

„Corona-Präambel“

(SS 2020)

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einführung
2. Untergrund
3. Untergrunderkundung
4. Bodenkenngrößen und Bodenklassifizierung
5. Einfluss der Temperatur auf Böden
6. Hydraulische Eigenschaften von Böden
7. Formänderungseigenschaften von Böden
8. Festigkeitseigenschaften von Böden
9. Erddruck
10. Spannungen und Verformungen (Setzungen) im Untergrund
11. Bodenverbesserung
12. Flachgründungen
13. Tiefgründungen
14. Böschungen, Hänge und Geländesprünge
15. Baugrubensicherung
16. Grundwasserhaltung
17. Erdbau und Dammbau
18. Naturgefahren (Exkursion) – ENTFÄLLT
19. Eurocode 7

„Die Vergangenheit ist nicht dazu da, um sie zu vergessen, sondern viel mehr, um aus ihr zu lernen.“

VORWORT DES VERFASSERS

Als es im März 2020 aufgrund der Corona-Pandemie (COVID-19) in Österreich und praktisch in allen Ländern weltweit zum „Shut-Down“ kam, waren davon auch die Universitäten betroffen. Von einem Tag auf den anderen war den Studierenden und den meisten Bediensteten der Zutritt in die Gebäude der TU Wien nicht mehr möglich, alle Mitarbeiter unseres Forschungsbereiches für Grundbau, Boden- und Felsmechanik arbeiteten folglich in den Wochen und Monaten danach im Home-Office. Der Studienbetrieb wurde kurzfristig auf „Distance Learning“ umgestellt.

Die Vorlesung „Grundbau und Bodenmechanik“ im Sommersemester 2020 wurde nach den ersten beiden Wochen, in der die Präsenzlehre noch stattfand, zunächst bis zum Beginn der Osterferien im Format des Selbststudiums weitergeführt. Dazu wurden den Studierenden die entsprechenden Themenbereiche des Skriptums wöchentlich über die TISS-Plattform der TU Wien zur Verfügung gestellt, ergänzt um rote Randbalken zur Hervorhebung des Lernstoffes. Zur besseren Orientierung wurde vom Vortragenden zusätzlich eine schriftliche Zusammenfassung des jeweiligen Vorlesungsthemas verfasst.

Nach den Osterferien wurde die Vorlesung zu den Vorlesungszeiten online per Videoschaltung über die Plattform GoToMeeting abgehalten. Die Kennzeichnung des Skriptums wurde trotzdem beibehalten, ebenso wurde den Studierenden die Zusammenfassung des jeweiligen Vorlesungsthemas weiterhin wöchentlich zur Verfügung gestellt.

Diese Zusammenfassungen des Vorlesungsinhaltes wurden am Ende des Sommersemesters zur vorliegenden „Corona-Präambel“ zusammengeführt. Einerseits soll sie an die außergewöhnliche und herausfordernde Zeit der Corona-Pandemie mit weltweit Millionen an Infizierten und hunderttausenden Toten – bereits in den ersten Monaten nach Ausbruch der Krankheit – erinnern. Andererseits soll sie auch den nachfolgenden Generationen der Studierenden eine zusätzliche Hilfestellung zur besseren Einordnung des umfangreichen Stoffgebietes des Grundbaus und der Bodenmechanik im Bachelorstudium des Bauingenieurwesens an der TU Wien dienen.

Ein großes Dankeschön gebührt meinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern unseres Forschungsbereiches, die mit großem Engagement den Studienbetrieb in dieser herausfordernden Zeit in kürzester Zeit umgestellt, sämtliche Studienunterlagen für das „Distance Learning“ adaptiert, die Lehrveranstaltungen von zu Hause aus betreut und alle organisatorischen Hürden mit Bravour gemeistert haben!

Dietmar Adam

Wien, Juni 2020

1. EINFÜHRUNG

Der **Grundbau** ist neben dem Wasserbau die weltweit älteste Ingenieurdisziplin, die bereits in den frühen Hochkulturen Ägyptens und Mesopotamiens höchstes Ansehen genoss und in der Antike bedeutend weiterentwickelt wurde.

Die **Bodenmechanik** gehört hingegen zu den jüngsten wissenschaftlichen Gebieten im Bereich des (Bau-)Ingenieurwesens und ist eng verknüpft mit der Technischen Universität Wien. Die Entwicklung der modernen wissenschaftlichen Bodenmechanik nahm ihren Ausgang unter *Prof. Karl von Terzaghi* an der damaligen Technischen Hochschule Wien. Er war erster Ordinarius des weltweit ältesten Institutes für Bodenmechanik, das im Jahre 1928 gegründet wurde. Wien wurde damals und in den folgenden Jahrzehnten oftmals als „Mekka der Bodenmechanik“ bezeichnet und findet bis heute internationale Beachtung als Wegweiser in Forschung und Entwicklung auf dem von Grundbau und Bodenmechanik übergeordneten Gebiet der Geotechnik. Die „Wiener Schule der Bodenmechanik“ ist von Anfang an und bis heute geprägt vom Grundsatz:

„theoretisch fundiert & praxisorientiert“

Dieser Leitgedanke ist auch wegweisend für die Methodik der Lehrveranstaltung und prägt deren Ziele, die sich für die einzelnen Teilgebiete folgendermaßen definieren:

- Einführung in die komplexe Materie der ingenieurmäßigen Betrachtung von Grund und Boden sowie deren mechanische Modellierung und Bewertung (**Bodenmechanik**).
- Ausbildung eines grundsätzlichen Verständnisses für die Wechselwirkung zwischen Untergrund und Bauwerk inklusive der baulichen Umsetzung sowie Methodik (**Grundbau**).
- Vermittlung von fächerübergreifenden Aspekten zur Förderung ganzheitlicher Betrachtungsweisen (**Geotechnik**).

„die Förderung des ingenieurmäßigen Denkens zum Ziel“

Vorreiter auf dem Fachgebiet wirkten seit dem 18. Jahrhundert in verschiedenen europäischen Ländern, die schlussendlich zu wichtigen Wegbereitern in Forschung und Entwicklung im Bereich der Geotechnik wurden.

Die **Geotechnik** zählt heute zu den Kerndisziplinen des Bauingenieurwesens und hat sich in den letzten Jahrzehnten zu einer der vielfältigsten Ingenieurwissenschaften entwickelt. Neben Grundbau (inkl. Erd-, Damm- und Spezialtiefbau) und Bodenmechanik (inkl. Bodendynamik) umfasst sie den Felsbau und die Felsmechanik (bzw. Gebirgsmechanik) sowie den Tunnelbau und ist interdisziplinär mit der Ingenieurgeologie, der Umweltgeotechnik, dem Erbebeningenieurwesen, mit Alpinen Naturgefahren und der Ingenieurbioogie sowie mit weiteren anverwandten Fachgebieten (Geothermie etc.) eng verwoben.

Im Bauwesen ist der Boden nicht nur als Baugrund von Bedeutung, sondern er dient auch als Träger und Stauer des Grundwassers sowie als Baustoff. Umweltbelastungen beeinflussen den Boden und dessen Eigenschaften, der Schutz des Bodens zählt daher ebenso zu den zentralen Aufgaben des Bauingenieurs.

2. UNTERGRUND

Die naturwissenschaftliche Grundlage für die ingenieurmäßige Betrachtung von Grund und Boden bildet die **Geologie**. Ein grundlegendes Verständnis über den Aufbau der Erde, die Geogenese (geologische Entstehungsgeschichte) sowie den Kreislauf der Gesteine (Fest- und Lockergesteine) ist unabdingbare Voraussetzung für die Bearbeitung von ingenieurmäßigen Fragestellungen im gesamten Bereich der Geotechnik.

Die in **Österreich typischerweise vorkommenden Böden** und deren wichtigsten Eigenschaften werden einleitend kurz vorgestellt, ein tieferes Verständnis für das bodenmechanische Verhalten erfordert jedoch eine anlassbezogene weitere Auseinandersetzung und ein eingehendes Studium. Beispielhaft soll dies von jedem Studierenden für seine Heimatregion selbst erfolgen. Als Motivation und Orientierung dafür soll die einleitende Vorstellung des diesbezüglich generierten Wissens im Rahmen des mündlichen Prüfungsteils dienen.

Das der Weltliteratur von *Antoine de Saint-Exupéry* entnommene Zitat „Sprache ist die Quelle der Missverständnisse“ soll an dieser Stelle darauf aufmerksam machen, dass auf die richtige und präzise Verwendung von Begriffen geachtet wird. Das ist immer dann von besonderer Bedeutung, wenn es neue Begriffe und Definitionen anzueignen gilt. Folglich ist beispielsweise nicht nur das Erkennen der Böden (auf der Baustelle) mit den Sinnesorganen anhand von Merkmalen sondern auch die zugehörige richtige Bezeichnung und Benennung entsprechend der jeweiligen Definition von entscheidender Bedeutung, um Missverständnisse zu vermeiden.

Böden können nach unterschiedlichen Kriterien eingeteilt werden, gängig sind die Einteilung nach Bodenarten (in Korngrößenbereiche), nach Bodengruppen (zur bautechnischen Klassifikation) oder nach Boden- und Felsklassen (hinsichtlich ihrer Lösbarkeit und Verarbeitbarkeit).

Kennzeichnende Parameter, wie Scherfestigkeit, Reibungswinkel, Kohäsion, Korn-zu-Korn-Druck und Adhäsion, definieren die grundlegenden Festigkeitseigenschaften von Böden und geben Auskunft über das bodenmechanische Verhalten in den wesentlichen Grundzügen.

Verschiedene Böden weisen unterschiedliche Eignungen als Baugrund und als Baustoff auf. Nichtbindige und bindige Böden sowie organische Böden bzw. Anschüttungen und Auffüllungen geben eine große Bandbreite an unterschiedlichsten Eigenschaften und (oftmals sehr eingeschränkten) Verwendungszwecken wider.

Geogenetisch bedingt gibt es unterschiedliche Trennflächen im Locker- und Festgestein. Die Schichtung ist sedimentationsbedingt und folglich für alle geschichteten Böden (Lockergesteine) bzw. verfestigten Böden (Festgestein) von besonderer Bedeutung. Die Schieferung hingegen ist ein Merkmal metamorpher Gesteine (Festgestein) und bewirkt ausgeprägt anisotrope Eigenschaften. Klüfte entstehen durch Überbeanspruchung, sind vor allem tektonisch bzw. thermisch bedingt und können in allen Gesteinen (Festgestein) vorkommen.

„Ohne Wasser im Boden bräuchten wir keine eigene Bodenmechanik“ hat sinngemäß *Terzaghi* einst sehr pointiert zum Ausdruck gebracht. Damit soll auf die entscheidende **Bedeutung des Wassers im Boden** hingewiesen werden. Das im Porenraum an bzw. zwischen den Körnern vorkommende Wasser zeigt sich in unterschiedlichen Erscheinungsformen vom hygroskopischen Wasser (Saugwasser, Adsorptionswasser), Haftwasser, Kapillarwasser (Porensaugwasser) bis zum Sickerwasser.

In einem größeren Zusammenhang wird das **Grundwasser** betrachtet, welches als unterirdisches Wasser die Hohlräume des Untergrundes zusammenhängend ausfüllt. Dessen Bewegung wird ausschließlich oder nahezu ausschließlich von der Schwerkraft und den durch die Bewegung selbst ausgelösten Reibungskräften bestimmt. Grundwasser kann als freies, gespanntes, artesisch gespanntes oder schwebendes Wasser auftreten. Es kann auch als Berg- oder Hangwasser vorkommen. Im wasserdurchlässigen Grundwasserleiter (Aquifer) kann sich das Wasser (frei) bewegen. Grundwasserstauer bilden hingegen nahezu undurchlässige, stauende Boden- oder Gesteinsschichten als untere (und/oder obere) Abgrenzung des Grundwasserleiters. Grundwasser kann demgemäß auch in mehreren voneinander getrennten Grundwasserhorizonten auftreten.

Der **Porenwasserdruck** ist der Druck des Porenwassers im wassergesättigten Boden. Diese neutrale Spannung ist gleich dem Produkt aus dem spezifischen Gewicht des Wassers und der Wasserspiegellhöhe in einem Standrohr über dessen Fußpunkt bzw. über dem betrachteten Punkt, unabhängig davon, ob es sich um freies oder gespanntes Grundwasser handelt. Durch Änderungen im Boden, beispielsweise durch bauliche Maßnahmen, kann es zu Porenwasserüber- oder -unterdrücken kommen, welche die Eigenschaften des Bodens entscheidend beeinflussen können.

3. UNTERGRUNDERKUNDUNG

Ziel und Zweck jeder geotechnischen **Untergrunderkundung (Baugrunderkundung)** liegt in der Beschaffung von Informationen über den Untergrundaufbau sowie über die Bodenbeschaffenheit. Neben den bodenphysikalischen bzw. -mechanischen Kennwerten sind auch die hydrologischen Eigenschaften von großer Bedeutung. Demzufolge müssen auch die Grundwasserverhältnisse ausreichend bekannt sein, um Einflüsse des Wassers auf das zukünftige Bauwerk sowie auf die Änderung der Bodeneigenschaften einschätzen zu können.

Heute stehen unzählige Vorschriften (Normen und Richtlinien) zur Verfügung, in denen Maßnahmen zur Erkundung des Untergrundes geregelt sind. Wesentlich ist es jedoch, jedes einzelne Vorhaben gesondert zu betrachten („Prototyp“) und die erforderlichen Maßnahmen ingenieurmäßig begründet bzw. beurteilt („Engineering Judgement“) zu planen und durchzuführen.

Eine umfassende Untergrunderkundung setzt sich im Allgemeinen aus einer **Vorerkundung** und einer **Haupterkundung** (geotechnische Untersuchungen) zusammen, ev. ergänzt durch geophysikalische Untersuchungen, Probelastungen, ingenieurbio-logische Untersuchungen und/oder chemisch-analytische Untersuchungen des Bodens und des Grundwassers.

Während die Vorerkundung zu Beginn eines Projektes in erster Linie eine Recherche und Sammlung von bereits vorliegenden Informationen beinhaltet (Archivmaterial/Baupläne, Geologie, Luftbildaufnahmen, örtliche Erfahrungen, Ortsbegehungen/Flurnamen, bestehende Untersuchungen, Kampfmittelerkundung), werden im Zuge der Haupterkundung neue Erkenntnisse durch direkte bzw. indirekte geotechnische Aufschlussmethoden generiert.

Direkte Aufschlussmethoden gewähren einen „Blick in den Untergrund“. Bodenproben können entnommen werden, an denen in weiterer Folge bodenphysikalische bzw. bodenmechanische Untersuchungen (im Erdbaulabor) durchgeführt werden. Die wichtigsten direkten Aufschlussmethoden sind:

- Schürfe
- Erkundungsstollen
- Bohrungen (verschiedene Bohrverfahren wie Dreh- bzw. Rotationskern-, Rammkern-, Schlag- und Greiferbohrungen sowie Kleinbohrverfahren)

Indirekte Aufschlussmethoden repräsentieren eine vielfältige Gruppe an Verfahren, bei denen durch Korrelationen zwischen physikalischen Messgrößen und geotechnischen oder hydrologischen Kennwerten der Untergrund sowie das Grundwasser überprüft werden können. Die wichtigsten indirekten Aufschlussmethoden sind:

- Sondierungen (unterschiedliche Sondierverfahren wie Ramm-, Bohrlochramm-, Nut-, Druck-Flügel- und Seitendrucksondierungen)

Grundwassererkundungen bzw. **-beobachtungen** können erfolgen durch:

- Grundwasserbeobachtungen in Grundwassermessstellen
- Pumpversuche bzw. Auffüllversuche (zur Durchlässigkeitsbestimmung)
- Messung von Fließrichtung und Strömungsgeschwindigkeit
- Porenwasserdruckmessung

In Ergänzung zu den geotechnischen Untersuchungen kann die Geophysik Anwendung finden. **Geophysikalische Untersuchungen** zählen zu den indirekten Erkundungsmethoden und geben mit nur einem einzigen Messvorgang Auskunft über die Bodenverhältnisse unter einem verhältnismäßig großen Flächenbereich bzw. entlang eines Messprofils. Aufgrund dieser Tatsache wird die Geophysik in erster Linie für ausgedehnte Bauwerke bzw. Baustellen eingesetzt, wobei auch punktförmige Untersuchungen mit hierfür geeigneten Geräten (Bohrlochgeophysik) möglich sind. Die Qualität der Messdaten wird allerdings von vielen Faktoren beeinflusst und hat demnach nicht immer eindeutige Ergebnisse zur Folge. Als Erkundungsmethode wird die Geophysik (vor allem die Seismik) häufig zur Interpretation der Schichtverläufe sowie zur Abschätzung von Bodenkennwerten zwischen den direkten Aufschlüssen (Bohrungen) verwendet. Die wichtigsten geophysikalischen Untersuchungsmethoden sind:

- Seismik (reflexionsseismische bzw. refraktionsseismische Verfahren, Refraktionstomographie, Oberflächenwellenseismik, Bohrlochseismik)
- Gravimetrie
- Geoelektrik bzw. Elektromagnetik
- Radiometrie
- Georadar
- Geomagnetik
- Geothermik
- Bohrlochgeophysik

Die im Rahmen der Untergrunderkundung gewonnenen Informationen stellen die Grundlage für die Erstellung eines **Untergrundmodells** dar. Die Ergebnisse aus den direkten und indirekten geotechnischen Untersuchungen sowie aus den Grundwassererkundungen sind jedoch nur als lokale „Nadelstiche“ zu betrachten. Um einen ausreichend genauen, räumlichen Überblick über den untersuchten Boden zu bekommen, ist es demnach notwendig, die Informationen aus den punktuellen Versuchen in ein möglichst räumliches Modell überzuführen. Dazu bedient man sich in erster Linie zweidimensionaler geologisch-/geotechnischer Längenschnitte bzw. komplexer räumlicher Untergrundmodellen. Darüber hinaus ist es sinnvoll, Homogenbereiche mit vergleichbaren geologischen Formationen bzw. mit vergleichbaren bodenphysikalischen bzw. -mechanischen Eigenschaften festzulegen.

4. BODENKENNGRÖSSEN UND BODENKLASSIFIZIERUNG

Ausgehend vom Aufbau des Bodens in Form des sog. „**Dreiphasensystem**“ (Zusammensetzung aus Feststoff und Porenraum, der zum Teil oder zur Gänze mit Wasser gefüllt sein kann) werden die wesentlichen **Klassifizierungsmerkmale** von Böden betrachtet, die in den einzelnen Kapiteln diskutiert werden.

Von grundlegender Bedeutung für die Beschreibung des Bodens ist die **Korngrößenverteilung** mit den zugehörigen Kennzahlen (Ungleichförmigkeitszahl, Krümmungszahl) zur Klassifizierung der Stufung der Körnungslinie ((sehr) eng-, intermittierend, weitgestuft). Das Korngefüge sowie die Kornform und die Kornrauigkeit stellen wichtige ergänzende Merkmale dar, die allesamt Einfluss auf die Eigenschaften des Bodens haben.

Die **Mineralogie des Bodens** spielt eine entscheidende Rolle insbesondere bei fein(st)körnigen Böden. Das Wesen der (aktiven) Tonminerale wird erläutert, womit ein grundlegendes Verständnis für deren Eigenschaften und der technischen Bedeutung vermittelt werden soll.

Mineralhärte, Kalkgehalt und **organische Beimengungen** bestimmen ebenfalls maßgeblich die Eigenschaften von Böden und sind bei Bedarf labortechnisch zu ermitteln.

Der sog. „**Einheitswürfel**“ ist ein vereinfachtes und gleichzeitig sehr effizientes Modell zur Beschreibung des Dreiphasensystems, bestehend aus Feststoff sowie Wasser und Luft in den Poren, mit den wesentlichen Bodenkennwerten, wie Porenanteil und Porenzahl, Wassergehalt und Sättigungsgrad, die mittels Labor- und Feldversuchen bestimmt werden. Verschiedene Wichten bzw. Dichten des Bodens sowie deren Bestimmung im Labor und im Feld werden vorgestellt, die im Gegensatz zu herkömmlichen Baustoffen (wie z.B. Beton und Stahl) in wesentlich größeren Bandbreiten variieren und folglich von besonderer Bedeutung für die Beschreibung und das Verhalten von Böden sind.

Die **Verdichtbarkeit** verschiedener Böden und Korngemische variiert in großer Bandbreite, hängt in erster Linie von der Kornverteilung bzw. vom Wassergehalt ab und lässt sich versuchstechnisch mit dem *Proctor*-versuch bestimmen. Die **Lagerungsdichte von Böden** mit den Grenzen der lockersten und dichtesten Lagerung stellt dafür ein wichtiges Klassifizierungsmerkmale dar.

Die **Zustandsform (Konsistenz)** ist neben der Korngrößenverteilung das wichtigste Klassifizierungsmerkmal von feinkörnigen, bindigen Böden, deren Eigenschaften sehr stark vom Wassergehalt abhängen, formal beschrieben durch die (drei) *Atterberg*'schen Zustandsgrenzen:

- Fließgrenze
- Ausrollgrenze
- Schrumpfgrenze

Daraus lassen sich wichtige Kennzahlen, wie die Plastizitätszahl und unter Berücksichtigung des natürlichen Wassergehalts die Zustandszahl (Konsistenzzahl) ableiten. Die A-Linie von *Casagrande* dient der Einordnung von bindigen Böden hinsichtlich ihrer plastischen Eigenschaften (gering, mittel, ausgeprägt plastische Schluffe und Tone).

Abschließend wird zur Information die **Bodenklassifizierung** nach Bodengruppen bzw. nach der Lösbarkeit angegeben.

5. EINFLUSS DER TEMPERATUR AUF BÖDEN

Die **thermischen Eigenschaften der Böden** hängen sehr stark von Korngröße, Korngrößenverteilung sowie von Wassergehalt bzw. Sättigungsgrad ab, ebenso wie die Wärmeübertragungsmechanismen, die in erster Linie durch Wärmeleitung (Konduktion) und bei stark durchlässigen, (nahezu) wassergesättigten Böden vorrangig durch Wärmeströmung (Konvektion des strömenden Grundwassers) erfolgt. Andere Wärmeübertragungsmechanismen sind eher nur von untergeordneter Bedeutung.

Die Wärmeleitung wird durch eine Differentialgleichung höherer Ordnung (Bipotentialgleichung) beschrieben, die durch die Temperaturleitfähigkeit (Diffusivität) bestimmt wird; diese setzt sich aus Wärmeleitfähigkeit, spezifischer Wärmekapazität und Dichte des festen Mediums zusammen, allesamt variable Größen in unterschiedlichen Böden.

Wesentlich ist die **Frosteinwirkung** auf Böden, wobei insbesondere die **Eislinsenebildung** in vorrangig feinkörnigen (schluffigen) Böden zu beachten ist, da diese zu enormen Frosthebungen und folglich Frostschäden an Bauwerken führen kann. Frostkriterien und Frostversuche dienen der Einstufung zur „Frostbeständigkeit“ des Einzelkorns und zur „Frostsicherheit“ des gesamten Korngefüges.

Die thermischen Eigenschaften von Böden erlauben zahlreiche Anwendungen, auf die am Ende des Skriptums zum Thema 5 kurz eingegangen wird.

6. HYDRAULISCHE EIGENSCHAFTEN VON BÖDEN

Die **hydraulischen Eigenschaften von Böden** und die damit zusammenhängenden Mechanismen sind von größter Bedeutung für das mechanische (hydraulische) Verhalten von Böden, insbesondere wenn diese wassergesättigt sind. Ausgehend von der Definition der Durchlässigkeit, basierend auf dem *Darcy*'schen Gesetz, wird auf unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung der Durchlässigkeit im Labor und im Feld eingegangen. Die Kapillarität bzw. kapillare Steighöhe und das Wasseraufnahmevermögen sind verantwortlich für wichtige physikalische Vorgänge in den Böden, wie beispielsweise die Ausbildung der Saugspannung.

Die **Wirkung des Wassers im Boden** ist vielfältig und drückt sich vor allem im Wasserdruck aus, der sich hydrostatisch oder auch dynamisch als Strömungswasserdruck ausbilden kann.

Das Prinzip der totalen und effektiven Spannungen wurde von *Terzaghi* eingeführt und stellt eines der zentralen Modelle zur Beschreibung der Spannungsverhältnisse im Phasensystem des Bodens dar: Die totalen Spannungen setzen sich aus den zwischen den Körnern wirkenden Spannungen (= effektive Spannungen) und dem Porenwasserdruck des im Korngefüge befindlichen Wassers zusammen. Im statischen Fall wird damit der Auftrieb beschrieben, im dynamischen Fall die Grundwasserströmung. Im Zusammenhang mit der Wasserbewegung im Boden wird von laminarer Strömung ausgegangen, die sich durch eine Differentialgleichung höherer Ordnung (Bipotentialgleichung; analog zur Wärmeleitung, siehe Thema 5) abbilden lässt.

Von größter Bedeutung ist das **Aufschwimmen (Auftrieb)**, dessen Nachweis gleichwertig sowohl mit effektiven als auch mit totalen Spannungen geführt werden kann; es ist jedoch zu beachten, dass die jeweilige Sicherheitsdefinition zu unterschiedlichen Größen der Sicherheitskoeffizienten bei gleichem Sicherheitsniveau führt!

Hydraulischer Grundbruch bedeutet hydraulisches Versagen des Korngefüges durch einen so großen Strömungsdruck, der vom Korngefüge nicht mehr aufgenommen werden kann. Zwei Betrachtungsweisen (Vergleich der wirkenden Kräfte bzw. Vergleich der hydraulischen Gefälle) führen zum gleichen Ergebnis, wobei beide Nachweise mit effektiven Spannungen geführt werden.

Weitere hydraulische Versagensmechanismen (Innere Erosion, Äußere Erosion, Subrosion, Kolmation) werden betrachtet sowie Kriterien zur Filterstabilität an der Schichtgrenze von Böden mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung und Vermeidung von Erosion vorgestellt. Von zentraler Bedeutung ist dabei die von *Terzaghi* eingeführte **Filterregel**, die sich aus einer mechanischen Filterfestigkeit (Verhinderung der Kontakterosion im Boden) und aus der hydraulischen Wirksamkeit des Filters (Gewährleistung einer ausreichenden Durchlässigkeit im Kontaktbereich) zusammensetzt.

7. FORMÄNDERUNGSEIGENSCHAFTEN VON BÖDEN

Boden ist ein äußerst komplexer (Bau-)Stoff, der sich bekanntlich aus Feststoff und Porenraum, der zum Teil oder zur Gänze mit Wasser gefüllt sein kann („Dreiphasensystem“), zusammensetzt. Die **Formänderungseigenschaften von Böden** sind daher im Allgemeinen geprägt von einem nicht-linearen, anelastischen bzw. elasto-plastischen (Last-)Verformungsverhalten, das von vielen Faktoren abhängt, wie beispielsweise Korngrößenverteilung, Lagerungsdichte grobkörniger bzw. Konsistenz feinkörniger Böden, Sättigungsgrad, Vorbelastungsgeschichte usw. Auch weisen Böden häufig anisotrope Eigenschaften auf, bedingt durch den Sedimentationsprozess und die damit zusammenhängende Schichtung des Bodenaufbaus.

Trotzdem wird der Bodenmechanik (zunächst) die Theorie des elastisch isotropen Raums zugrundegelegt (vgl. Festigkeitslehre) und deren Zusammenhänge werden angewendet, die dahingehend vertieft werden, dass verschiedene Moduln definiert werden, die jedoch allesamt in einem eindeutigen Zusammenhang zueinander stehen. **Drei Arten von Druckversuchen** – mit unbehinderter, behinderter und verhinderter Seitendehnung – bilden die Grundlage dafür. Die aus dem einaxialen Druckversuch, dem Triaxialversuch und dem Kompressionsversuch abgeleiteten Zusammenhänge aus den räumlichen Spannungen und Dehnungen führen auf den bekannten Elastizitätsmodul sowie die beiden weniger bekannten Moduln, den modifizierten Elastizitätsmodul und den Kompressions- bzw. Steifemodul. Die Querdehnzahl ist dabei bekanntlich eine unabdingbare Kenngröße.

Zahlreiche weitere Moduln lassen sich aus den theoretischen Zusammenhängen unter Berücksichtigung der Geometrie des betrachteten (Halb-)Raums angeben, wie beispielsweise der Verformungsmodul einer kreisförmigen, starren Platte an der (oberen) Berandung des Halbraums, welcher den statischen Lastplattenversuch repräsentiert. Ein Versuch, der häufig Anwendung in der Geotechnik findet, heute jedoch verstärkt durch den dynamischen Lastplattenversuch abgelöst wird.

Im dynamischen Fall spielen die Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten der Raumwellen, aber auch der Oberflächen- und Schichtgrenzwellen, eine wichtige Rolle. Die Zusammenhänge zwischen den dynamischen Kennwerten im elastisch isotropen (Halb-)Raum sind wiederum eindeutig.

Die nicht-linearen, anelastischen bzw. elasto-plastischen sowie anisotropen Eigenschaften des (geschichteten) Bodens werden in erster und einfacher Näherung durch eine inkrementelle Betrachtung berücksichtigt, beispielsweise durch Zuordnung unterschiedlich großer Werte der Moduln bei verschiedenen Laststufen.

Ein weiteres wesentliches Merkmal der Formänderungseigenschaften von Böden sind **zeitabhängige Verformungen**, die vorrangig bei feinkörnigen, bindigen Böden mit vergleichsweise geringer Durchlässigkeit auftreten. Zusätzlich zu den Sofortsetzungen gibt es also auch noch sog. Konsolidationssetzungen und Kriechsetzungen, zusammen bilden sie über die Zeit betrachtet die Gesamtsetzungen. Besonderes Augenmerk ist auf die Konsolidation (Konsolidierung) zu legen, bei der (selbst) unter gleichbleibender Belastung Porenwasser so lange aus dem gering durchlässigen, (nahezu) wassergesättigten, feinkörnigen Boden herausgedrückt wird, bis ein Gleichgewichtszustand der Spannungen zwischen dem durch die Belastung erzeugten Porenwasserüberdruck und den Spannungen im Korngerüst entsteht. Je geringer die Durchlässigkeit des Bodens ist, desto länger dauert dieser Vorgang, der eben als Konsolidation bezeichnet wird. In den 20er-Jahren des letzten Jahrhunderts hat *Terzaghi* erstmals diese Vorgänge im Boden beschrieben und die **eindimensionale Konsolidationstheorie** entwickelt. Diese gilt als Geburtsstunde der modernen Bodenmechanik.

Ausgehend vom Federmodell von *Terzaghi* werden die Differentialgleichung der eindimensionalen Konsolidationstheorie hergeleitet und Lösungsansätze der nur für sehr einfache Randbedingungen analytisch lösbaren Differentialgleichung angegeben.

Der **(experimentellen) Bestimmung der Zusammendrückbarkeit von Böden** widmet sich ein weiteres Kapitel. Ausgehend von der Definition des Steifemoduls wird der Kompressionsversuch (Oedometerversuch) diskutiert und die zahlreichen damit verbundenen Ergebnisse, die daraus abgeleitet werden können, werden vorgestellt. Der Versuch dient insbesondere auch der Bestimmung des Konsolidationsverhaltens von Böden und der Ermittlung der bestimmenden Parameter.

Abschließend zeigen zwei Anwendungsbeispiele die Bedeutung der Formänderungseigenschaften, insbesondere jene der zeitabhängigen Verformungen von Böden.

8. FESTIGKEITSEIGENSCHAFTEN VON BÖDEN

Die **Festigkeit von Böden** wird vorrangig über die Scherfestigkeit definiert und setzt sich im Allgemeinen aus **Reibungsfestigkeit**, gekennzeichnet durch den Winkel der inneren Reibung (Reibungswinkel), und **Eigenfestigkeit**, beschrieben durch die Kohäsion, zusammen.

Einleitend werden die Reibung bzw. die Reibungsfestigkeit „zwischen den Körnern“ und die verschiedenen Formen der Kohäsion, der sogenannten „Kornbindungskräfte“ feinkörniger Böden, vorgestellt. Neben der „echten“ Kohäsion tritt in teilgesättigten Böden ggf. auch die „scheinbare“ Kohäsion (Kapillarkohäsion) auf, eine Verzahnung zwischen den Körnern kann zu einer physikalisch bedingten Verzahnungskohäsion (interlocking), eine Verkittung zwischen den Körnern zu einer chemisch bedingten Verkittungskohäsion (cementation) führen.

Ursache und Entstehung von Kohäsion im Boden ist bis heute nicht zur Gänze geklärt. So hat es bereits *Terzaghi* sinngemäß zum Ausdruck gebracht: „Wenn man mich zu Beginn meiner Karriere gefragt hätte, was Kohäsion ist und wie diese im Boden funktioniert, hätte ich eher eine Antwort darauf geben können als jetzt am Ende meiner Karriere.“

Unter Berücksichtigung der Reibung und der Kohäsion in der Kornstruktur wird in der Bodenmechanik die Begrenzung der aufnehmbaren Schubspannungen durch das „*Mohr-Coulomb'sche* Versagenskriterium“ beschrieben (das bereits aus der Festigkeitslehre bekannt ist). Die Darstellung erfolgt zunächst im σ - τ -Diagramm, ebenso der (ebene) Spannungszustand, der durch den *Mohr'schen* Spannungskreis und den zugehörigen Formelapparat beschrieben wird. Berührt der Spannungskreis die Versagensgerade, kommt es in diesem Punkt zum Scherversagen. Oberhalb der Versagensgerade können physikalisch keine Spannungen auftreten.

Alternativ zum σ - τ -Diagramm kann die Darstellung des Versagenskriteriums und der Spannungen auch im sogenannten p-q-Diagramm erfolgen, eine insbesondere für wissenschaftliche Fragestellungen durchaus übliche Form.

Hinweis: Das *Mohr-Coulomb'sche* Versagenskriterium stellt das einfachste Kriterium dar, das in der Bodenmechanik Anwendung findet und auch für sämtliche weitere Themen der Vorlesung verwendet wird. Weitere, verfeinerte Versagenskriterien bzw. (höherwertige) Stoffmodelle (auch: Stoffgesetze) sind nicht Gegenstand der Vorlesung und werden auch nur kurz am Ende des Skriptums in diesem Thema vorgestellt.

Wasser hat einen entscheidenden Einfluss auf die Scherfestigkeit von Böden. Die Beschreibung kann wiederum in totalen oder effektiven Spannungen erfolgen. Für nicht wassergesättigte Böden ist die totale Spannung gleich der effektiven Spannung, da kein Porenwasserdruck auftritt. Ist der konsolidierte Boden wassergesättigt, wirkt zusätzlich der Porenwasserdruck im Boden. Da Wasser keine Scherkräfte übertragen kann, werden die Reibungskräfte nur über die im Korngerüst wirksamen Kräfte, d.h. über die effektiven Spannungen, übertragen. Ist der unkonsolidierte Boden wassergesättigt und nur gering durchlässig, treten zufolge schneller Laständerung zusätzliche Porenwasserdrücke auf und die effektiven Spannungen (Korn-zu-Korn-Reibung) nehmen erst zeitverzögert mit dem Abklingen der Über- bzw. Unterdrücke im Porenwasser zu bzw. ab. Diesen Vorgang bezeichnet man bekanntlich als Konsolidation. Im unkonsolidierten Anfangszustand eines wassergesättigten, bindigen Bodens wird also die gesamte aufgebrachte äußere Spannung aufgrund der geringen Austrittsgeschwindigkeit bzw. der erst zeitverzögert einsetzenden Entwässerung des Bodens über den Porenwasserüberdruck abgetragen. Die auf das Korngerüst wirkende effektive Spannung ist zu diesem Zeitpunkt gleich Null. Folglich können in diesem Zustand auch keine Reibungskräfte zwischen den Körnern übertragen werden!

Die **Kapillarität** weist ebenfalls einen Einfluss auf die Scherfestigkeit auf, jedoch nur in teilgesättigten Böden, da sowohl im trockenen als auch im wassergesättigten Boden keine Kapillarkräfte bzw. dadurch bedingte Saugspannungen auftreten können. Die kapillarbedingten Saugspannungen führen im Allgemeinen zu einer temporären ("scheinbaren") Erhöhung der Scherfestigkeit des Bodens.

Für die **experimentelle Bestimmung der Scherfestigkeit** (vorrangig im Labor) stehen im Wesentlichen folgenden Versuche zur Verfügung:

- Einaxialer Druckversuch (für die rasche Bestimmung der Scherfestigkeit kohäsiver, feinkörniger Böden)
- Schüttversuch bzw. Abrutschversuch (für eine erste grobe Einschätzung des Reibungswinkels völlig kohäsionsloser Böden)
- Direkter Scherversuch (Rahmen-, Kreisring- und Wiener Routinescherversuch)
- Triaxialversuch (drainierter Versuch (D); konsolidierter undrainierter Versuch (CU) mit konstantem Volumen (CCV); unkonsolidierter, undrainierter Versuch (UU))

Mit den (weniger aufwändigen) direkten Scherversuchen und insbesondere mit den (aufwändigeren) Triaxialversuchen können unterschiedliche Szenarien der Konsolidation bzw. Entwässerung (Drainage) nachgebildet werden, womit auch die verschiedenen zugehörigen Scherparameter elegant bestimmt werden können.

Wie bereits weiter oben erwähnt, werden abschließend die in der Bodenmechanik verwendeten (höherwertigen) Stoffmodelle (auch: Stoffgesetze) vorgestellt. Dieser Abschnitt dient jedoch lediglich zur Information und ist nicht Gegenstand des Leistungsnachweises der gegenständlichen Vorlesung.

9. ERDDRUCK

Erddruck tritt auf, wenn Boden durch ein Bauwerk (Stützmauer) daran gehindert wird, sich als ungestützte Böschung einzustellen, die unter dem natürlichen Böschungswinkel (entspricht dem Winkel der inneren Reibung) ohne Stützung in sich standsicher wäre. Bei Betrachtung des *Mohr-Coulomb*'schen Versagenskriteriums können sich zwei **plastische Grenzzustände** in Abhängigkeit von Richtung und Größe der Bewegung zwischen Boden und Bauwerk ausbilden und dazwischen ein Zustand, bei dem keine Relativbewegung stattfindet:

- Der **aktive Erddruck** ist der kleinste Druck, den ein bestimmter Boden auf ein Bauwerk mit vorgegebener Geometrie ausüben kann. Dieses Minimum wird nur erreicht, wenn das Bauwerk dem Druck in gewissen Grenzen nachgeben kann, d.h. es bewegt sich geringfügig weg vom Boden.
- Der **passive Erddruck** oder **Erdwiderstand** ist der größte Druck, mit dem ein bestimmter Boden ein Bauwerk stützen kann. Dieses Maximum tritt im Allgemeinen erst bei einer vergleichsweise großen Bewegung des Bauwerkes hin zum Boden auf.
- Zwischen diesen beiden Werten liegt der **Erdruhedruck**, der auf starre und unverschiebliche Bauwerke wirkt, d.h. es kommt zu keiner Relativbewegung zwischen Bauwerk und Boden.

Bei der Erddrucktheorie nach *Rankine* wird davon ausgegangen, dass infolge einer Bewegung des Stützbauwerks das gesamte Erdreich hinter dem Bauwerk in den Zustand des plastischen Fließens gerät. Es bilden sich im Boden Scharen von Gleitflächen aus.

Im Gegensatz dazu betrachtet die Erddrucktheorie nach *Coulomb* die Verschiebung eines (starken) Gleitkörpers in einer einzigen Gleitfuge. Bewegt sich die Mauer, löst sich ein Teil des Erdreichs dahinter und rutscht auf einer Gleitfuge, die als eben angenommen wird, ab.

Es lässt sich zeigen, dass diese beiden fundamentalen Erddrucktheorien, die bis heute als Grundlage für die Erddruckberechnungen herangezogen werden, eindeutig ineinander übergeführt werden können.

Der Ermittlung des Erdruhedrucks sowie des aktiven und passiven Erddrucks homogener und geschichteter, kohäsionsloser bzw. kohäsiver Böden mit und ohne Auflast, oberhalb und unterhalb des Grundwasserspiegels bzw. bei strömendem Grundwasser wird breiter Raum gewidmet, wobei zwischen rechnerischen und grafischen Verfahren unterschieden wird. Zwischen Stützbauwerk und Boden kann erforderlichenfalls eine Wandreibung berücksichtigt werden.

Die Erddruckverteilung auf verschiedene Typen von Stützmauern wird gezeigt. Eine verschiebungsabhängige Mobilisierung des Erdwiderstands kann mit dem Bettungsmodulverfahren berechnet werden.

Anschließend werden die wichtigsten **Sonderformen des Erddrucks** vorgestellt:

- Erddruckumlagerungen zufolge bestimmter Bewegungsmuster zwischen Boden und Stützbauwerk
- Erhöhter aktiver Erddruck zufolge einer nur sehr geringen Nachgiebigkeit (Bewegung) des Stützbauwerks
- Verdichtungserddruck zufolge Verdichtung der Hinterfüllung hinter einem Stützbauwerk
- Silo(erd)druck in einem räumlich eng begrenzten Hinterfüllbereich zufolge der Übertragung eines Teiles des Bodeneigengewichts über Schubspannungen auf die beiden nahe zueinander befindlichen Wände (Gewölbewirkung)
- Kriechdruck (Staudruck, Gleitdruck) zufolge von Kriechbewegungen eines Hanges hin zum Stützbauwerk

Sämtliche Überlegungen werden für ebene Spannungszustände angestellt. In einem abschließenden informativen Kapitel werden grundsätzliche Hinweise zum räumlichen aktiven und zum räumlichen passiven Erddruck (Erdwiderstand) gegeben.

10. SPANNUNGEN UND VERFORMUNGEN IM UNTERGRUND

Die **Wechselbeziehung (Interaktion) zwischen Boden und Bauwerk** ist gekennzeichnet durch Spannungen und Verformungen, deren Größe und Verteilung einerseits von den Bauwerkslasten bzw. der Fundamentgeometrie und andererseits von den Eigenschaften des Bodens abhängen. Will man die Verteilung der Sohlnormalspannungen in der Sohlfuge eines Gründungskörpers bestimmen, so steht man vor einem hochgradig statisch unbestimmten Problem. Bestimmend ist immer die Verträglichkeitsbedingung zwischen der sich ausbildenden Biegelinie des Fundaments und der Setzungsmulde des Bodens, wobei diese im Gegensatz zur Biegelinie nicht an den Rändern des Bauwerks endet.

Die wichtigsten im Zuge der Vorlesung vorgestellten Verfahren zur Berechnung der Sohlspannungsverteilung liefern Näherungslösungen, die sich unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen ergeben:

- Spannungstrapezverfahren
- Bettungsmodulverfahren
- Steifezahlverfahren

Starre Fundamente einerseits und schlaffe Bauwerke andererseits definieren die Grenzen der möglichen Sohlspannungsverteilung und der Setzungsbildung. Während das Spannungstrapezverfahren von einer konstanten, trapez- oder dreiecksförmigen Spannungsverteilung ausgeht, wird beim Bettungsmodulverfahren das Spannungs-Verformungsverhalten des Bodens durch unabhängig voneinander wirkende Federn (Bettungsmodul) modelliert. Damit ist der Sohldruck an allen Stellen proportional zur Einsenkung an der jeweils gleichen Stelle, nebeneinander befindliche Federn üben keinen Einfluss aufeinander aus. Das Steifezahlverfahren geht bei der Berechnung der Bodenverformung vom tatsächlichen Spannungs-Verformungs-Verhalten des Bodens und von den Grundsätzen der Setzungsberechnung aus. Im Gegensatz zum Bettungsmodulverfahren kommt es beim Steifezahlverfahren zu keinen Unstetigkeiten in der Setzungslinie. Es ist in der Anwendung jedoch wesentlich aufwändiger.

Für die **Ermittlung der Spannungsverteilung im Untergrund** wird die Elastizitätstheorie auf den isotropen und homogenen Halbraum angewendet, obwohl der Boden bekanntlich ein nicht-lineares, anelastisches bzw. elasto-plastisches Spannungs-Dehnungsverhalten aufweist (vgl. Thema 7). Die Berechnung der Spannungsverteilung im Boden unter dem Eckpunkt eines Rechteckfundamentes über die Tiefe wird mittels der sog. „*Steinbrennerkurven*“ anschaulich vorgestellt. Das Superpositionsprinzip der Elastizitätstheorie ermöglicht damit die Berechnung der Spannungen in jedem beliebigen Punkt des Bodens.

Die zufolge der Bauwerksbelastungen verursachten Spannungsänderungen führen zu **Verformungen im Untergrund**, die im Allgemeinen als **Setzungen** bezeichnet werden. Entlastungen können zu Hebungen führen. Bekanntlich setzen sich die Verformungen im Untergrund aus einem zeitunabhängigen Anteil, den sog. Sofortsetzungen, und zeitabhängigen Komponenten, den sog. Konsolidationssetzungen (Primärsetzungen) und den Kriechsetzungen (Sekundärsetzungen) zusammen. Für die Bestimmung der zeitabhängigen Primärsetzungen kann die bereits vorgestellte Konsolidationstheorie nach *Terzaghi* verwendet werden, für die rechnerische Abschätzung der Sekundärsetzungen können verschiedene Kriechgesetze (rheologische Ansätze) Anwendung finden. Endsetzungen – nach dem Abklingen der zeitabhängigen Verformungen – werden zumeist vereinfacht über die Spannungsverteilung im Untergrund (beispielsweise mittels „*Steinbrennerkurven*“) unter Berücksichtigung des anzuwendenden Steifemoduls des Bodens für den Fall der verhinderten Seitendehnung berechnet, dessen Verlauf bekanntlich spannungs- bzw. tiefenabhängig und im

Allgemeinen (ausgeprägt) nichtlinear ist. Für praktische Zwecke ist für die Bestimmung der Setzungen eine Grenztiefe zu ermitteln, bis zu der nennenswerte Setzungsanteile auftreten, die darunter liegenden Bodenschichten werden für die Setzungsberechnung nicht berücksichtigt.

Es können jedoch nicht nur Bauwerkslasten Setzungen verursachen, sondern auch Veränderungen des Grundwasserspiegels (Grundwasserabsenkungen), da im Absenkungsbereich der ursprünglich unter Auftrieb stehende Boden (effektive Spannungen) die Sättigungs- bzw. die Feuchtwichte annimmt, die (deutlich) höher sind als die Wichte unter Auftrieb. Setzungen entstehen folglich aufgrund der Erhöhung des Eigengewichts des Bodens im Absenkungsbereich.

Setzungsbeobachtungen in der Natur dienen einerseits zum Nachweis der rechnerisch abgeschätzten Setzungen, andererseits können aus dem zeitlichen Verlauf Prognosen der weiteren Setzungen bis hin zur Endsetzungen angestellt werden. Das Verfahren von *Sherif*, das sich in der Praxis als Prognosewerkzeug bewährt hat, geht von einer hyperbolischen Entwicklung der Setzungen über die Zeit aus.

Setzungen können je nach Größe und Verteilung sowie nach deren zeitlicher Entwicklung zu **Schäden** führen. Als Kriterien werden grundsätzlich zulässige Werte für Setzungen, Setzungsunterschiede und Winkelverdrehungen bzw. Krümmungen definiert, die primär davon abhängen, wie setzungsempfindlich ein Bauwerk ist. Statisch bestimmte Systeme reagieren im Allgemeinen verträglicher auf Setzungsdifferenzen, wohingegen statisch unbestimmten Systemen anfälliger für Bauwerksschäden sind (Zwängspannungen).

11. BODENVERBESSERUNG

Ist der Untergrund nicht ausreichend tragfähig bzw. (sehr) setzungsempfindlich, besteht die Möglichkeit, die Eigenschaften des Bodens soweit zu verbessern, dass die Errichtung des Bauwerks ohne Tiefgründung erfolgen kann. Für die **Bodenverbesserung** steht eine große Palette an unterschiedlichen Methoden zur Verfügung, mit denen sich das Trag- und Setzungsverhalten der gering bzw. nicht tragfähigen Bodenschichten bedeutend verbessern lässt. Die Bodenverbesserungsverfahren lassen sich grundsätzlich wie folgt einteilen:

- Bodenersatz
- Bodenentwässerung
- Bodenverdichtung
- Bodenveränderung
- Bodenbewehrung

Beim **Bodenersatz** wird der wenig tragfähige bzw. setzungsempfindliche (weiche) Boden gegen geeignetes Material zum Teil oder zur Gänze bis zur tragfähigen Schicht ausgetauscht, das lagenweise eingebracht und verdichtet wird. Falls der Bodenaustausch unterhalb des Grundwasserspiegels bzw. bis in große Tiefen durchgeführt werden soll, kann der Aushub auch im Schutz von Bohrrohren (unter Wasserauflast) erfolgen. Verdrängungsverfahren werden seltener eingesetzt, ein früher angewendetes Verfahren ist die sog. „Moorsprengung“.

Die **Bodenentwässerung** kann auf unterschiedliche Weisen erfolgen. Die Grundwasserabsenkung ist die einfachste Form, bei der es zufolge des Verlustes der Auftriebswirkung zu einer Erhöhung der wirksamen Bodenwichte kommt, zufolge der sich der Boden unter dem Eigengewicht setzt. Dies funktioniert nur bei vergleichsweise grobkörnigen Böden mit hoher Durchlässigkeit. Feinkörnige Böden lassen sich entwässern, indem gezielt Wasserwegigkeiten geschaffen werden, beispielsweise mittels Vertikaldrains. In Kombination mit Vorlast- bzw. Überlastschüttungen wird deren Wirksamkeit deutlich erhöht. Alternativ dazu kann eine Vakuumentwässerung angewendet werden, bei der durch den Unterdruck das hydraulische Gefälle erhöht wird. Elektroosmotische Verfahren werden heute nur mehr selten verwendet.

Der **Bodenverdichtung** wird breiter Raum gewidmet, da sie mit ihren vielfältigen Verfahren zur oberflächennahen, mitteltiefen und tiefen Verdichtung eine zentrale Rolle zur Verbesserung der Bodeneigenschaften durch mechanische Einwirkung zur Verringerung des Porenraums einnehmen. Die Verdichtung von nichtbindigen grobkörnigen Böden erfolgt primär zufolge der Überwindung der Kornreibung, vorzugsweise durch dynamische Einwirkung mit Auflast. Die Verdichtung von bindigen feinkörnigen Böden wird aufgrund der geringeren Durchlässigkeit stark vom Wassergehalt beeinflusst und erfolgt hauptsächlich durch statische Auflast, Kneten sowie Aufbrechen bzw. Aufreißen der Kornstruktur.

Statische und dynamische Walzen mit unterschiedlich angeregten Bandagen (Vibrations- und Oszillationswalzen, Walzen mit Richtschwinger und selbstregelnde Walzen) bzw. Bandagenformen (Glattmantel, Stampf-/Schafffuß-, Polygonbandage) dienen vorrangig zur oberflächennahen Verdichtung von lagenweisen eingebrachten Materialien. Dynamische Walzen können zufolge neuerer Entwicklungen gleichzeitig zur walzenintegrierten Verdichtungskontrolle (FDVK) herangezogen werden, dabei wird die dynamische Interaktion zwischen der dynamisch angeregten Bandage und dem Untergrund genutzt.

Die tiefreichende Verdichtung erfolgt für nichtbindige und bindige Böden auf unterschiedliche Art und Weise. Die Rütteldruckverdichtung zur Verringerung der Lagerungsdichte von grobkörnigen Böden bedient sich eines dynamisch angeregten Tiefenrüttlers (Torpedorüttlers), der zufolge seines Eigengewichts bzw. zufolge Andrucks unter Zuhilfenahme einer Wasserspülung tief in den Boden eindringt und die Verdichtung beim Ziehen im sog. Pilgerschrittverfahren (alternierendes schrittweises

Ziehen und Wiedereindringen des Rüttlers) bewerkstelligt. Die Rüttelstopfverdichtung hingegen wird für die Herstellung von „Kiessäulen“ mit Hilfe eines Schleusenrüttlers zur Verbesserung von feinkörnigen bzw. gemischtkörnigen Böden herangezogen. Die seitlich im anstehenden Boden gebetteten Kiessäulen weisen eine höhere Tragfähigkeit und geringere Verformbarkeit als der umgebende Boden auf und bilden zusätzlich vertikale durchlässige Elemente, die zur Entwässerung des Bodens und folglich zur Konsolidationsbeschleunigung beitragen. Anstelle von Kiessäulen können auch mittels Bindemittel vergütete säulenartige Tragelemente erzeugt werden, die in ihrer Wirkung Tiefgründungselementen ähnlich sind. Böden können impulsartig mit größerer Tiefenwirkung durch die Dynamische Intensivverdichtung und mit geringerer Tiefenwirkung mittels Impulsverdichtung verdichtet werden.

Bodenverbesserung durch **Bodenveränderung** basiert auf dem Prinzip des Einmischens von Bindemitteln (Kalk, Zement etc.) zur Stabilisierung (Verbesserung, Verfestigung) des Bodens. Dies kann lageweise im sog. Ortsmischverfahren (Mixed-in-Place) oder im Zentralmischverfahren (Mixed-in-Plant) erfolgen. Je nach Anforderung und Bodenart ist das Bindemittel zu wählen, wobei in bindigen Böden vorrangig Kalk, in grobkörnigen Böden Zement und in gemischtkörnigen Böden zumeist Kalk-Zement-Mischungen zur Anwendung kommen. Zur tiefreichenden Verbesserung von Lockergesteinen werden verschiedene Arten von Injektionen eingesetzt. Beim Düsenstrahlverfahren wird der Boden mit hohem Druck erodiert und mit Bindemittel vermischt, sodass tragfähige Elemente im Boden bis in größere Tiefen entstehen. Böden können tiefreichend auch mittels sog. Nassmisch- und Trockenmischverfahren durch Einbringung von Bindemitteln verbessert werden. Eine Sonderform der temporären Bodenverbesserung stellt die Bodenvereisung durch Gefrieren mittels Sole/Lauge oder flüssigen Stickstoff dar.

Mit Geokunststoffen kann eine **Bodenbewehrung** erzielt werden, wobei die Hauptfunktionen der verschiedenen Geokunststoffprodukte (Geovliese, -gewebe, -gitter, -verbundstoffe, Folien) Trennen, Filtern, Drainieren, Schützen, Abdichten und Schutz vor Erosion sind.

12. FLACHGRÜNDUNGEN

Ist der Untergrund ausreichend tragfähig bzw. wenig setzungsempfindlich oder ist der Boden vorab verbessert worden, kommen i.A. **Flachgründungen** zur Ausführung. Das sind Gründungen mit geringer Einbindetiefe in den Boden. Bauwerkslasten können über Einzel-, Streifen- und Plattenfundamente bzw. Fundamentrost in den Untergrund übertragen werden. Werden die Lasten über eine Bodenplatte abgeleitet, spricht man von Flächengründungen.

Flachgründungen leiten Belastungen des Bauwerkes in den Untergrund. Art und Größe der Belastung führen zu Spannungsänderungen im Untergrund, die bekanntlich mit Verformungen verbunden sind. Diese können in weiterer Folge zu lotrechten Bewegungen (Setzungen), horizontalen Verschiebungen oder Verdrehungen am (starrten) Bauwerk führen, die einen **Verlust der Gebrauchstauglichkeit** zur Folge haben können.

Die Spannungsänderung kann jedoch nur solange erhöht werden, bis ein Versagen des Untergrundes eintritt. Dabei kann das Versagen durch verschiedene Szenarien eintreten, welche einen **Verlust der äußeren Standsicherheit** zur Folge haben. Der Versagenszustand kann durch die entsprechenden bodenmechanischen Nachweise beschrieben werden, welche (im Regelfall) auf dem *Mohr-Coulomb*'schen Versagenskriterium basieren.

Die Tragfähigkeits- bzw. Lagesicherheitsberechnungen zum Nachweis der äußeren Standsicherheit können in Abhängigkeit von der Versagensform wie folgt eingeteilt werden:

- Nachweis des Gleitwiderstandes (Tragfähigkeit)
- Nachweis gegen Kippversagen [bei stark exzentrischer Belastung] (Lagesicherheit)
- Nachweis des Grundbruchwiderstandes (Tragfähigkeit)
- Durchstanznachweis (Sonderfall des Grundbruchnachweises) (Tragfähigkeit)
- Nachweis gegen Aufschwimmen [bzw. der Auftriebssicherheit] (Lagesicherheit)

Die einzelnen Nachweise werden vorgestellt und diskutiert, wobei exemplarisch auf die standardisierten Berechnungen entsprechend des geltenden Normenwerks eingegangen wird. Grundlage dafür bildet der Eurocode 7, welcher die europäische Normung für den Bereich der Geotechnik abdeckt. Die Umsetzung des europäischen Normenwerkes erfolgt durch nationale Anwendungsdokumente bzw. nationale Normen, in Österreich durch die Regelungen in den ÖNORMEN. Die aktuelle Normung beruht auf dem Teilsicherheitskonzept, bei dem die Einwirkungen (Beanspruchungen) und Widerstände getrennt voneinander mit Teilsicherheitsbeiwerten beaufschlagt werden und der Nachweis durch einen direkten Vergleich Einwirkungen (Beanspruchungen) und Widerständen oder (gleichwertig) mittels Ausnutzungsrades geführt wird.

Dem **Nachweis des Gleitwiderstandes** wird das bekannte *Coulomb*'sche Reibungsgesetz in der Sohle zwischen dem Gründungskörper und dem anstehenden Boden zugrunde gelegt, ggf. können auch der mobilisierte Erdwiderstand oder äußere Kräfte berücksichtigt werden.

Der **Nachweis gegen Kippversagen** ist bei stark exzentrischer Belastung bzw. bei ungünstiger Gebäudegeometrie, bei dem eine besondere Kippgefährdung besteht, zu führen. Wesentliches Kriterium dafür ist, dass die aus den ständigen Lasten resultierende Sohldruckkraft innerhalb der 1. Kernweite angreift. In diesem Fall tritt bekanntlich kein Klaffen der Sohlfuge auf. Der aus der Gesamlast resultierende Sohldruck darf jedoch in begrenztem Umfang ein Klaffen der Sohlfuge hervorrufen, nämlich bis maximal zum Schwerpunkt der Sohlfläche, die durch die 2. Kernweite definiert ist.

Der **Nachweis des Grundbruchwiderstandes** beruht auf der Grundbuchtheorie von *Prandtl*. Mit zunehmender Belastung eines Fundaments tritt nach anfänglich nahezu linear-elastischem Verhalten eine zunehmende Plastifizierung durch lokal begrenztes Überschreiten der Scherfestigkeit des Bodens ein, und zwar bis der Boden entlang von ausgebildeten Gleitflächen versagt. Dieser Vorgang wird als mechanischer Grundbruch und der dabei im Boden hervorgerufene Widerstand als Grundbruchwiderstand bezeichnet. Auf Grundlage des *Mohr-Coulomb*'schen Versagenskriteriums wird gezeigt, dass sich zunächst unter dem Fundament ein sog. aktiver Versagenskeil bildet, der näherungsweise über eine logarithmische Spirale in einen passiven Versagenskeil übergeht. Wesentliche Eingangsparameter zur Berechnung der Grundbruchlast sind neben Geometrie und Einbindetiefe des Gründungskörpers der Lastangriffspunkt und die Lastneigung sowie die bestimmenden Bodenparameter Reibungswinkel, Kohäsion und Wichte des Bodens, wobei unterhalb des Grundwasserspiegels immer die Wichte unter Auftrieb anzusetzen ist. Die Schichtung des Bodens spielt ebenso eine entscheidende Rolle.

Der **Durchstanznachweis** ist ein Sonderfall des Grundbruchnachweises und ist immer dann zu führen, wenn das Fundament in eine Bodenschicht mit eher geringer Schichtdicke einbindet, die günstigere Scherfestigkeitseigenschaften aufweist als die darunterliegende mit (deutlich) geringerer Scherfestigkeit bzw. hoher Zusammendrückbarkeit.

Der **Nachweis gegen Aufschwimmen** ist bereits bekannt und ist in den wesentlichen Zügen bereits beim Thema 6 „Hydraulische Eigenschaften des Untergrundes“ vorgestellt worden. Der Nachweis erfolgt mit dem Ansatz von totalen Spannungen. Die Standsicherheit eines Tragwerks oder einer wenig durchlässigen Bodenschicht gegen Aufschwimmen ist dadurch zu überprüfen, dass die ständigen stabilisierenden Einwirkungen (z.B. Gewicht und Wandreibung) mit den ständigen und veränderlichen destabilisierenden Einwirkungen des Wassers oder möglicher anderer Einwirkungen verglichen werden.

Abschließend werden die Bemessungsregeln von Flachgründungen bei einfachen Verhältnissen vorgestellt.

13. TIEFGRÜNDUNGEN

Ist die Ausführung von Flachgründungen aufgrund unzureichender Tragfähigkeit bzw. hoher Setzungsempfindlichkeit der oberflächennahen Bodenschichten nicht möglich, kommen häufig **Tiefgründungen** zur Anwendung, sofern der Boden nicht mit geeigneten Maßnahmen verbessert wird bzw. verbessert werden kann. Tiefgründungen sind Gründungskörper mit großer Einbindetiefe, welche die Bauwerkslasten in tiefer liegende, tragfähige Bodenschichten ableiten bzw. über einen größeren Untergrundbereich verteilen. Pfähle und Schlitzwände sowie Kombinierte Pfahl-Platten-Gründungen, Pfahlwände, Pfahlgruppen bzw. Pfahl- und Schlitzwandkästen sind typische Ausführungsformen, die für die tiefreichende Gründung von Bauwerken zur Anwendung kommen.

Pfähle sind schlanke Bauelemente im Boden, die vorwiegend der Lastableitung in tiefer liegende, tragfähige Bodenschichten dienen. Sie werden mit verschiedensten Materialien, wie Beton, Stahlbeton, Stahl oder Holz, und auf vielfältigste Weise hergestellt. Nach dem Herstellungsverfahren unterscheidet man im Wesentlichen zwischen Bohrpfählen, Verdrängungspfählen und Mikropfählen, wobei es in jeder Kategorie wiederum verschiedene Systeme gibt.

Das **Tragverhalten von Pfählen** zur Ableitung der Lasten in den Untergrund hängt stark von den Eigenschaften des Bodens sowie dessen Aufbau ab. Pfähle können vertikale Belastungen sowohl entlang des Pfahlmantels als auch über die Pfahlspitze in den Untergrund ableiten, womit es zwei Grenzfälle des vertikalen Pfahltragverhaltens gibt:

- Bei **Spitzendruckpfählen** werden die Lasten primär über den Pfahlfuß in die tragfähige bzw. verformungsarme Schicht eingeleitet, die sich unterhalb von (sehr) gering tragfähigen bzw. verformungsempfindlichen Böden befindet.
- Bei **Mantelreibungspfählen** werden die einwirkenden Lasten primär über Mantelreibung entlang eher gering tragfähiger Schichten übertragen, ohne eine besonders gut tragfähige bzw. verformungsarme Schicht zu erreichen.

In der Praxis setzt sich das vertikale Tragverhalten von Pfählen zumeist aus einer Kombination von Spitzendruck und Mantelreibung zusammen. Dabei ist immer die Verträglichkeit der Pfahlsetzungen (Kompatibilitätsbedingung) zu berücksichtigen, da Spitzendruck und Mantelreibung setzungsabhängig unterschiedlich stark mobilisiert werden.

Die Mantelreibung wirkt folglich nicht immer lastabtragend, sondern kann auch als negative Mantelreibung zusätzlich belastend wirken. Dies ist dann der Fall, wenn sich der Boden (in den oberen Bereichen) gegenüber dem Pfahl stärker verformt, beispielsweise durch Setzungen infolge nachträglich aufgebracht (großflächiger) Belastungen (Schüttungen).

Für die Bestimmung der Größe des übertragbaren Spitzendrucks bzw. der aufnehmbaren Mantelreibung bilden theoretische Ansätze unter Anwendung von Versagenshypothesen bzw. Rammformeln (nur bei Rammspfählen) oder Pfahlprobelastungen die Grundlage.

In der Regel werden Pfähle dafür verwendet, Bauwerkslasten in axialer Richtung durch Bodenschichten geringer Tragfähigkeit oder durch freies Wasser in tragfähigere Bodenschichten abzuleiten. Pfähle mit größerem Durchmesser können aufgrund ihrer Biegesteifigkeit auch horizontale Kräfte und/oder Momente aufnehmen. Für die Berechnung und Bemessung horizontal belasteter Pfähle kommt häufig das Bettungsmodulverfahren zur Anwendung, das auf dem Ansatz (Federmodell) beruht, dass die Biegelinie des Pfahles mit der Verformung des Bodens ident ist. Eine Herausforderung stellt dabei die Bestimmung von Größe und Verlaufes des Bettungsmoduls über die Tiefe dar, dessen Abhängigkeit von den Bodeneigenschaften und dem Bodenaufbau offensichtlich ist.

Der Berechnung und Bemessung von Pfahlgründungen anhand der normativen Festlegungen wird breiter Raum gewidmet, wobei die Entwicklung bis zu den heute geltenden Regelwerken aufgezeigt wird. Nachweise der (äußeren) Tragfähigkeit von auf Druck und Zug belasteten Pfählen sowie ggf. der Stabilität (Knicknachweis für lange, schlanke Pfähle) und der Gebrauchstauglichkeit sind zu führen. Die Pfahlwiderstände können anhand von Tabellenwerten aus Normen und Regelwerken oder mittels statischer bzw. dynamischer Pfahlprobelastungen festgelegt werden. Oftmals greift der erfahrene Geotechniker auf Erfahrungswerte zurück.

Schlitzwände sind Wände bzw. Wandelemente im Untergrund aus Stahlbeton, Beton oder anderen, vornehmlich zementgebundenen Stoffen, die statische und/oder abdichtende bzw. abschirmende Funktion haben und sich sowohl für temporäre als auch permanente Zwecke eignen. Das wesentliche Charakterisierungsmerkmal von Schlitzwänden besteht darin, dass der hergestellte, offene Schlitz durch eine thixotrope Suspension („Stützflüssigkeit“) gestützt wird. Die suspensionsgestützten Schlitzwände können mittels Greifer oder Fräse hergestellt werden. Als Stützflüssigkeit wird zumeist eine Bentonitsuspension verwendet, die beim Einphasenverfahren erhärtet und gleichzeitig das Wandmaterial bildet und beim Zweiphasenverfahren gegen den im Kontraktorverfahren eingebrachten Beton (Gründung) bzw. Erdbeton (Dichtwand) verdrängt und damit ausgetauscht wird.

Die Flüssigkeitsstützung beruht auf der Druckdifferenz zwischen Grundwasser und Stützflüssigkeit. Die Übertragung dieser Druckdifferenz auf das Korngerüst erfolgt in Abhängigkeit von der Bodenart nach unterschiedlichen Mechanismen. Gegen den Zutritt von Grundwasser in den Schlitz sind zwei Standsicherheitsnachweise zu führen: einerseits der Nachweis der Sicherheit gegen Abgleiten von Einzelkörnern oder Korngruppen in den Schlitz (innerer Standsicherheitsnachweis) und andererseits der Nachweis der Sicherheit gegen den Schlitz gefährdende Gleitflächen im Boden (äußerer Standsicherheitsnachweis). Das Tragverhalten der erhärteten Schlitzwand ist dem von Pfählen ähnlich, folglich ebenso die Berechnung und Bemessung.

Kombinierte Pfahl-Plattengründungen, Pfahlwände, Pfahlgruppen sowie **Pfahl- und Schlitzwandkästen** setzen sich aus mehreren Gründungselementen zusammen und sind flächige oder räumliche Gebilde zur Abtragung von (hohen) vertikalen und/oder horizontalen Lasten in den Untergrund.

14. BÖSCHUNGEN, HÄNGE UND GELÄNDESPRÜNGE

Natürlich entstandene oder künstlich geschaffene, geneigte und vertikale Geländeoberflächen, die als **Böschungen, Hänge** und **Geländesprünge** bezeichnet werden, beinhalten wichtige geotechnische Fragestellungen, vor allem jene der Standsicherheit. In diesem Zusammenhang sind die möglichen Versagensmechanismen und -prozesse zufolge des Erreichens der Scherfestigkeit zu identifizieren, die sehr unterschiedlich sein können, ebenso wie die Versagensgeschwindigkeit.

Wesentliche **Einflussfaktoren auf die Standsicherheit** sind die Entstehung (Geogenese), das Gelände selbst (Neigung, Exposition, Morphologie), die Untergrundverhältnisse mit den zugehörigen Scherfestigkeitsparametern (Winkel der inneren Reibung, Kohäsion), vor allem die Wirkung des Wassers im Boden und äußere (auch klimatische) Einflüsse, wie Niederschlag und hydrologische Prozesse, aber auch Erdbeben, die Bebauung und – nicht zu vernachlässigen – auch die Vegetation (Bepflanzung und Durchwurzelung).

Besonderes Augenmerk ist auf die **Wirkung des Wassers** zu legen, die in den meisten Fällen die Standsicherheit ungünstig beeinflusst und nur in wenigen Fällen zufolge von Kapillareffekten in teilgesättigten Böden günstig ist (zumindest temporär).

Grundsätzlich ist die **Gesamtstandsicherheit** nachzuweisen, wobei i.A. die sog. *Fellenius-Regel* zur Anwendung kommt, die besagt, in welchem Ausmaß die Scherfestigkeit (Tangens des Winkels der inneren Reibung bzw. Kohäsion) des Bodens abnehmen kann, bis die Böschung gerade versagt. Damit definiert sich auch der Sicherheitsfaktor bzw. der bereits bekannte Ausnutzungsgrad unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsfaktoren, die auf die Materialparameter anzuwenden sind.

In Abhängigkeit von den geologischen Randbedingungen und insbesondere von der Schichtung des Bodens bzw. sonstiger Trennflächen sind mögliche **Versagensmechanismen** bzw. die Form der Versagensfläche zu identifizieren. Zweidimensionale Versagensmechanismen können ebene Gleitflächen, hangparalleles Gleiten, Rotation eines kreiszylindrischen Gleitkörpers, Gleiten auf zusammengesetzten Gleitflächen, Translation eines Gleitkörpers auf einer Trennfläche mit Translation eines oder auch mehrerer Gleitkörper umfassen. Dreidimensionale Versagensmechanismen bilden schalenförmige oder keilförmige Gleitkörper aus.

Die gebräuchlichsten **Berechnungsverfahren**, die auf Annahme dieser Versagensmechanismen beruhen, können wie folgt zusammengefasst werden:

- Verfahren mit geraden Gleitlinien:
 - Böschungsparallele gerade Gleitlinien
 - Allgemeine gerade Gleitlinien
- Verfahren mit einsinnig gekrümmten Gleitlinien:
 - Lamellenverfahren
 - kreisförmige Gleitlinien
 - nicht kreisförmige Gleitlinien
 - Lamellenfreie Verfahren bei kreisförmigen Gleitlinien
- Verfahren mit beliebigen Gleitlinien:
 - Blockgleitmethode (BGM)
 - Zusammengesetzter Bruchmechanismus mit geraden Gleitlinien
 - Kinematische Element Methode (KEM)
 - Methode nach *Janbu*
- Numerische Verfahren

Die wichtigsten Verfahren werden vorgestellt und die Berechnungsgrundlagen hergeleitet, für das aufwändige Lamellenverfahren mit kreisförmiger Gleitlinie exemplarisch das häufig in der Praxis angewendete Verfahren nach *Krey/Bishop*. Vor allem wird auch auf die Wirkung des Wassers eingegangen, die auf unterschiedliche Weise berücksichtigt werden kann, und zwar durch hydrostatische Druckdifferenz (effektive Spannungen), mit Ansatz des Porenwasserdruckes (totale Spannungen) oder mittels Strömungskraft (effektive Spannungen und wirksame Wichte).

Praktische Hinweise im Umgang mit Hangbewegungen, v.a. Messen und Beobachten, sowie unterschiedliche Möglichkeiten zur ingenieurbioologischen und konstruktiven Hangsicherung sind im Skriptum zur weiterführenden Information enthalten.

15. BAUGRUBENSICHERUNG

Da Bauwerke bzw. zumindest deren Gründungskörper unterhalb der Geländeoberkante in den Untergrund einbinden, ist bis auf wenige Ausnahmen die Herstellung von **Baugruben** erforderlich. Insbesondere bei beengten Platzverhältnissen bzw. angrenzender Bebauung sind Baugruben im Regelfall vertikal zu begrenzen, sofern keine geneigten Böschungen zur Anwendung kommen können.

Die **Wahl der Baugrubensicherung** hängt von mehreren Faktoren ab, vor allem aber von den Untergrund- bzw. Grundwasserverhältnissen, der umgebenden Bebauung sowie von der Bauweise des zu errichtenden Bauwerks selbst, d.h. ob die Baugrubenwände in das Bauwerk permanent integriert werden oder lediglich als temporäre, rückbaubare Bauhilfsmaßnahme dienen.

Daraus ergibt sich auch die Systematik bzw. Einteilung in Bezug auf das Herstellverfahren. In das Bauwerk integrierte Baugrubenumschließungen werden i.A. wesentlich biegesteifer ausgeführt und werden – abhängig davon, ob sie gegenüber Grundwasser technisch dicht auszuführen sind oder nicht – aus (biegesteiferen) Schlitzwänden, überschnittenen Bohrpfahlwänden, DSV-Wänden, MIP-Wänden etc. bzw. Kombinationen daraus (z.B. aufgelöste Bohrpfahlwand mit DSV-Zwickelabdichtung) oder aus aufgelösten (mit Spritzbetonausfachung) bzw. tangierenden Pfahlwänden hergestellt. Temporäre, rückbaubare Baugrubenumschließungen im Grundwasser werden i.A. aus (biegeweicheren) Spundwänden bzw. in Sonderfällen mittels Fangedämmen hergestellt, oberhalb des Grundwasserspiegels kommen Trägerbohlwände bzw. Bohrträgerverbauten (mit Spritzbeton, Holz oder Kanaldielen ausgefacht) zur Anwendung.

Unterfangungen zur Sicherung von Bestandsfundamenten können konventionell (mittels Unterfangungswänden) bzw. aus Injektions- oder aus DSV-Körpern sowie mittels Pfählen kleinen Durchmessers hergestellt werden, alternativ dazu können Lasten bestehender Bauwerke auch mit Bohrpfahl- bzw. Schlitzwänden „abgefangen“ werden.

Verankerungen (vorgespannte Verpressanker bzw. schlaffe Anker/Nägel), Aussteifungen und Abstützungen dienen zur horizontalen Abtragung der Lasten, vor allem im oberen Bereich der Baugrubenumschließung, aber auch in Zwischenhorizonten, ggf. in Kombination mit temporären Stützbermen.

Die Deckelbauweise ist eine Sonderform der Baugrubensicherung (vor allem von tiefen Baugruben), bei der nicht nur die vertikalen Baugrubenwände sondern auch bereits eine oder mehrere Decken- bzw. Deckenabschnitte zur Aussteifung der Baugrubenwände hergestellt werden.

Für den **Entwurf und die Berechnung von Baugrubensicherungen** sind zunächst die wesentlichen Randbedingungen unter Einbeziehung der Untergrund- und Grundwasserverhältnisse, der Ausführbarkeit der Verfahren und der Anforderungen hinsichtlich zulässiger Verformungen der Baugrubenwand selbst und der angrenzenden Bebauung zu klären. Diese bilden die Basis für die Wahl des statischen Systems, in weiterer Folge der Profilauswahl und der Art der Rückhaltung. Eine wesentliche Unbekannte ist die erforderliche Einbindetiefe, die es zunächst im Zusammenhang mit den Auflagerkräften zu bestimmen gilt. Folglich ergibt sich die Geometrie der Baugrubenwand (Einbindetiefe) und jener der Rückhaltung (beispielsweise die Ankerlänge) erst durch die statische Berechnung. Erst wenn diese Größen bekannt sind, können die Schnittgrößen ermittelt werden und die Bemessung der Wand kann erfolgen. Zusätzlich zu diesem Nachweis der Tragfähigkeit ist schließlich auch der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit zu führen.

Die auf die Baugrubenwand wirkenden Lasten in Form des Erddrucks (aktiver bzw. erhöhter aktiver Erddruck oder Erdruhedruck), ggf. des Wasserdrucks bzw. sonstiger äußerer Einwirkungen sowie die rückhaltenden Kräfte in Form des (mobilisierten) Erdwiderstandes sind zunächst zu ermitteln. Bei Vorhandensein von Grundwasser ist zu prüfen, ob der Wasserdruck ausschließlich hydrostatisch wirkt

oder ob ein Strömungsdruck zufolge einer Unterströmung der Baugrubenwand auftritt. Dies hat bekanntlich nicht nur Einfluss auf Größe und Richtung des resultierenden Wasserdrucks, sondern auch auf den Erddruck.

Das statische System hängt von der Wahl der Größe der Einbindetiefe ab, d.h. ob die Wand im Boden frei aufgelagert, teilweise oder voll im Boden eingespannt wird. Unter Voraussetzung einer (oben) einfach gestützten Wand führt die freie Auflagerung (unten) zur Mindesteinbindetiefe des statischen bestimmten Systems, die teilweise bzw. volle Einspannung zu einer größeren bzw. zur größten statisch wirksamen Einbindetiefe des statisch unbestimmten Systems. Bei einer (oben) ungestützten Wand ist aufgrund des Entfalls des (oberen) Auflagers eine noch größere Einbindetiefe erforderlich, um statisches Gleichgewicht mit der dafür notwendigen vollen Einspannung des statisch bestimmten Systems zu erzielen. Das gewählte statische System und die Auflagerbedingungen beeinflussen zudem die Größe der Schnittkräfte und jene der Verformungen (Biegelinie).

Auf weitere Aspekte zur Berechnung und Bemessung von Baugrubensicherungen, wie das grafische Verfahren nach *Blum* oder der Nachweis der tiefen Gleitfuge für die Berechnung der Länge von Ankern (Nachweis der Gesamtstandsicherheit) sowie die Ermittlung der Erd- und Wasserdruckverhältnisse auf eine nicht umströmte bzw. umströmte Baugrubenwand, wird im Detail in der zugehörigen Übungseinheit eingegangen.

16. GRUNDWASSERHALTUNG

Befindet sich der natürliche Grundwasserspiegel oberhalb der Aushubsohle einer Baugrube, können zur **Beherrschung des Grundwassers** verschiedene Maßnahmen ergriffen werden:

- Grundwasserabsenkung bzw. Grundwasserentspannung
 - Offene Wasserhaltung (Gräben, Drainageleitungen, Pumpensümpfe)
 - Geschlossene Wasserhaltung (Brunnenwasserhaltung mit und ohne Vakuumbeaufschlagung, Flachhaltungen bzw. Wellpointanlagen, Tiefbrunnenanlagen, Horizontale Brunnenanlagen)
 - Elektrosmose
- Abdichtung von Baugruben
 - mittels wasserundurchlässiger Baugrubenumschließung (z.B. Spundwand, Schlitzwand, überschnittene Bohrfahlwand), welche in einen natürlichen Grundwasserstauer einbindet oder an eine mittels Spezialtiefbaumaßnahmen hergestellte dichte Baugrubensohle anschließt
 - erforderlichenfalls in Kombination mit einer Grundwasserentspannung (zur Vermeidung des Aufschwimmens der Baugrubensohle aufgrund von gespanntem Grundwasser)
- Grundwasserverdrängung
 - mit Druckluft aus geschlossenen Arbeitsräumen (Senkkasten bzw. Caisson)

Entscheidend für das anzuwendende **Wasserhaltungsverfahren** sind die Eigenschaften des Bodens, vor allem der Durchlässigkeit, die bekanntlich in mehreren Zehnerpotenzen streut. Durch die Entnahme von Grundwasser, beispielsweise mittels Brunnen, bildet sich ein Absenktrichter aus, dessen Reichweite bei gering durchlässigen, bindigen Böden nur wenige Dezimeter bzw. Meter beträgt, wohingegen bei nichtbindigen, stark durchlässigen Böden dieser bis zu einige hundert Meter reichen kann. In bindigen Böden ist die Entnahmemenge (sehr) gering, bei nichtbindigen Böden hingegen (sehr) hoch. In (horizontal) geschichteten Böden ist zudem die horizontale Durchlässigkeit bekanntlich größer als die vertikale. Die Durchlässigkeit ist also der entscheidende Faktor, den es als Grundlage für sämtliche Berechnungen und Bemessungen zu bestimmen bzw. abzuschätzen gilt.

Die **Brunnenformeln** nach *Dupuit-Thiem* bilden die theoretische Grundlage für die Berechnung und Bemessung von Grundwasserhaltungen bzw. -entspannungen mittels vollkommener Einzelbrunnen. Für die Bestimmung der Reichweite des Brunnens müssen empirische Formeln verwendet werden, ebenso für das Fassungsvermögen eines Brunnens. Mit entsprechenden Adaptierungen können die Brunnenformeln mit ausreichender Näherung auch für unvollkommene Einzelbrunnen, Mehrbrunnenanlagen, Vakuumbrunnen und auch für die Grundwasserrückgabe (Wiederversickerung durch Tiefeninfiltration) angewendet werden.

In der Praxis ist für die **Funktionsfähigkeit einer Brunnenwasserhaltung** die Qualität der Brunnenherstellung von entscheidender Bedeutung. Sie erfordert nicht nur das notwendige theoretische Grundlagenwissen, sondern auch große Erfahrung im Umgang damit. Brunnentiefe, Außen- und Innendurchmesser, Bohrverfahren, Filtermaterial und Filterrohre (Schlitzweite) sind eng auf den anstehenden Boden und untereinander abzustimmen. Nach Herstellung ist der Brunnen zu „entwickeln“ (Intensiventsandung), sodass sich ein ausreichend durchlässiger und gleichzeitig stabiler Filter im Boden rund um den Brunnen in Kombination mit dem um das Filterrohr eingebauten Kies- bzw. Sandfilter ausbildet (vgl. Filterregel nach *Terzaghi*).

Für Vakuumbrunnen, die zur Erhöhung der Wirksamkeit bzw. der Reichweite in eher gering durchlässigen Böden dienen, sind zusätzliche, besondere Vorkehrungen zu treffen.

Grundwasserabsenkungen bzw. -entspannungen können Spannungsänderungen durch Kapillareffekte in teilgesättigten Böden und bekanntlich Setzungen bzw. Hebungen im vormals gesättigten Boden bewirken. Funktioniert eine Grundwasserhaltung nicht wie geplant, kann hydraulisches Versagen durch hydraulischen Grundbruch bzw. durch Aufbrechen oder Aufschwimmen der Baugrubensohle führen. Auch haben Grundwasserhaltungen zumeist weitreichende Auswirkungen auf die hydrogeologischen Verhältnisse bzw. den Grundwasserhaushalt im Allgemeinen. In Österreich stellen daher derartige Wasserhaltungsmaßnahmen oftmals einen wasserrechtlichen Tatbestand dar.

Falls eine technisch ausreichend dichte Schicht in (wirtschaftlich) erreichbarer Tiefe ansteht bzw. eine horizontale Abdichtung künstlich hergestellt werden kann, besteht die Möglichkeit, anstelle einer Grundwasserabsenkung eine **dichte Baugrubensohle** auszuführen (Trogbauweise). Je nach den vorherrschenden geologischen Verhältnissen kann eine natürliche Stauerschicht als Abdichtung nach unten hin dienen oder es wird eine künstliche hoch-, mitteltief- oder tiefliegende Dichtsohle (mit dem Düsenstrahlverfahren bzw. mittels Injektionen) innerhalb der Baugrubenumschließung hergestellt. Alternativ dazu kann auch eine unverankerte oder verankerte Unterwasserbetonsohle ausgeführt werden.

In allen Fällen sind die bereits bekannten Nachweise der Sicherheit gegen Aufschwimmen (mit totalen Spannungen) bzw. ggf. auch gegen hydraulischen Grundbruch (mit effektiven Spannungen) zu führen. Kommen Zugpfähle zur Verankerung der Dichtsohlen zum Einsatz, ist zu beachten, dass das angehängte Bodengewicht immer mit der Wichte unter Auftrieb anzusetzen ist, da es sich dabei (auch beim Nachweis mit totalen Spannungen!) um eine äußere (stabilisierende) Kraft (Gewicht des Bodens unter Wasser) handelt.

Selten, aber doch, kommt die **Grundwasserverdrängung mittels Druckluft** (nach dem Prinzip der Taucherglocke) zur Anwendung, vor allem in Form von Senkkästen bzw. Caissons für die Gründung von Fundamenten unter dem Wasserspiegel, aber insbesondere auch im Tunnelbau und beim Rohrvortrieb.

17. ERD- UND DAMMBAU

„Erd- und Dammbau – Königsdisziplin der Geotechnik“

„Der Erd- und Dammbau ist komplex, erfordert ein fundiertes bodenmechanisches Grundwissen, Vertrautheit mit den Versuchstechniken im Labor und im Feld sowie ein tiefes Verständnis für die physikalischen Vorgänge im Boden. Erdarbeiten sind in höchstem Maße interdisziplinär, vielfältig sowie innovations- und entwicklungssträchtig. Erdbauwerke gehören zu den größten aller Baumaßnahmen, die zudem bauleistungs- und bauverfahrenstechnische Herausforderungen darstellen. Die zeitliche Komponente und die Witterung beeinflussen entscheidend die Bodeneigenschaften und damit auch den Bauablauf. Erdbauwerke sind stets begleitet von den Unwägbarkeiten des Untergrundes. Ein gesamtheitliches Verständnis für die Materie, ingenieurmäßiges Handeln und ein hohes Maß an Flexibilität sind unabdingbare Voraussetzungen für die Umsetzung von erdbaulichen Projekten.“

D. Adam, Grundbau-Taschenbuch, Sonderdruck „Erdbau“ (2018)

Erd- und Dammbau wurde bewusst als letztes „fachliches“ Thema der Vorlesung Grundbau und Bodenmechanik im Bachelorstudium gewählt, da es aufgrund seiner Komplexität praktisch auf das gesamte Wissen, das in der bisherigen Vorlesung vermittelt wurde, zurückgreift.

Zunächst kommt dem **Untergrund** und der **Untergrunderkundung** als Grundlage für die Planung und Ausführung von Erd- und Dammbauwerken besondere Bedeutung zu.

Boden ist der zentrale Baustoff, der als **Erd- und Dammschüttmaterial** für Erd- und Dammbauwerke für verschiedene Zwecke mit unterschiedlichen Anforderungen (Trag-, Stütz-, Filter-, Drainage-, Abdichtungs-, Trenn-, Schutzfunktion etc.) Verwendung findet. Folglich sind die **Bodenklassifizierung** sowie die Bestimmung der **Bodenkenngrößen** sowie der **Formänderungs- und Festigkeitseigenschaften** mit den dafür zur Verfügung stehenden grundlegenden Labor- und Feldversuchen zur Einstufung der Eignung für den jeweiligen Verwendungszweck von Belang. Prüfungen im Feld dienen dem Nachweis, ob die Anforderungen an das eingebaute Material erfüllt sind, moderne **Verdichtungskontrollen** (z.B. FDVK) haben in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen.

Der Ermittlung des **Erddruckes** in seinen unterschiedlichen Ausformungen sowie der **Spannungen und Verformungen (Setzungen)** im Untergrund bzw. im Bauwerk selbst kommt besondere Bedeutung zu, sind die Auswirkungen der Erd- und Dammbauwerke in ihrer Dimension auf die Umgebung zumeist doch beträchtlich.

Bodenverbesserungsmaßnahmen dienen der Verbesserung des Untergrundes in vielfältiger Weise, beispielsweise zur Erhöhung der Tragfähigkeit, Reduktion von Setzungen bzw. Setzungsdifferenzen, Beschleunigung der Konsolidation etc.

Mit dem **Einsatz von Geokunststoffen** in Erd- und Dammbauwerken wird bezweckt, verschiedene Funktionen, wie Trennen, Filtern, Drainieren, Bewehren, Schützen, Abdichten sowie Schutz vor Erosion, zu erfüllen, die sonst nur mit aufwändigen erdbaulichen oder konstruktiven Maßnahmen zu bewerkstelligen wären.

Gründungsmaßnahmen, konstruktive Hangsicherungen sowie **Rückhalte- und Abdichtungsmaßnahmen, Baugrubensicherungen** sowie Maßnahmen zur **Beherrschung des Grundwassers** kommen zur Anwendung und erfordern den Einsatz von unterschiedlichen Spezialtiefbauverfahren in vielfältiger Weise.

Praktisch alle **Nachweise** in Bezug auf Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit sowie Dauerhaftigkeit gilt es zu führen, wie z.B. Böschungsbruch- und Grundbruchnachweise, bzw. den Nachweis des Gleitwiderstandes. Darüber hinaus sind Setzungs- und Konsolidationsberechnungen durchzuführen. Hydraulische Nachweise (gegen Aufschwimmen und hydraulischen Grundbruch) sowie die Anwendung von Erosions- und Filterkriterien streichen die besondere Bedeutung der **Wirkung des Wassers** in Erd- und Dammbauwerken hervor. Erdbeben und andere Naturgefahren spielen häufig eine wichtige Rolle und sind in der Nachweisführung zu berücksichtigen.

Der Erd- und Dammbau findet vor allem im **Bau von Infrastrukturmaßnahmen** seine Anwendung, ob im Verkehrswegebau (Straßen und Autobahnen, Eisenbahnen, Flughäfen), für Staudämme und Hochwasserschutzdämme sowie in Form von Schutzdämmen gegen weitere Naturgefahren, wie Steinschlag, Fels- bzw. Bergsturz und Lawinen, allesamt virulente Gefahren im alpinen Raum.

19. EUROCODE 7

In der letzten Vorlesungseinheit werden die Grundsätze der harmonisierten europäischen Normung auf dem Gebiet der Geotechnik vorgestellt. Den Rahmen bildet das **Eurocode-Programm** des konstruktiven Ingenieurbaus, das thematisch in zehn Themen gegliedert ist.

Die ÖNORM EN 1997 „**Eurocode 7**“ beinhaltet „Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik“ und besteht aus zwei Teilen (ÖNORMEN EN 1997-1 und -2). In der ÖNORM B 1997-1-1:2013-09-01 – Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1997-1 und nationale Ergänzungen – sind die anzuwendenden Nachweisverfahren und die entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerte für Österreich festgelegt („Nationales Anwendungsdokument“).

Die Koexistenzperiode, das ist jener Zeitraum, in dem sowohl der Eurocode 7 als auch die ÖNORMEN der Serie B 44xx gleichrangig galten, wurde in Österreich mit 31.05.2009 beendet. Jedoch sind bis dato noch immer nicht sämtliche Normen umgesetzt.

Die Grundlage aller Nachweise beruht auf dem **semi-probabilistischen Sicherheitskonzept – Teilsicherheitskonzept**, welches das frühere globale Sicherheitskonzept abgelöst hat.

Nach dem (aktuellen) semi-probabilistischen Sicherheitskonzept erfolgt der Berechnungsablauf detaillierter. Die Streuung von Einflussparametern wird im jeweiligen Berechnungsschritt „sofort“ mittels Teilsicherheitsbeiwerte erfasst. Bei den Einwirkungen S und den Widerständen R wird von charakteristischen Werten (Index „ k “) ausgegangen, die als „vorsichtige“ Mittelwerte aus statistischen Untersuchungen abgeleitet werden. Die charakteristischen Werte werden einzeln oder nach Lastfall getrennt mit Teilsicherheitsbeiwerten abgemindert oder erhöht, je nachdem, ob die Einwirkung bzw. der Widerstand günstig oder ungünstig wirken. Die abgeminderten bzw. erhöhten charakteristischen Werte werden als Bemessungswerte (Index „ d “ für „design“) bezeichnet.

Die Summe der Einwirkungen und Widerstände muss die **Grenzzustandsbedingung** erfüllen; der **Ausnutzungsgrad** gibt an, wie viel an rechnerischer Sicherheit über die angewendeten Teilsicherheitsbeiwerte hinaus noch im System enthalten ist. Während beim globalen Sicherheitskonzept die Sicherheit mit steigendem Sicherheitsfaktor ansteigt, ist dies beim Teilsicherheitskonzept mit sinkendem Ausnutzungsgrad der Fall!

Wichtige in der ÖNORM EN 1997-1 definierte Begriffe sind:

- Geotechnische Kategorie (GK – GK 1, GK 2, GK 3)
- Bemessungssituation (BS – BS 1, BS 2, BS 3)
- Schadensfolgeklassen (CC – CC 1, CC 2, CC 3)

Die drei **Nachweisverfahren**, die in der ÖNORM EN 1997-1 enthalten sind, spiegeln die unterschiedlichen Berechnungs- und Nachweisphilosophien in Europa wider. Ihre Auswahl richtet sich nach dem angewendeten Nachweisverfahren, bei dem ein Grenzzustand durch Bruch oder zu große Verformungen, bei jeder der angegebenen Kombinationen von Gruppen von Teilsicherheitsbeiwerten, ausgeschlossen werden muss.

Im Bereich der Geotechnik sind die Nachweise zu führen für:

- Grenzzustände der Tragfähigkeit
 - Verlust der Lagesicherheit (EQU)
 - Inneres Versagen oder sehr große Verformung des Bauwerks oder seiner Bauteile (STR)
 - Versagen oder sehr große Verformung des Baugrunds (GEO)
 - Verlust der Lagesicherheit des Bauwerks oder Baugrunds infolge Aufschwimmens (UPL)
 - Hydraulischer Grundbruch, innere Erosion und Piping im Boden (HYD)
- Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

Der **Grenzzustand der Tragfähigkeit** ist ein Zustand des Bauwerks, dessen Überschreitung unmittelbar zu einem rechnerischen Versagen führt. Für die Nachweise von Grenzzuständen im Tragwerk und im Baugrund (STR und GEO) sind in Österreich für Flächengründungen, Pfahlgründungen, Verankerungen sowie Stützbauwerke die Nachweisverfahren 2 (bzw. 2*) anzuwenden, nur Böschungs- und Geländebruch ist mit dem Nachweisverfahren 3 zu führen.

- Beim **Nachweisverfahren 2** (bzw. 2*) werden die Teilsicherheitsbeiwerte entweder auf Einwirkungen oder Beanspruchungen und auf die Widerstände des Baugrunds angewendet.
- Beim **Nachweisverfahren 3** werden die Teilsicherheitsbeiwerte auf Einwirkungen oder Beanspruchungen durch das Bauwerk und auf die geotechnischen Kenngrößen, angewendet (*Anm.:* Diese Vorgangsweise entspricht der *Fellenius-Regel*).

Der **Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit** ist ein Zustand des Bauwerks, bei dessen Überschreitung die für die Nutzung festgelegten Bedingungen nicht mehr erfüllt sind. Die Zahlenwerte der Teilsicherheitsbeiwerte für Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit sind gemäß nationalem Anwendungsdokument gleich 1,0 zu setzen.