Artikel II M. Bode, W. Fellin, D. Mašín, G. Medicus, A. Ostermann (2020), An intergranular strain concept for material models formulated as rate equations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 44(7): 1003-1018.

Artikel III M. Bode, W. Fellin, G. Medicus (2021), Reloading in Barodesy employing the asymptotic state boundary surface. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 45:2113-2129.

Artikel IV M. Bode, G. Medicus, W. Fellin (2020), Erweiterte Anwendung der Barodesie für Finite-Elemente Berechnungen. *geotechnik* 43(4): 262-274.

Artikel V (Beitrag in Proceedingband) G. Medicus, M. Bode, F. Tschuchnigg, B. Schneider-Muntau (2021), Plane Strain Failure for Different Constitutive Models. In: Barla M., Di Donna A., Sterpi D. (eds) *Challenges and Innovations in Geomechanics*, 498-506, Cham, Springer International Publishing.

1.3 Überblick

Um einen strukturierten Aufbau des Inhalts der Arbeit zu ermöglichen, werden einige Informationen aus den zugrundeliegenden Artikeln vorweggenommen und in den jeweiligen Kapiteln in einem passenden Rahmen präsentiert. Dieser Aufbau führt dazu, dass einige Definitionen und Abbildungen sowohl im Rahmenwerk als auch in den einzelnen Publikationen vorhanden sind. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die einzelnen Artikel in sich geschlossene Arbeiten darstellen und nicht immer eindeutig einem Kapitel zugewiesen werden können. Die hier verwendete Vorgehensweise soll jedoch einen besseren Lesefluss und ein besseres Verständnis der vorgestellten Inhalte ermöglichen. Dies ermöglicht es, einzelne Themen ausführlicher zu behandeln, als es in den jeweiligen Artikeln der Fall ist. Der inhaltliche Aufbau dieser Arbeit ist wie folgt:

In Kapitel 2 werden einige bodenmechanische Begriffe und Grundlagen vorgestellt, welche in dieser Arbeit verwendet werden. Zusätzlich werden drei weitere Materialmodelle und deren grundlegende Eigenschaften vorgestellt.

Das dritte Kapitel umfasst die Grundlagen des Materialmodells Barodesie für Ton [84]. Hier wird ein Blick auf das grundlegende Materialverhalten geworfen, das mit der Barodesie abgebildet wird. Der Fokus liegt hier, neben einer allgemeinen Vorstellung des Modells, auf der Modellierung asymptotischer Zustände [83]. Die asymptotische State Boundary Surface (ASBS) der Barodesie ist eine wichtige Grundlage der im Zuge dieser Arbeit entwickelten Ansätze und Erweiterungen. Hier wird ein Ablauf präsentiert, mit welchem Zustände außerhalb der ASBS identifiziert werden können. Ein weiterer Bestandteil des Kapitels ist die Implementierung der Barodesie in Benutzersubroutinen zur Anwendung in Finite-Elemente (FE) Programmen. Der grundlegende Aufbau der FE-Subroutine wird vorgestellt. Die Anwendbarkeit der Barodesie bei Finite-Elemente Berechnungen wird in Artikel I anhand von Vergleichsrechnungen mit unterschiedlichen Materialmodellen präsentiert.

Im vierten Kapitel wird die Modellierung des Wiederbelastungsverhaltens untersucht. In einem ersten Schritt werden unterschiedliche Ansätze und Herangehensweisen zur Modellierung des Wiederbelastungsverhaltens betrachtet. In Artikel II wird die Barodesie mit dem Konzept der intergranularen Dehnung [91] kombiniert, damit das Verhalten der Steifigkeitserhöhung bei zyklischen Belastungen berücksichtigt wird. Zusätzlich wird der Einfluss der Überkonsolidierung und der Abstand des aktuellen Zustandes zur ASBS auf das Wiederbelastungsverhalten betrachtet. Hierfür wird in Artikel III ein Ansatz vorgestellt, mit welchem dieser Einfluss in der Barodesie berücksichtigt werden kann, um die Steifigkeit bei der Wiederbelastung realistischer abzubilden.

Das fünfte Kapitel umfasst erweiterte Anwendungsmöglichkeiten der Barodesie bei Finite-Elemente Berechnungen. Dabei werden in Artikel IV die Ermittlung der Standsicherheit mittels Parameterreduktion und der Einfluss der intergranularen Dehnung auf die Verformungsprognose untersucht. In Artikel V wird der Einfluss des Materialmodells und des zugrundeliegenden Versagenskriteriums auf Festigkeitsprognosen im ebenen Verzerrungszustand betrachtet.

1.4 Verwendete Notation

Die in dieser Arbeit verwendete Notation unterscheidet sich in einigen Fällen von der Notation in den eingebundenen Artikeln. Im Folgenden werden nur die Bezeichnungen aufgeführt, welche im Rahmenwerk verwendet werden. Spannungen und Verzerrungen werden in der mechanischen Vorzeichenkonvention angegeben. Es werden nur effektive Spannungen betrachtet, daher wird der oft verwendete Apostroph zur Kennzeichnung effektiver Spannungen weggelassen. Der Tensor der effektiven Cauchy Spannung wird mit \mathbf{T} bezeichnet. Die Hauptspannungen werden mit T_1 , T_2 und T_3 angegeben. Die Reihenfolge der Hauptspannungen ist, sofern nicht anders definiert, ohne Bedeutung. Die objektiven Spannungsrate wird mit $\dot{\mathbf{T}}$ bezeichnet. Der Tensor der Deformationsrate \mathbf{D} ist der symmetrische Teil des Geschwindigkeitsgradienten. Die Verzerrungen werden mit $\boldsymbol{\varepsilon}$ bezeichnet mit den dazugehörigen Hauptverzerrungen $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ und ε_3 . Für Quaderverformungen entspricht die Deformationsrate \mathbf{D} der Zeitableitung der logarithmischen Verzerrungen $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{d\boldsymbol{\varepsilon}}{dt}$ und $\dot{\mathbf{T}} = \dot{\mathbf{T}}$.

Von einem Tensor 2. Ordnung \mathbf{X} lassen sich die Norm $\|\mathbf{X}\| = \sqrt{\text{tr } \mathbf{X}^2}$ und der normierte Tensor $\mathbf{X}^0 = \frac{\mathbf{X}}{\|\mathbf{X}\|}$ ermitteln. Die Spur eines Tensors 2. Ordnung ist $\text{tr } \mathbf{X} = X_{11} + X_{22} + X_{33}$. Ein symmetrischer Tensor 2. Ordnung kann als Vektor mit seinen Hauptwerten $\mathbf{X}_V = [X_1, X_2, X_3]$ ausgedrückt werden. Der Vektor \mathbf{X}_V^0 stellt somit eine Richtung in einem Raum mit den Eigenwerten als Koordinaten des Tensors dar. In diesem Sinne wird \mathbf{X}^0 im Folgenden vereinfacht ebenfalls als Richtung bezeichnet. Dies dient in einigen Grafiken zur Darstellung von Tensoren und Tensoroperationen, ohne dort explizit die Bezeichnung \mathbf{X}_V zu verwenden. Tensoren 4. Ordnung werden über fettgedruckte kalligraphische Buchstaben (z.B. \mathcal{M}) dargestellt. Es werden folgende Tensoroperationen, unter Verwendung der Einstein'schen Summationskonvention benötigt, wobei die Indizes der lexikographischen Ordnung folgen: $\mathbf{X} \otimes \mathbf{Y} = X_{ij}Y_{kl}$, $\mathbf{X} : \mathbf{Y} = X_{ij}Y_{ij}$, $\mathbf{X}\mathbf{Y} = X_{ij}Y_{ki}$ und $\mathcal{L} : \mathbf{D} = \mathcal{L}_{ijkl}D_{kl}$. Zusätzlich werden der Einheitstensor 2. Ordnung \mathbf{I} mit $I_{ij} = \delta_{ij}$ und der Tensor 4. Ordnung \mathcal{I} mit $\mathcal{I}_{ijkl} = \delta_{ik}\delta_{jl}$ benötigt, wobei δ_{ij} das Kronecker-Delta (mit $\delta_{ij} = 1$ für $i = j$ und $\delta_{ij} = 0$ für $i \neq j$) bezeichnet.

Die Größe $\text{tr } \mathbf{D}^0$ wird als Maß für die Dilatanz verwendet. Die volumetrischen Verzerrungen sind $\varepsilon_{\text{vol}} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ und die deviatorischen Verzerrungen

$$\varepsilon_q = \sqrt{\frac{2}{9} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]}. \quad (1.1)$$

Spannungszustände lassen sich über die Roscoe Invarianten $p = -\frac{1}{3}\text{tr } \mathbf{T}$ und

$$q = \sqrt{\frac{1}{2} [(T_1 - T_2)^2 + (T_2 - T_3)^2 + (T_3 - T_1)^2]} \quad (1.2)$$

darstellen.

Für axialsymmetrische triaxiale Kompressionszustände mit T_1 als Axialspannung und $T_2 = T_3$ als Radialspannung gelten folgende Vereinfachungen:

$$\begin{aligned} q &= -(T_1 - T_3) \\ \varepsilon_q &= -\frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \end{aligned} \quad (1.3)$$

Der Schubmodul G wird hier als Tangentenmodul angegeben:

$$G = \frac{\dot{T}_1 - \dot{T}_3}{2(D_1 - D_3)}. \quad (1.4)$$

Die Porenzahl e ist das Verhältnis des Porenvolumens zum Kornvolumen und steht über die Entwicklungsgleichung $\dot{e} = (1 + e)\text{tr } \mathbf{D}$ in Beziehung zur Deformationsrate, womit Kornbruch ausgeschlossen wird.

Es werden verschiedene Darstellungsmöglichkeiten für Spannungszustände verwendet. Diese sind in Abb. 1.1 für axialsymmetrische Zustände ($T_2 = T_3$) abgebildet. Zusätzlich wird die Critical State Line (CSL) in den jeweiligen Spannungsräumen dargestellt.

Das Verhältnis der Hauptspannungen wird für triaxiale Kompression über $K = \frac{T_3}{T_1}$ ausgedrückt. Bei Betrachtung des Hauptspannungsraums $T_3 - T_1$ in Abb. 1.1(a) liegt der aktuelle Spannungszustand auf einer Geraden mit der Steigung $\frac{1}{K}$. Die Steigung der CSL für triaxiale Kompression ist hier $\frac{1}{K_c}$ und für triaxiale Extension K_c .

Für die Darstellung in der $p - q$ Ebene in Abb. 1.1(b) wird das Spannungsverhältnis $\eta = \frac{q}{p}$ verwendet. Hier lässt sich die CSL für triaxiale Kompression als Gerade mit der Steigung M darstellen.

Ein weiteres Maß zur Beschreibung des aktuellen Spannungsverhältnisses ist der mobilisierte Reibungswinkel φ_{mob} . Dieser ergibt sich aus der Größe des

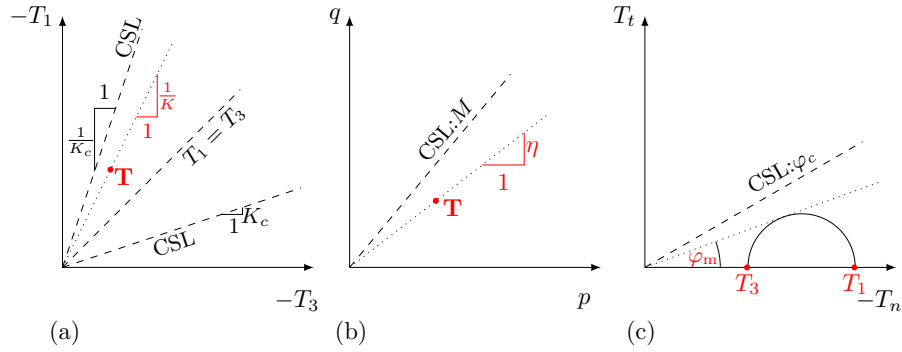


Abbildung 1.1: Darstellung axialsymmetrischer Spannungszustände mit $T_2 = T_3$ und Definition der Spannungsverhältnisse für unterschiedliche Darstellungen: (a) Hauptspannungsraum; (b) Darstellung in Roscoe Invarianten p und q ; (c) Darstellung über Mohr'sche Kreise mit den auf ein betrachtetes Flächenelement wirkenden Normalspannungen T_n und Schubspannungen T_t .

Tabelle 1.1: Darstellung verschiedener Spannungsverhältnisse für triaxiale Kompressionszustände mit $T_1 < T_2 = T_3$

gesuchte Größe	gegebene Größen			
	$T_1 < T_2 = T_3$	φ_{mob}	K	$\eta = \frac{q}{p}$
φ_{mob}	$\arcsin \frac{T_1 - T_3}{T_1 + T_3}$	–	$\arcsin \frac{1 - K}{1 + K}$	$\arcsin \frac{3\eta}{6 + \eta}$
K	$\frac{T_3}{T_1}$	$\frac{1 - \sin \varphi_{\text{mob}}}{1 + \sin \varphi_{\text{mob}}}$	–	$\frac{3 - \eta}{2\eta + 3}$
$\eta = \frac{q}{p}$	$\frac{3(T_1 - T_3)}{T_1 + 2T_3}$	$\frac{6 \sin \varphi_{\text{mob}}}{3 - \sin \varphi_{\text{mob}}}$	$\frac{3 - 3K}{1 + 2K}$	–

Mohr'schen Kreises bei der Darstellung der in einem jeweiligen Flächenelement wirkenden Normalspannung T_n und Schubspannung T_t in Abb. 1.1(c). Die CSL für triaxiale Kompression ist hier eine Gerade der Steigung $\tan \varphi_c$. Die Definitionen der einzelnen Spannungsverhältnisse und die Möglichkeiten zur gegenseitigen Umrechnung sind für triaxiale Kompressionszustände mit $T_1 < T_2 = T_3$ in Tab. 1.1 gegeben.

Kapitel 2

Grundlagen

Zur Ermittlung der Verformungen und der Standsicherheit in komplexen Problemstellungen und Geometrien in der Geotechnik bieten sich numerische Methoden zur Lösung von Randwertproblemen an. Hierbei hat sich die Methode der Finiten Elemente (FE) als ein gängiges Werkzeug etabliert. Dabei wird die Problemstellung räumlich mittels finiter Elemente diskretisiert und die erwartete Belastungsgeschichte näherungsweise und inkrementell abgebildet. Zur Lösung von Randwertproblemen mit der Methode der Finiten Elemente stehen einige hochentwickelte Softwarepakete zur Verfügung. Die Modellierung einer realistischen Problemstellung ist jedoch keine triviale Aufgabe, da einige, manchmal sehr einschneidende Annahmen und Vereinfachungen getroffen werden müssen. Hierfür bieten unter anderem die *Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik* [26, 2] (EANG) einen guten Überblick über gängige Methoden und Modellierungsansätze. Neben einer räumlichen Modellierung und der Lastaufstellung ist insbesondere die realistische Abbildung des Materialverhaltens von großer Bedeutung. Die Wahl eines Materialmodells, welches in der Lage ist, die maßgeblichen Bodeneigenschaften abzubilden sowie eine konsistente Kalibrierung der Materialparameter, haben einen großen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse. Zusätzlich kommt bei geotechnischen Problemstellungen die Erschwernis hinzu, dass es für gewöhnlich nicht möglich ist, die genauen Materialeigenschaften im gesamten Baugrund zu ermitteln. Meistens kann nur anhand punktueller Aufschlüsse auf die Untergrundverhältnisse geschlossen werden. Dieser Umstand sorgt für eine zusätzliche Unschärfe in den Berechnungsergebnissen. Der Fokus in dieser Arbeit liegt in der Weiterentwicklung und Anwendung von Materialmodellen, mit welchen das Bodenverhalten für FE-Berechnungen möglichst realistisch beschrieben werden kann.

2.1 Bodenverhalten und Modellierungsannahmen

Im folgenden Abschnitt wird ein kurzer Überblick über einige grundlegend wichtige Bodeneigenschaften gegeben und es werden Begriffe erläutert, welche im Zuge dieser Arbeit verwendet werden. Die in dieser Arbeit behandelten

Materialmodelle bilden das Verhalten feinkörniger bzw. toniger Böden ab. Daher werden bei der Modellierung teilweise Begriffe und Eigenschaften verwendet, welche primär bei diesen Bodenarten auftreten. Das Bodenverhalten unterscheidet sich in einigen Fällen zwischen feinkörnigen und grobkörnigen Böden, wobei viele Effekte bei den meisten granularen Medien auf vergleichbare Weise auftreten. Eine Übersicht über grundlegendes Materialverhalten, welches bei der Modellierung des Bodenverhaltens berücksichtigt werden sollte, wird von Herle [46] zusammengefasst. Details über die in dieser Arbeit berücksichtigten Eigenschaften und Konzepte finden sich in den jeweiligen Kapiteln. Eine anschauliche Übersicht über das Bodenverhalten und mögliche Modellierungsansätze wird unter anderem von Aktinson [4] und Wood [142] gegeben.

2.1.1 Barotropie, Pyknotropie und kritische Zustände

Unter den Begriffen Barotropie und Pyknotropie versteht man die Abhängigkeit der Steifigkeit und der Festigkeit vom Druck bzw. der Lagerungsdichte. Allgemein verhält sich ein dichter Boden unter einem hohen Druck steifer und weist eine höhere maximale Scherfestigkeit auf als ein lockerer Boden bei niedrigen Spannungszuständen. Dabei treten die Einflüsse des Drucks und der Lagerungsdichte nicht unabhängig voneinander auf, sondern das Verhalten hängt vom Verhältnis des Drucks p zur aktuellen Porenzahl e ab. Für feinkörnige Böden werden anstatt der Bezeichnung locker und dicht, die Begriffe der leicht und stark überkonsolidiert verwendet [142].

Die druckabhängige Kompressionssteifigkeit in der isotropen Kompression lässt sich für Tonböden über die Beziehung der isotropen Normalkonsolidierung (isoNCL) beschreiben. Gängige Beziehungen für Tonböden sind Darstellungen der isoNCL als Gerade im $\ln p - (1 + e)$ Diagramm [142] oder nach Butterfield [21] als Gerade mit der Steigung λ^* im doppellogarithmischen $\ln p - \ln(1 + e)$ Diagramm zufolge Abb. 2.1.

Der qualitative Unterschied im Materialverhalten eines lockeren (leicht überkonsolidierten) und eines dichten (stark überkonsolidierten) Bodens ist in Abb. 2.2 schematisch für einen drainierten Triaxialversuch dargestellt. Der zu Beginn dichte Boden verhält sich Anfangs steifer und erreicht eine höhere Peakspannung. Während der Versuch an der dichten Probe nach anfänglicher Kontraktanz ein dilatantes Verhalten aufzeigt, erfährt der anfangs lockere Boden eine reine Verringerung des Volumens. Einer konstante Scherung führt bei beiden Proben zum sogenannten kritischen Zustand. In diesem Zustand werden die kritische Festigkeit sowie die kritische Porenzahl erreicht.