

1.1 Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau

Martin Ziegler

1 Einführung

1.1 Allgemeines

Die Aufgabe des entwerfenden Ingenieurs liegt darin, ein Bauwerk so zu konzipieren, dass es sicher und gebrauchstauglich ist sowie wirtschaftlich erstellt und betrieben werden kann. Daneben sind die Umweltverträglichkeit und eine mögliche Beeinträchtigung der Umgebung während des Baus, aber auch über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks zu beachten. Für die Realisierung dieser Aufgabe gibt es keine eindeutige Lösung. Einige der genannten Anforderungen konkurrieren unmittelbar miteinander und werden von den am Projekt Beteiligten durchaus auch unterschiedlich gesehen und bewertet (Bild 1). So wird beispielsweise der Investor die kostenoptimierte Errichtung eines Bauwerks mit eher billigen und kurzlebigen Elementen verfolgen, während der Betreiber im Hinblick auf die Instandhaltung und Wartung stärker an einer höherwertigen Erstausrüstung interessiert ist.

Ähnliche Spannungsfelder ergeben sich auch zwischen Investor und Bauausführendem, Betreiber und Nutzer, aber auch im Verhältnis zur allgemeinen Öffentlichkeit. Konflikte treten in diesem Zusammenhang insbesondere im Hinblick auf die Bewertung der Sicherheitsanforderungen an ein Bauwerk auf. Die Allgemeinheit fordert schnell die Einhaltung höchster Sicherheitsvorkehrungen, muss dafür aber zumindest vordergründig meistens nicht direkt ins finanzielle Obligo bei der Umsetzung treten. Dabei ist die Verbesserung eines bereits hohen Sicherheitsniveaus ungleich schwieriger und vor allem kostspieliger als ein entsprechender Sicherheitszuwachs von geringerem Niveau



Bild 1 Anforderungen und Beteiligte bei einem Bauprojekt

1.2 Baugrunduntersuchungen im Feld

Klaus-Jürgen Melzer, Edwin Fecker und Tilman Westhaus

1 Grundlagen

1.1 Normen und Richtlinien

In der europäischen Norm EN 1997-1 (s. a. Kapitel 1.1) befasst sich der Abschnitt 3 u. a. mit den Baugrundaufschlüssen. Dort wird verlangt, dass Felduntersuchungen nach international anerkannten Standards und Empfehlungen auszuführen sind; bezüglich der Anforderungen an die Planung sowie allgemeine Geräte- und Versuchsdurchführungen von Labor- und Feldversuchen wird auf EN 1997-2 verwiesen. Die angesprochenen Felduntersuchungen sollen außer bodenmechanischen Aufschlüssen auch ingenieurgeologische und hydrogeologische Erkundungen – auch unter umweltrelevanten Aspekten – einbeziehen, wobei sich der Umfang der Untersuchung an den geotechnischen Kategorien (s. Kapitel 1.1, 3.4.2) des Bauvorhabens orientieren sollte. Wichtig ist auch die Forderung, dass der Umfang der Baugrunderkundung auch nach Baubeginn zu ergänzen ist, wenn neu zu Tage tretende Umstände das erfordern.

Allgemein muss eine Baugrunduntersuchung alle Daten beschaffen, die für die Festlegung der vom jeweils betrachteten Baugrund-Bauwerk-System abhängigen charakteristischen Baugrundkenngrößen (s. Kapitel 1.1, 3.5) erforderlich sind und für eine Bauwerksplanung oder die Gewinnung von Baustoffen relevant sein können.

Zu den relevanten Normen bzw. Normengruppen gehören:

| | |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| EN 1997-2 | Geotechnical Design – Part 2: Ground investigation and testing (DIN EN 1997-2). |
| DIN 4020 | Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke. |
| DIN 4020 | Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-2. |
| EN ISO 22475 | Geotechnical investigation and testing – Sampling methods and groundwater measurements – Part 1-3. |
| EN ISO 22476: | Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 1-12, 15. |
| DIN 4094-2 | Baugrund – Felduntersuchungen – Teil 2: Bohrlochrammsondierung. |
| ISO 14688 | Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil – Part 1-2. |
| ISO 14689-1 | Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of rock – Part 1: Identification and description. |

1.3 Eigenschaften von Boden und Fels – ihre Ermittlung im Labor

Paul von Soos und Jens Engel

1 Boden und Fels – Begriffe und Entstehung

Boden im bautechnischen Sinne ist die oberflächennahe, nicht verfestigte Zone der Erdkruste. Seine Bestandteile sind miteinander nicht oder nur in so geringem Maße mineralisch verkittet, dass die Verkittung die Eigenschaften des Bodens nicht prägt („Lockergestein“).

Fels ist jene Zone der Erdkruste, deren Bestandteile miteinander mineralisch fest verkittet sind. Seine Eigenschaften sind durch diese Verkittung und in der Regel zusätzlich durch Systeme von Trennflächen bestimmt, entlang denen der feste Zusammenhalt aufgehoben ist („Festgestein“).

Boden und Fels bilden *Baugrund*, wenn sie im Einflussbereich zu errichtender Bauwerke anstehen. Sie sind *Baustoff*, wenn sie zur Errichtung von Bauwerken oder Bauteilen dienen.

Mineralischer Boden ist durch Verwitterung von Festgesteinen entstanden. Er steht entweder in ursprünglicher Lagerung an (*Verwitterungsboden*) oder er wurde durch Wind, Wasser oder Eis transportiert und abgelagert (*Sedimente*).

Organische oder *organogene Böden* enthalten Reste organischer Lebewesen.

Von den Festgesteinen entstammt ein Teil dem flüssigen Erdinneren: *magmatische Gesteine* (z. B. Granit). Ein anderer Teil hat sich aus Böden und den Ausscheidungen der Gewässer gebildet, die unter Druck durch Verkittung (Diagenese) zu *Sedimentgesteinen* (z. B. Sandstein) umgewandelt wurden. Unter hohen Drücken und Temperaturen wurden Magmatische und Sedimentgesteine zu *metamorphen Gesteinen* umkristallisiert (z. B. Gneis). Die gesteinsbildenden Vorgänge und der Kreislauf Verwitterung – Transport – Ablagerung – Verfestigung konnten im Laufe der Erdgeschichte durch Änderung von Oberflächengestalt und Klima an beliebiger Stelle unterbrochen werden oder neu ansetzen. Die vielgestaltigen Möglichkeiten in Ursprung und Geschichte erklären die große Mannigfaltigkeit der Böden und Felsen und das weite Band, in dem ihre bautechnischen Eigenschaften sich abstufen.

1.4 Statistik und Probabilistik in der geotechnischen Bemessung

Maximilian Huber und Karl-Josef Witt

1 Einleitung

Statistik und Probabilistik in der geotechnischen Bemessung ist ein komplexer und schwer zur durchdringender Gegenstand für die Ingenieurpraxis. Es ist ein Versuch, mittels mathematisch-statistischer Konzepte die Folgen der Variabilität der Einwirkungen und der Eigenschaften des Baugrunds in Nachweisen der Standsicherheit und in Prognosen des Verhaltens von Bauwerk, Baugrund und Grundwasser zu quantifizieren. Zahlreiche Veröffentlichungen zu diesem Thema zeigen deutlich das Potenzial dieser Herangehensweise für den Entwurf und die Ausführung von geotechnischen Bauwerken auf, vor allem um den Zusammenhang von Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit als Entscheidungsgrundlage transparent darzustellen.

Dieses Kapitel des Grundbau-Taschenbuchs hat das Ziel, Entwicklungen, Erkenntnisse und Berechnungsmethoden auf statistischen und probabilistischen Grundlagen vorzustellen und Möglichkeiten der Implementierung in die empirischen, analytischen und numerischen Methoden der geotechnischen Bemessung aufzuzeigen. Die für die Geotechnik charakteristische Unschärfe in Prognosen muss dennoch akzeptiert werden. Dies ist im Wesentlichen der Unkenntnis der Variabilität und der Korrelation der Einflussgrößen sowie der Einfachheit der Modelle geschuldet. Die Anwendung von (geo) statistischen und probabilistischen Methoden bietet jedoch zumindest eine Chance, diese Unschärfe als Entscheidungsgrundlage quantitativ zu erfassen, was die Beurteilung durch einen Experten nicht ersetzt, aber stützen kann.

Nach einer Einführung in Sicherheitskonzepte und in die Methoden der Statistik und Geostatistik werden die Grundlagen der Zuverlässigkeitsanalyse beschrieben. Exemplarisch werden daraufhin komplexe Fragestellungen der Probabilistik und die Berücksichtigung von Messungen in einer probabilistischen Analyse behandelt. Für Anwendungen statistischer und probabilistischer Methoden auf typische Nachweis- und Bemessungsaufgaben der Geotechnik in Anlehnung an DIN EN 1997-1 (EC 7 Teil 1) [108] werden Erkenntnisse und Schlüsselpublikationen aufgeführt. In einem Anhang finden sich zu den wichtigsten Methoden die mathematischen Formeln.

1.5 Charakterisierung von Schadstoffen im Baugrund und Grundwasser

Andreas Claussen

1 Grundlagen

In der geotechnischen Betrachtung des Untergrunds stehen die bodenphysikalischen und bodenmechanischen Eigenschaften im Vordergrund. Betrachtet man den Untergrund von der chemischen Seite aus, dann handelt es sich in seinem Ausgangszustand um ein heterogenes Stoffgemisch, das in den überwiegenden Fällen aus anorganischen Mineralien besteht.

In Lockergesteinen liegen die Mineralien in Form einzelner Mineralkörner der Ton-, Schluff-, Sand- oder Kiesfraktion oder in Form von Bruchstücken aus Mineralgemischen der Sand-, Kies-, Stein- und Blockfraktion vor. Vom Grundsatz her kann davon ausgegangen werden, dass je kleiner das Bodenpartikel ist, es umso wahrscheinlicher aus einer einzelnen Mineralart besteht. In Festgesteinen liegen die einzelnen Mineralien noch in einem festen Verbund in Gesteinsschichten vor. Durch die Bewegung der Erdkruste und die Verwitterung werden diese Gesteinsschichten aufgebrochen, sodass sich aus vormals festen Gesteinen die Lockergesteine bilden konnten.

In diese anorganisch mineralische Matrix können in unterschiedlichem Maße auch organische Stoffe eingebunden sein, wie z. B. in Lockergesteinen in Form fein verteilter organischer Substanzen, sei es rezent in Seen, Mooren, Marschen, Küsten sowie fossil in ehemaligen wassergefüllten Senken oder marinen Becken. Auch in Festgesteinen kommen organische Substanzen in fein verteilter Form vor, wie in Tongesteinen (z. B. Grube Messel) oder kohlehaltigen Gesteinen, die je nach Mächtigkeit und Kohlegehalt (z. B. in Flözen) abgebaut werden. Darüber hinaus kann es im Bereich von Mooren und Sümpfen auch zur Ausbildung fast reiner organischer Schichten aus pflanzlichen Überresten kommen.

Der Untergrund besteht aus mehreren Phasen. Hierzu gehört die feste Phase bestehend aus allen Feststoffen wie den mineralischen oder organischen Feststoffpartikeln. Darüber hinaus gehören dazu die Bodenluft und das Bodenwasser. Im mit Wasser ungesättigten Untergrund ist das Bodenwasser auf die feineren Poren, die das Wasser gegen die Schwerkraft halten können, die Menisken, und die feuchten Oberflächen der Feststoffe beschränkt. Die gröberen Poren werden von der Bodenluft erfüllt. Im mit Wasser gesättigten Untergrund werden die Poren innerhalb des Feststoffs vollständig vom Wasser gefüllt.

1.6 Erddruck

Achim Hettler

1 Einführung

Das Thema Erddruck gehört zu den ältesten und umfangreichsten Kapiteln der Bodenmechanik und des Grundbaus. Die ersten schriftlichen Quellen, die auf *Vitruv* zurückgehen, sind über 2000 Jahre alt und sind somit weitaus älter als die allgemein bekannten Theorien von *Coulomb* (1773) [17] oder *Rankine* (1857) [89]. *Vitruv* befasst sich im ersten und im sechsten Band seiner zehn Bücher mit der Wirkungsweise des Erddrucks auf Stützmauern und schlägt Strebepfeiler vor. *Vauban*, einer der größten Baumeister der Geschichte, veröffentlichte schon 1684 Bemessungstabellen für Stützmauern mit Höhen bis zu 15 m, die auch nach heutigem Stand nicht weiter optimierbar sind. Die Entwicklung der Erddrucktheorie wird von *Kurrer* ausführlich in Kapitel 5 der erweiterten Auflage „Geschichte der Baustatik“ [71] beschrieben. Der vorliegende Beitrag kann nur eine beschränkte Auswahl aktueller Berechnungsgrundlagen beinhalten. Ziel des vorliegenden Kapitels ist es, wie schon in der 7. Auflage, den Grundbauingenieuren und den Tragwerksplanern in Baufirmen, Ingenieurbüros sowie in der Bauverwaltung eine Sammlung von Arbeitsanleitungen zur Verfügung zu stellen. Um das Verständnis zu wecken, werden zunächst in Abschnitt 3 die wesentlichen Grundlagen zur Ermittlung des Erddrucks vorgestellt. Die Abschnitte 4 bis 8 beinhalten die für die Praxis wichtigsten Verfahren zum aktiven und passiven Erddruck sowie zum Erdruhedruck. Dabei werden in den Abschnitten 7 und 8 auch räumliche Wirkungen berücksichtigt. Ein Anliegen des Beitrags ist, in knapper Form auch Hinweise zu nicht alltäglichen Fragestellungen zu geben und auf weiterführende Literatur zu verweisen (s. Abschnitt 9). In den letzten Jahren ist immer mehr die Verschiebungsabhängigkeit des Erddrucks in den Blickpunkt getreten. Dies betrifft nicht nur den passiven, sondern auch den aktiven Fall (s. Abschnitt 10). Der Beitrag schließt mit Anwendungshinweisen für die Praxis in Abschnitt 11 und wird durch Erddrucktabellen für die wichtigsten Grundlagenfälle ergänzt.

Der Aufbau des Beitrags in der 8. Auflage ist im Wesentlichen identisch mit den Ausführungen in der 7. Auflage. Neuere Entwicklungen, insbesondere auch in DIN 4085, deren Neufassung für 2017 geplant ist, sind berücksichtigt.

Für die sorgfältige Prüfung des Manuskriptes sowie zahlreiche Anregungen und Verbesserungsvorschläge dankt der Verfasser Herrn Prof. *Anton Weißenbach*. Herrn Prof. *Franke* gilt mein Dank für die Hilfe bei der Beschaffung von Literatur und die fachlichen Diskussionen. Ein Dank ergeht nicht zuletzt an die Mitarbeiter des Lehrstuhls in Dortmund, insbesondere für die Manuskript- und Bilderstellung sowie die Erstellung der Tafel 5 im Anhang. Gedankt sei auch dem Verlag und dem Herausgeber Herrn

1.7 Stoffgesetze für Böden

Dimitrios Kolymbas und Ivo Herle

Symbolverzeichnis

| | |
|----------------------|----------------------------------------------------|
| B | Kompressionsmodul |
| c | Kohäsion |
| c_u | undränirierte Kohäsion |
| d_{ij}, \mathbf{D} | Verzerrungsgeschwindigkeit, Stretching-tensor |
| e | Porenzahl |
| e_c | kritische Porenzahl |
| e_0 | Referenzporenzahl |
| E | Elastizitätsmodul |
| E_t | Tangentialsteifigkeit |
| f | Funktion; Fließfunktion |
| g | plastisches Potential, Erdbeschleunigung |
| G | Schubmodul |
| h | skalärer Verfestigungsparameter (Zustandsvariable) |
| k | Durchlässigkeitskoeffizient |
| K | Kompressionsmodul |
| K_0 | Erdruhedruckbeiwert |
| M | Grenzspannungsparameter |
| M_{ijkl} | Steifigkeitsmatrix |
| n | Porenanteil, Porosität |
| \mathbf{n} | Einheitsvektor |
| N_{ij} | Spannungsfunktion |
| p | mittlere Spannung, Porenwasserdruck (Abschnitt 7) |
| p' | effektive mittlere Spannung |
| p_c | Konsolidierspannung |
| p_0 | Referenzspannung |
| q | Deviatorspannung |
| R_i | Volumenkraft |
| s_u | undränirierte Scherfestigkeit |
| t | Zeit |
| dt | Zeitinkrement |
| \mathbf{t} | Spannungsvektor |
| \mathbf{T} | Spannungstensor |

| | |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| u | Verschiebung, Porenwasserdruck |
| v | Geschwindigkeit |
| α_{ij} | tensorieller Verfestigungsparameter (Zustandsvariable) |
| δ_{ij} | Kronecker-Symbol |
| ε | Dehnung |
| ε^e | elastische Dehnung |
| ε^p | plastische Dehnung |
| ε^{vp} | viskoplastische Dehnung |
| $\Delta\varepsilon, d\varepsilon$ | Dehnungsinkrement |
| $\dot{\varepsilon}$ | Dehnungsrate |
| $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ | Hauptdehnung |
| $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ | volumetrische Dehnung |
| $\varepsilon_{ij}, \varepsilon$ | Dehnungstensor |
| φ | Reibungswinkel |
| φ_c | kritischer Reibungswinkel |
| λ | Lamé-Parameter; Multiplikator |
| μ | Lamé-Parameter |
| ν | Poisson-Zahl |
| ψ | Dilatanzwinkel |
| ρ | Dichte |
| σ | Spannung |
| σ' | effektive Spannung |
| $\Delta\sigma, d\sigma$ | Spannungsinkrement |
| $\dot{\sigma}$ | Spannungsrate |
| $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ | Hauptspannungen |
| σ_{ij}, σ | Spannungstensor |
| τ | Schubspannung |

1 Einführung

Stoffgesetze präsentieren sich heute als ein kaum zu durchdringendes Feld von nicht zu durchschauender Komplexität. Lohnt es sich, sich mit Stoffgesetzen zu befassen? Eigentlich schon, denn sie sollen das mechanische Verhalten von Boden mathematisch beschreiben. Wohlgermerkt, dies ist ein ehrgeiziges Anliegen, denn das Bodenverhalten ist äußerst komplex und noch Gegenstand intensiver Forschung weltweit. Entsprechend kompliziert sind daher die vielen vorgeschlagenen Stoffgesetze, und die Nachricht hat derjenige, der auf sie angewiesen ist, ohne die erforderliche Übersicht und Erfahrung zu haben. Das vorliegende Kapitel des Grundbau-Taschenbuchs hat sich zum Ziel gesetzt, Benutzern von Stoffgesetzen zu helfen, eine Übersicht zu gewinnen.

Die Vielfalt des mechanischen Verhaltens von Böden, die enormen Schwierigkeiten bei seiner mathematischen Modellierung sowie ihre zentrale Bedeutung bei der numeri-

schen Simulation machen Stoffgesetze zu einem faszinierenden Forschungsthema, für welches ein zunehmendes Interesse nicht nur im Bauingenieurwesen, sondern auch im Bergbau, in der Geologie und neuerdings auch in der Physik (siehe z. B. [44]) aufkommt.

2 Frequently asked questions

Sogenannte *frequently asked questions* werden gerne herangezogen, um Leser in ein komplexes Feld einzuführen. Es wurden folgende Fragen ausgewählt:

1. *Stoffgesetze sind kaum verständliche Theorien. Braucht sie ein Bauingenieur wirklich? Wozu?*
Stoffgesetze sind nicht nur der Kern jeder numerischen Simulation, sondern sie stellen Rahmen auf, die zum Verständnis des Stoffverhaltens erforderlich sind. Die Bedeutung und die Messung von Bodeneigenschaften machen nur im Zusammenhang mit einem bestimmten Stoffgesetz Sinn.
2. *Machen komplizierte Theorien einen Sinn, wenn man bedenkt, wie inhomogen der Boden aufgebaut ist und welche Streuung die üblichen Versuchsergebnisse haben?*
Die Inhomogenität des Bodens hat nichts mit seinem Verhalten und demnach mit einem Stoffgesetz zu tun. Ist das Stoffgesetz erst einmal festgelegt, so können die Inhomogenität des Bodens, die Streuung der Versuchsergebnisse und ihre Konsequenzen – zumindest im Prinzip – mit stochastischen Methoden erfasst werden.
3. *Es fällt auf, dass Ergebnisse von Laborversuchen (etwa eine Spannungs-Dehnungs-Linie aus einem Triaxialversuch) durch Stoffgesetze nur ungenau reproduziert werden. Ist dies ein Hinweis dafür, dass Stoffgesetze unvollkommen oder gar mangelhaft sind, sodass sie im Grunde genommen keine besondere Beachtung bei ihrer Auswahl, Kalibrierung und Implementation verdienen?*
Stoffgesetze sind Theorien. Theorien reduzieren und abstrahieren die Erfahrung und beruhen auf zusätzlichen Annahmen, die es erlauben, Versuchsergebnisse zu interpretieren. In diesem Sinn stellt jede Theorie eine Approximation dar und die damit verknüpfte Abweichung von der Realität darf nicht als Fehler aufgefasst werden und sollte kein Anlass sein, auf logische und mathematische Strenge zu verzichten [90].
4. *Warum gibt es so viele unterschiedliche Stoffgesetze? Kann man nicht für den Hausgebrauch mit irgendeinem möglichst einfachen Stoffgesetz hinreichend gut auskommen?*
Da ein absolut überzeugendes und zufriedenstellendes Stoffgesetz noch nicht vorliegt, stellen die verschiedenen zurzeit verfügbaren Stoffgesetze lediglich Versuche dar. Jedes hat seine Stärken und Schwächen, daher sollte man ein Stoffgesetz für ein konkretes Problem mit Bedacht wählen.
5. *Warum wird immer noch an Stoffgesetzen geforscht? Welche sind die noch offenen Fragen?*
Da man nicht a priori weiß, welche Verformungen bei einem bestimmten Problem auftreten, sollte ein Stoffgesetz allgemeingültig sein, d. h. es soll für alle erdenklichen Beanspruchungen aller Bodenarten realistische Voraussagen liefern. Da diese Forderung noch nicht erfüllt worden ist, werden immer wieder Versuche unter-

1.8 Stoffgesetze und Bemessungsansätze für Festgestein

Erich Pimentel

1 Einführung

Im Grundbau ist es aufgrund des unterschiedlichen Materialverhaltens zweckmäßig, zwischen Boden und Fels zu unterscheiden. Wie bei jeder Wissenschaft ist der Bedarf der Gesellschaft an Erkenntnissen hinsichtlich bestimmter Aufgabenstellungen die treibende Kraft für einen Großteil der Forschungsarbeiten. Dadurch bedingt hat die systematische Untersuchung des mechanischen Verhaltens von Fels später begonnen als beim Boden. Das erklärt nur zum Teil, weswegen die Anzahl der Stoffgesetze zur Beschreibung des Verhaltens von Fels geringer ausfällt als bei der Bodenmechanik. Ein anderer Grund liegt sicherlich nicht in der Komplexität, da das Verhalten von Fels nicht minder komplex ist als das von Boden. Aufgrund der höheren Festigkeit des intakten Festgesteins reichten oft nur einfachere Stoffgesetze bzw. Bemessungsansätze, um Aufgabenstellungen zufriedenstellend zu bewerkstelligen. Seit der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts hat sich das Aufgabenspektrum zunehmend erweitert und damit auch die Erkenntnisse zum Materialverhalten von nicht nur intaktem Festgestein.

Zielsetzung des vorliegenden Kapitels ist, das überwiegend in Fachpublikationen gestreute Wissen zu diesen Themen praxisnah zusammenzustellen. Um ein besseres Verständnis der theoretischen Zusammenhänge zu ermöglichen, werden in Abschnitt 2 die Unterschiede zwischen Fels und Boden sowie die wesentlichen mechanischen Eigenschaften von Fels, Diskontinuitäten und Gebirge bzw. ihr Materialverhalten qualitativ beschrieben.

In Abschnitt 3 und 4 werden Stoffgesetze und -gleichungen zur Beschreibung des mechanischen bzw. hydraulischen Materialverhaltens erläutert. In Abschnitt 5 werden Bemessungsansätze vorgestellt, die ohne den Einsatz numerischer Methoden umsetzbar sind. Mit diesen Ansätzen kann eine Vielzahl der in der Praxis gestellten Aufgaben des Grundbaus im felsigen Untergrund gelöst werden.

2 Allgemeine Eigenschaften

2.1 Fels und Boden

Die Begriffe Boden und Lockergestein bzw. Fels und Gestein werden oft als Synonyme verwendet. Boden bzw. Lockergestein besteht aus Festsubstanzen und Poren, die im unterschiedlichen Grade mit Flüssigkeiten oder Gasen gefüllt sind. Erstere bestehen

1.9 Bodendynamik

Christos Vrettos

1 Einleitung

Die Bodendynamik spielt eine maßgebende Rolle bei einer Vielzahl von geotechnischen Problemstellungen. Die wichtigsten darunter sind:

- Gründung von Maschinenfundamenten,
- Geotechnisches Erdbebeningenieurwesen (Stabilität von Dämmen, Böschungen, Gründungen, Stützwänden und Tunneln),
- Erschütterungen und Setzungen infolge Verkehr und Baubetrieb,
- Gründung von Offshore-Konstruktionen.

Die wesentlichen Unterschiede zu der klassischen (statischen) Bodenmechanik liegen in den folgenden Punkten:

Die Bodendynamik untersucht Fälle, bei denen die Lasten sich mit der Zeit schnell ändern. Dies hat als Folge die Entstehung von Trägheitskräften. Das jeweilige Problem wird durch Bewegungsgleichungen und nicht durch Gleichgewichtsbedingungen, wie im statischen Fall, beschrieben. Die Lösungsmethoden sind entsprechend unterschiedlich.

Die durch dynamische Beanspruchungen erzeugten Wellen breiten sich im Boden aus. Dies führt dazu, dass der Einflussbereich von Lasten und Verformungen in der Bodendynamik erheblich größer ist als in der Bodenmechanik. Dies ist noch ausgeprägter bei Belastungen durch Erdbeben: Die Beanspruchung des Bodens und demzufolge auch der Gründungen wird durch kinematische Größen (Beschleunigung, Geschwindigkeit, Verschiebung) beschrieben und nicht mittels Spannungen wie bei statischer Belastung durch Bauwerkslasten. Die Ermittlung der Belastungsmerkmale wird dadurch erheblich erschwert. Des Weiteren ist die seismische Belastung meistens als einfache Scherung anstatt als triaxiale Kompression zu modellieren und bei der Dimensionierung einer Baukonstruktion sind horizontale und nicht vertikale Kräfte und Verschiebungen maßgebend.

In der Bodendynamik sind die eingprägten Lasten und Verformungen nicht nur zeitabhängig, sondern auch zyklisch bzw. transient. Das Bodenverhalten (Spannungs-Verformungs-Beziehung) unter zyklischer Last unterscheidet sich wesentlich vom Verhalten bei monotoner, statischer Belastung. Zum Beispiel ist die inelastische, hysteretische Art des Bodenverhaltens bei der zyklischen Belastung von Bedeutung. Überschreiten die Bodendehnungen einen bestimmten Wert, entstehen bleibende Verformungen, die mit der Zyklenzahl zunehmen und eventuell zu einem fortschreitenden Versagen

1.10 Numerische Verfahren in der Geotechnik

Peter-Andreas von Wolffersdorff und Helmut F. Schweiger

1 Einleitung

Numerische Verfahren haben sich zur Beurteilung des Verformungsverhaltens geotechnischer Bauwerke in der Praxis etabliert. Der im Eurocode 7 verankerte Nachweis der Gebrauchstauglichkeit kann für komplexe Strukturen meist nur mit numerischen Analysen geführt werden. Auch beim Nachweis von Grenzzuständen erlangen numerische Berechnungen zunehmend an Bedeutung. Möglich gemacht wurde dies durch intensive Forschung insbesondere auf dem Gebiet von Stoffmodellen für Geomaterialien sowie der Entwicklung von effizienten Lösungsalgorithmen für nichtlineare Gleichungssysteme, die nunmehr auch in kommerziellen Programmsystemen umgesetzt sind und nicht nur der wissenschaftlichen Forschung zur Verfügung stehen. Dreidimensionale Berechnungen können heute problemlos auf Standard-PCs durchgeführt werden. Trotz dieser erfreulichen Entwicklung muss festgehalten werden, dass numerische Methoden in der Geotechnik nicht den Stellenwert besitzen wie in anderen Fachbereichen, z. B. im konstruktiven Ingenieurbau. Der Grund liegt darin, dass auch bei entsprechender Baugrunduntersuchung das Bodenprofil nicht in allen Einzelheiten für das gesamte durch die Baumaßnahme beeinflusste Gebiet erfasst werden kann. Darüber hinaus sind Bodenkennwerte, insbesondere Steifigkeiten, immer mit Unsicherheiten behaftet und können im Allgemeinen nur innerhalb einer gewissen Bandbreite angegeben werden. Schlussendlich stellt die mathematische Beschreibung des Materialverhaltens von Geomaterialien trotz der in den letzten Jahren erzielten Fortschritte nach wie vor eine Herausforderung dar. Daher hält auch der Eurocode 7 im Abschnitt 2.4.1(2) fest: „*Es sollte berücksichtigt werden, dass die Kenntnis der Baugrundverhältnisse vom Umfang und von der Güte der Baugrunduntersuchungen abhängt. Deren Kenntnis und die Überwachung der Bauarbeiten sind im Allgemeinen wichtiger für die Einhaltung der grundsätzlichen Anforderungen als die Genauigkeit der Rechenmodelle und der Teilsicherheitsbeiwerte.*“

Dieses Kapitel soll dem in der geotechnischen Praxis tätigen Ingenieur Hinweise zur erfolgreichen Modellierung unterschiedlicher Problemstellungen geben, wobei numerische Analysen für den Tunnelbau und die Modellierung von Grundwasserströmungen, soweit es sich nicht um stationäre Sickerlinienberechnungen handelt, ausgeklammert bleiben, da diese an anderer Stelle behandelt werden.

Neuere Methoden, die auch große Bodendeformationen – wie sie bei der numerischen Simulation von Herstellungsverfahren (z. B. von Pfählen) und Eindringvorgängen (z. B. von Spundwänden) entstehen können – berücksichtigen, sind in dieses Kapitel aufgenommen worden. Es werden jedoch nur deren Grundprinzipien kurz erläutert.

1.11 Massenbewegungen

Dieter D. Genske

1 Einleitung

Unter Massenbewegung versteht man die talabwärts gerichtete Verlagerung von Gebirgsmassen. Sie unterliegen Mechanismen (Abschnitt 2), deren Erkennung eine Untersuchung des geologischen Aufbaus des Hangs und seiner Umgebung sowie die Erfassung der wirksamen Kräfte voraussetzt. Ein Hang bewegt sich entsprechend seiner

- äußeren Geometrie (Geomorphologie) und
- seines inneren Aufbaus (Geologie).

Es lassen sich entsprechend externe und interne Faktoren unterscheiden, wie dies bereits *Howe* [159] und *Terzaghi* [363] getan haben. Schließlich bedarf es eines auslösenden Ereignisses, eines *Triggers*, „soll die Talfahrt erfolgen“ [1] (Abschnitt 3). Dieser Trigger ermöglicht einen Initialmechanismus, dem Postfailure-Mechanismen und Sekundäreffekte folgen können. Damit ein Hang in Bewegung gerät, müssen somit zwei Bedingungen erfüllt sein [116]:

- Zum einen muss sich ein Bewegungsmechanismus ausbilden können (kinematische Bedingung).
- Zum anderen muss ein Trigger das Gleichgewicht der Kräfte stören, sodass sich der Hang jenseits des Grenzzustands befindet, in dem die treibenden Kräfte die haltenden überwiegen (mechanische Bedingung).

Die geomorphologischen und geologischen Vorgaben zu erkennen, ist Teil der Erkundungsarbeiten (Abschnitt 4). Die Geomorphologie resultiert aus der Wirkung der Atmosphäre auf die Geosphäre. Verwitterung und Abtragung geben dem Hang seine Form (im Gegensatz zur Böschung, die künstlich angelegt wird). Die Geologie wird durch das Gestein und seine tektonische Überprägung bestimmt. Aus der Sicht des Ingenieurs wird dabei zwischen Lockergestein und Festgestein unterschieden. Aus der Sicht des Geowissenschaftlers handelt es sich dagegen generell um Gebirge, in dem Diskontinuitäten intakte Bereiche voneinander trennen. Bei den intakten Bereichen kann es sich sowohl um Lockergestein als auch um Festgestein handeln. Zusätzlich wird eine Gruppe von veränderlich festen Gesteinen definiert, um mögliche, für den Bemessungszeitraum relevante Veränderungen der Festigkeitseigenschaften in Betracht zu ziehen.

Im Festgestein werden die Bewegungsmechanismen von Diskontinuitäten dominiert, die sich (bei Belastung) ausweiten und vernetzen können. Im (homogenen) Lockergestein können sich Bewegungsfugen frei ausbilden. Allerdings können auch im Lo-

1.12 Ingenieurgeodäsie – Zustandsdokumentation und Überwachungsmessung

Otto Heunecke

1 Aufgabenbereiche der Ingenieurgeodäsie

Die *Ingenieurgeodäsie* bildet das Spektrum an Vermessungsarbeiten, die mit technischen Projekten – u. a. im Grundbau – in Verbindung stehen. Die Aufgabenbereiche umfassen die Aufnahme, die (geometrische) Projektierung, die Absteckung, die Abnahme und die Überwachung [5] von baulichen Anlagen sowie beispielweise Maschinen- und Industrieanlagen; nachfolgend als Messobjekte subsumiert. Zu den Messobjekten zählen zudem Überwachungen von Rutschhängen und Senkungsgebieten infolge der Rohstoffgewinnung. Zur Erfüllung dieser Aufgaben sind die geeignete Sensorik und die Messverfahren (s. Abschnitt 4) sowie ein adäquates geodätisches Bezugssystem (s. Abschnitt 3.2) so zu wählen, dass vorgegebene Qualitätsanforderungen, z. B. Vollständigkeit, Korrektheit, Verfügbarkeit und Aktualität, erreicht werden. Häufig stehen diese Vermessungsarbeiten in enger Ergänzung und Wechselwirkung zu den Verfahren der Bau- und Geomesstechnik.

Eine *ingenieurgeodätische Aufnahme* besteht in der Erfassung geometrischer Größen des Istzustands eines Messobjekts mit dem Ziel, den gegenwärtigen Zustand zu dokumentieren und damit Planungsunterlagen zu schaffen, z. B. Lage- und Höhenpläne. Dabei ist heute ein durchgehend digitaler Datenfluss von der Messwertgewinnung bis zur Ergebnisdarstellung gegeben. Für viele derartige Anwendungen kann auf *Geobasisinformationen* zurückgegriffen werden, insbesondere das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS) und das Amtliche Liegenschaftskataster-Informationssystem (ALKIS). ATKIS beinhaltet u. a. die mittels Airborne Laserscanning (ALS) gewonnenen digitalen Geländemodelle (DGM), die in der höchsten Auflösung bundesweit als $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ Raster mit einer Höhengenaugigkeit von 2 bis 3 dm vorgehalten werden. ALKIS ermöglicht vor allem den Zugriff auf die Eigentumsgrenzen. Aufbauend auf der Bestandsdokumentation beinhaltet die *Projektierung* die Festlegung geometrischer Größen des Sollzustands eines zur Realisierung anstehenden Vorhabens. Gemäß Terminologie der HOAI [12] zählen die Aufnahme und die Projektierung zur *planungsbegleitenden Vermessung*.

Die ingenieurgeodätischen Arbeiten zur Ausführung eines Projekts – die HOAI spricht von der Bauvermessung – umfassen die Übertragung geometrischer Größen einer Projektierung in die Örtlichkeit sowie Bauausführungsvermessungen zur Kontrolle und Dokumentation des Baufortschritts. Wird ein Bauvorhaben nach VOB [20] durchgeführt, ist es gemäß Teil B, § 3 Sache des Auftraggebers, die Hauptachsen der zu errich-

1.13 Instrumentierung und Monitoring in der Geotechnik

*Hans Jakob Becker, Marcel Hubrig, Markus Stolz, Arno Thut und
Holger Wörsching*

1 Einleitung

Die Bemessung von Bauwerken im Grundbau basiert auf den geotechnischen Kennwerten und Lastannahmen. Durch die meist große Heterogenität des Baugrunds ist die Festlegung der Kennwerte schwierig. Die Interaktion zwischen Baugrund und Bauwerk kann deshalb meist nur mit Messungen am Bauwerk und im Baugrund beurteilt werden. Die zunehmende verdichtete Bautätigkeit und die Beschränkung des zur Verfügung stehenden Baulands im städtischen Bereich erfordert auch mehr Baumaßnahmen im Untergrund, dies unbesehen von schwierigen geotechnischen Konditionen.

Bei umfassenden Baumaßnahmen wie bei Dammschüttungen (beispielsweise für den Schutz vor steigendem Meeresspiegel), bei tiefen Baugruben etc., wird in vielen Fällen für die Planung der Projekte die Beobachtungsmethode angewandt. Mit bestehenden geotechnischen Messverfahren und der Entwicklung neuer Instrumente wird den Ingenieuren, Geotechnikern und Geologen ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, das ihnen vertiefte Kenntnisse in der Geotechnik und im Verhalten von Bauwerksteilen ermöglicht. In der Projektierungsphase können damit zusätzliche Informationen gewonnen werden und in der Ausführungsphase erlauben sie die berechneten mit den effektiv auftretenden Größen zu vergleichen. Die Berechnungsmodelle können darauf basierend angepasst werden und bei geschickter Anordnung der Messquerschnitte sind einerseits Optimierungen und Einsparungen möglich, andererseits kann bei Überschreiten von Grenzwerten rechtzeitig korrigierend eingegriffen werden.

Im städtischen Bereich besteht die Gefahr, dass bei Baumaßnahmen angrenzende Gebäude in Mitleidenschaft gezogen werden. Im Hinblick auf die Sicherheit und auf die Beweissicherung stehen heute für die Beobachtung angrenzender Gebäude automatische Messsysteme mit Echtzeitvisualisierungen zur Verfügung. Die kontinuierlichen Messungen von Setzungen und Verkippen der Gebäude, korreliert mit den geotechnischen Messungen im Lockergestein und den Messungen am Bauwerk, erlauben Schlüsse zwischen der Ursache von Schäden und der jeweiligen Bauphase zu ziehen. Mehrere Fallbeispiele zeigen den hohen Stellenwert solcher Messungen.

Der Sicherheit, dem Schutz von Leben und Gut muss die höchste Priorität zukommen, die geotechnischen Messungen tragen Wesentliches zu dieser Sicherheit bei. Die Stabilität von Hängen beispielsweise wird mit der Überwachung der Verschiebungen und der Porenwasserspannungen kontrolliert. In kritischen Situationen hat die automatische Überwachung hier ebenfalls eine große Bedeutung, sie ermöglicht mit der Festle-