

Jens Engel  
Carsten Lauer

# Einführung in die Boden- und Felsmechanik

Grundlagen und Berechnungen



2., aktualisierte Auflage



HANSER



---

# Lehrbücher des Bauingenieurwesens

Bletzinger/Dieringer/Fisch/Philipp • *Aufgabensammlung zur Baustatik*

Dallmann • *Baustatik*

Band 1: Berechnung statisch bestimmter Tragwerke

Band 2: Berechnung statisch unbestimmter Tragwerke

Band 3: Theorie II. Ordnung und computerorientierte Methoden der Stabtragwerke

Engel/Al-Akel • *Einführung in den Erd-, Grund- und Dammbau*

Fouad/Zapke • *Bauwesen Taschenbuch*

Freimann • *Hydraulik für Bauingenieure*

Göttsche/Petersen • *Festigkeitslehre – klipp und klar  
für Studierende des Bauingenieurwesens*

Jochim/Lademann • *Planung von Bahnanlagen*

Krawietz/Heimke • *Physik im Bauwesen*

Leimer • *Bauphysik / Building Physics*

Malpricht • *Schalungsplanung*

Proporowitz (Hrsg.) • *Baubetrieb – Bauverfahren*

Proporowitz (Hrsg.) • *Baubetrieb – Bauwirtschaft*

Prüser • *Konstruieren im Stahlbetonbau 1*

Prüser • *Konstruieren im Stahlbetonbau 2*

Rjasanowa • *Mathematik für Bauingenieure 1*

Rjasanowa • *Mathematik für Bauingenieure 2*

Rjasanowa • *Mathematische Modelle im Bauingenieurwesen*

---

Jens Engel • Carsten Lauer

# Einführung in die Boden- und Felsmechanik

Grundlagen und Berechnungen

2., aktualisierte Auflage

Mit zahlreichen Bildern und Tabellen



**Fachbuchverlag Leipzig**  
im Carl Hanser Verlag

---

## Autoren

Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Engel  
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden  
Fakultät Bauingenieurwesen/Architektur  
<http://www.zaft.htw-dresden.de/bodenmechanik>  
[engel@htw-dresden.de](mailto:engel@htw-dresden.de)

Dipl.-Ing. Carsten Lauer  
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden  
Fakultät Bauingenieurwesen/Architektur  
<http://www.zaft.htw-dresden.de/bodenmechanik>  
[lauer@htw-dresden.de](mailto:lauer@htw-dresden.de)



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-446-45317-3

E-Book-ISBN: 978-3-446-45318-0

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag

© 2017 Carl Hanser Verlag München

Internet: <http://www.hanser-fachbuch.de>

Lektorat: Philipp Thorwirth

Herstellung: Franziska Kaufmann

Satz: Jens Engel, Carsten Lauer, Dresden

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Druck und Binden: Kösel, Krugzell

Printed in Germany

# Vorwort

Zum Aufgabenbereich von Bauingenieuren und Architekten gehört auch die Planung von Gründungen, Baugruben und Geländesprüngen. Die Grundlagen dafür werden im Studium durch Fächer vermittelt, die häufig unter der Bezeichnung Geotechnik zusammengefasst werden. Das vorliegende Buch behandelt die Grundlagen der Bodenmechanik als Teil der Geotechnik, ergänzt um einige ingenieurgeologische und felsmechanische Aspekte, die bei der Bearbeitung von Bauvorhaben zu beachten sind. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den Untersuchungsmethoden zur Feststellung der Eigenschaften von Boden und Fels und der Vorstellung der grundlegenden Berechnungsverfahren der Bodenmechanik.

Zur praktischen Übung des Stoffes wird die Planung einer Verkehrsstrasse benutzt, die aus einer Brücke über einen Fluss und einem anschließenden Dammbauwerk auf weichem Untergrund besteht. Die in den einzelnen Kapiteln angeführten Übungsaufgaben beziehen sich auf dieses Lehrbeispiel. Aufgabenstellung und Lösungshinweise sind im Internet abrufbar unter:

<http://www.zaft.htw-dresden.de/bodenmechanik>

Das vorliegende Buch kann vorlesungsbegleitend und für das Selbststudium genutzt werden. Es soll Hilfs- und Arbeitsmittel für die Lösung der Aufgaben sein. In der vorliegenden Auflage sind deshalb einige Tabellen und Nomogramme überarbeitet und teilweise ergänzt worden.

Dies betrifft die Auswertung von Labor- und Feldversuchen und die grundlegenden bodenmechanischen Berechnungsverfahren, z. B. Erddruck-, Grundbruch-, Geländebruch- oder Setzungsberechnungen.

Neben der Vermittlung der Lehrinhalte der Bauingenieurausbildung sind auch Erfahrungen im Zusammenhang mit der Bearbeitung baupraktischer Projekte in begrenztem Umfang mit eingeflossen. Nicht alles konnte gleichermaßen detailliert dargestellt werden. Wir hoffen, dass das Buch ein Hilfsmittel für Studierende wie auch für im Beruf tätige Ingenieure sein kann. Hinweise zu Korrekturen oder Ergänzungen nehmen wir gern entgegen.

Dresden, Juni 2017  
Jens Engel, Carsten Lauer



# Inhalt

<b>1 Einführung: Aufgaben und Ziele der Bodenmechanik</b>	<b>13</b>
1.1 Entwurf eines Bauwerks – Rolle der Geotechnik im Bauingenieurwesen . . . . .	13
1.2 Boden- und Felsmechanik als Teil des Bauingenieurwesens . . . . .	15
1.3 Beispiel für ein Bauprojekt: Beschreibung . . . . .	16
<b>2 Geologische Grundlagen</b>	<b>19</b>
2.1 Nutzen geologischer Informationen für Bauprojekte . . . . .	19
2.2 Allgemeine geologische Grundlagen . . . . .	21
2.2.1 Aufbau der Erde im Überblick . . . . .	21
2.2.2 Geologische Zeitrechnung . . . . .	23
2.3 Hydrogeologische Grundlagen . . . . .	28
2.3.1 Kreislauf des Wassers, Bilanzgleichung . . . . .	28
2.3.2 Wasser im Untergrund . . . . .	29
2.3.3 Grundwasserleiter . . . . .	30
2.3.4 Quellen . . . . .	32
2.4 Minerale . . . . .	32
2.4.1 Systematik der Minerale . . . . .	33
2.4.2 Mineralbestimmung auf Grundlage physikalischer Eigenschaften . . . . .	37
2.4.3 Gesteinsbildende Minerale . . . . .	39
2.5 Gesteine . . . . .	39
2.5.1 Kreislauf der Gesteine . . . . .	40
2.5.2 Gesteinsarten – Überblick . . . . .	41
2.5.2.1 Magmatische Gesteine . . . . .	41
2.5.2.2 Sedimentgesteine . . . . .	42
2.5.2.3 Metamorphite . . . . .	44

<b>3 Baugrund (Gebirge)</b>	<b>46</b>
3.1 Fels	46
3.1.1 Gesteinsbestimmung	46
3.1.1.1 Struktur	46
3.1.1.2 Textur	47
3.1.1.3 Gesteinsbestimmung an Handstücken	47
3.1.2 Gestein-Fels-Gebirge	51
3.1.3 Benennung und Beschreibung von Fels	51
3.1.3.1 Benennung und Beschreibung des Gesteins	52
3.1.3.2 Verwitterungsgrad	54
3.1.3.3 Trennflächengefüge	54
3.1.4 Gebirgsklassifizierung mit dem <i>Q</i> -System (Quality-System)	56
3.1.5 Berechnung von Gebirgskennwerten, Gebirgsklassifizierung GSI	59
3.2 Böden (Lockergesteine)	62
3.2.1 Unterscheidungskriterien	62
3.2.2 Benennung und Beschreibung	64
<b>4 Erkundung und Untersuchung von Boden und Fels in situ</b>	<b>67</b>
4.1 Vorbereitung, Planung	67
4.1.1 Grundlagen – Aufgabenstellung	67
4.1.2 Planungshinweise, Informationsquellen	69
4.1.3 Geologische Karten	70
4.2 Baugrunderkundung	72
4.2.1 Geotechnische Kategorien	73
4.2.2 Umfang der Erkundung	74
4.2.3 Erkundungsarten	78
4.2.3.1 Direkte Aufschlüsse, Probenahme	78
4.2.3.2 Indirekte Verfahren: Sondierungen	83

<b>5 Kennwerte von Boden und Fels</b>	<b>87</b>
5.1 Klassifikationskennwerte . . . . .	87
5.1.1 Stoffbestand . . . . .	87
5.1.1.1 Phasenzusammensetzung . . . . .	87
5.1.1.2 Beimengungen . . . . .	93
5.1.1.3 Korngrößenverteilung . . . . .	94
5.1.2 Stoffzustand: Grenzwerte des Stoffbestands . . . . .	97
5.1.2.1 Konsistenzgrenzen bindiger Böden . . . . .	98
5.1.2.2 Grenzen der Lagerungsdichte . . . . .	102
5.1.3 Klassifizierung – Bodengruppen nach DIN 18196 . . . . .	103
5.2 Gütekontrolle im Erdbau, Verdichtung . . . . .	105
5.2.1 Proctorkennwerte . . . . .	105
5.2.2 Verdichtungskontrolle . . . . .	106
5.3 Mechanische und hydraulische Größen . . . . .	110
5.3.1 Strömung . . . . .	110
5.3.2 Spannungen und Kräfte . . . . .	111
5.3.2.1 Mohrscher Kreis . . . . .	111
5.3.2.2 Wirksame Spannung . . . . .	112
5.3.2.3 Eigengewicht des Bodens . . . . .	114
5.3.3 Verformungsmaße . . . . .	115
5.4 Durchlässigkeit . . . . .	116
5.4.1 Grundlagen . . . . .	116
5.4.2 Experimentelle Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwerts . . . . .	117
5.5 Scherfestigkeit . . . . .	122
5.5.1 Grundlagen . . . . .	122
5.5.1.1 Bruchbedingung . . . . .	122
5.5.1.2 Einflüsse auf $\varphi$ und $c$ . . . . .	125
5.5.2 Experimentelle Ermittlung . . . . .	128

5.5.2.1	Direktscherversuch . . . . .	128
5.5.2.2	Einaxiale Druckfestigkeit . . . . .	129
5.5.2.3	Triaxialversuch . . . . .	129
5.6	Zusammendrückbarkeit . . . . .	132
5.6.1	Grundlagen . . . . .	132
5.6.2	Druck-Setzungs-Linie: Kennwertansätze . . . . .	133
5.6.3	Zeit-Zusammendrückungs-Verhalten . . . . .	137
5.6.4	Experimentelle Bestimmung – Ödometerversuch . . . . .	142
5.6.5	Plattendruckversuch . . . . .	143
5.7	Klassifizierungskriterien . . . . .	144
5.7.1	Homogenbereiche zur Leistungsbeschreibung . . . . .	145
5.7.2	Frostempfindlichkeit . . . . .	146
5.8	Mittlere Kennwerte, Korrelationen . . . . .	150
5.8.1	Näherungen für nichtbindige Böden . . . . .	150
5.8.2	Bindige Böden . . . . .	151
<b>6</b>	<b>Strömung und Transport</b>	<b>159</b>
6.1	Strömungskraft . . . . .	159
6.2	Beschreibung von Strömungsfeldern . . . . .	159
6.3	Filterstabilität . . . . .	163
<b>7</b>	<b>Tragfähigkeit</b>	<b>165</b>
7.1	Grundlagen . . . . .	165
7.1.1	Grenzzustand der Tragfähigkeit in der Boden- und Felsmechanik . . . . .	165
7.1.2	Idealisierung von Phänomenen . . . . .	165
7.1.3	Kritisches Hauptspannungsverhältnis – Grenzzustände . . . . .	166
7.2	Erddruck . . . . .	168
7.2.1	Einführung . . . . .	168
7.2.1.1	Arten des Erddrucks . . . . .	168

---

7.2.1.2	Erddruckneigung . . . . .	170
7.2.2	Grundlagen der Berechnung . . . . .	172
7.2.2.1	Verfahren mit Gleitflächen . . . . .	172
7.2.2.2	Untersuchung des Spannungszustands . . . . .	176
7.2.3	Aktiver Erddruck . . . . .	177
7.2.3.1	Grafische Verfahren . . . . .	178
7.2.3.2	Analytische Berechnung – Erddruckbeiwerte . . . . .	179
7.2.4	Passiver Erddruck . . . . .	187
7.2.4.1	Grundlagen der Berechnung . . . . .	187
7.2.4.2	Erddruckbeiwerte, ebener Fall . . . . .	188
7.2.4.3	Räumlicher passiver Erddruck . . . . .	193
7.2.5	Erdruchdruck . . . . .	193
7.2.5.1	Grundlagen . . . . .	193
7.2.5.2	Erddruckbeiwert $K_{0gh}$ . . . . .	193
7.2.5.3	Vorbelastete Böden, Kohäsion . . . . .	194
7.2.6	Zwischenwerte, Sonderfälle des Erddrucks . . . . .	194
7.2.6.1	Mobilisierung des passiven Erddrucks . . . . .	194
7.2.6.2	Verdichtungserddruck . . . . .	197
7.2.6.3	Sonderfall – Silodruck (begrenzte Hinterfüllung) . . . . .	198
7.3	Grundbruch . . . . .	198
7.3.1	Einführung . . . . .	198
7.3.2	Ein einfacher Lösungsansatz . . . . .	199
7.3.3	Allgemeiner Berechnungsansatz . . . . .	200
7.3.3.1	Anforderungen . . . . .	200
7.3.3.2	Tragfähigkeitsbeiwerte, Grundbruchfigur . . . . .	202
7.3.3.3	Nachweisführung . . . . .	203
7.4	Standsicherheit von Böschungen, Geländebruch . . . . .	208
7.4.1	Grundlagen . . . . .	208

7.4.2	Berechnungsgrundlagen bei Gleitrutschungen . . . . .	210
7.4.2.1	Ebene Gleitfläche . . . . .	210
7.4.2.2	Kreisförmige Gleitfläche . . . . .	212
7.4.2.3	Lamellenfreie Kreisgleitfläche mit $c' > 0$ und $\varphi' > 0$ . . . . .	214
7.4.2.4	Beliebige Gleitflächen . . . . .	215
7.4.3	Berechnungsverfahren (Auswahl) . . . . .	216
7.4.3.1	Lamellenverfahren mit Kreisgleitflächen . . . . .	217
7.4.3.2	Starrkörperverfahren . . . . .	218
7.4.3.3	Bemessungshilfen für einfache Fälle . . . . .	219
<b>8</b>	<b>Berechnung von Verformungen des Baugrunds</b>	<b>221</b>
8.1	Spannungsausbreitung im Baugrund . . . . .	221
8.1.1	Grundlagen . . . . .	221
8.1.2	Elementare Lösungen . . . . .	222
8.1.3	Berechnung der Spannungsverteilung . . . . .	225
8.2	Berechnung von Setzungen . . . . .	231
8.2.1	Einführung . . . . .	231
8.2.2	Grundlagen der rechnerischen Ermittlung . . . . .	231
8.2.3	Ermittlung der Setzungen auf Grundlage einer Druck-Setzungs-Kurve . . . . .	234
8.2.4	Berechnung der Setzung und Schiefstellung starrer Fundamente . . . . .	236
8.3	Bestimmung des Bettungsmoduls . . . . .	239
	<b>Literatur</b>	<b>241</b>
	<b>Index</b>	<b>247</b>

# 1 Einführung: Aufgaben und Ziele der Bodenmechanik

## 1.1 Entwurf eines Bauwerks – Rolle der Geotechnik im Bauingenieurwesen

Bauwerke sicher und wirtschaftlich zu errichten und dafür zu sorgen, dass die Anforderungen der Nutzung erfüllt werden, ist die Aufgabe des Bauingenieurs. Das Versagen der Konstruktion bzw. von Teilen des Bauwerks muss ausgeschlossen werden. Ebenso dürfen keine Zustände eintreten, die die Funktion beeinträchtigen, z. B. durch Schiefstellung oder Risse. Schäden infolge von nachgebendem Baugrund sind ebenfalls bei der Planung zu berücksichtigen. Jedes Bauwerk benötigt ein Fundament bzw. eine Gründung zur Abtragung der Lasten in den Untergrund. Bei ausreichend tragfähigem Untergrund unmittelbar unter dem Bauwerk ist beispielsweise die Herstellung von Einzel- oder Streifenfundamenten denkbar. Diese sind rechnerisch nachzuweisen, um dadurch Versagensfälle, wie in *Bild 7.2* dargestellt, auszuschließen. Zustände, die zum Einsturz eines Bauteils führen können, werden als Grenzzustand der Tragfähigkeit bezeichnet – kurz Tragfähigkeit.

Bauwerke können auch dauerhafte Geländeeinschnitte oder Dämme sein und oft ist als Teil der Baumaßnahmen die vorübergehende Errichtung von Baugruben erforderlich. Für diese Teile des Bauwerks sind die gleichen Überlegungen anzustellen, wie für alle anderen Teile der Konstruktion, z. B. Wände, Pfeiler, Stützen oder Dachtragwerke.

Fels oder Boden kann als Untergrund Teil des Bauwerks sein, kann aber auch als Baumaterial für die Errichtung von Dämmen und anderen Erdbauwerken genutzt werden. In beiden Fällen muss es bezüglich der Materialeigenschaften genauso behandelt werden wie Beton, Stahl, Plaste oder Holz. Auch die rechnerische Bewertung der Standsicherheit und der zukünftigen Nutzung müssen in gleicher Weise wie bei der aufgehenden Konstruktion erfolgen. Die dafür erforderlichen Grundlagen werden u. a. in der Boden- und Felsmechanik und im Erd-, Grund- und Dammbau behandelt. Es hat sich eingebürgert, dafür den Oberbegriff Geotechnik zu benutzen. In *Bild 1.2* sind die einzelnen Fachgebiete und die Inhalte schematisch dargestellt.

Geotechnische Grundlagen werden in jeder Phase der Planung und Errichtung eines Bauwerks benötigt und sind in den unterschiedlichsten Fachgebieten, z. B. dem Massivbau, der Baukonstruktionslehre, dem Verkehrsbau, dem Baubetriebswesen oder dem Wasserbau zu berücksichtigen.



**Bild 1.1:** Risse an einem Wohngebäude



**Bild 1.2:** Teilgebiete der Geotechnik, Einordnung innerhalb des Bauingenieurwesens



**Bild 1.3:** Herstellung eines Bohrpfahls

sichtigen. Die einzelnen Fächer der Geotechnik gemäß *Bild 1.2* sind daher keine eigenständigen Fachgebiete, sondern Dienstleister für viele Bereiche des Bauingenieurwesens.

Ausgangspunkt für den Entwurf eines Bauwerks sind zunächst die Anforderungen, die der Bauherr stellt. Auf dieser Grundlage muss aus dem Spektrum möglicher konstruktiver Lösungen die optimale Variante ausgewählt, schrittweise durchgeplant und schließlich praktisch umgesetzt werden. Dies ist die Aufgabe von Bauingenieuren. Dazu sind sehr unterschiedliche Probleme zu bearbeiten.

- **Auswahl der optimalen konstruktiven Lösung:** Diese soll alle Anforderungen an die Funktionalität erfüllen, wirtschaftlich und wartungsfreundlich sein und die ästhetischen Anforderungen erfüllen. Dies setzt bei den planenden Ingenieuren umfassende Kenntnisse zu den Konstruktionsarten und den Vor- und Nachteilen der einzelnen Varianten voraus.
- **Rechnerische Nachweise:** Im Unterschied zu den Anfängen der Bautätigkeit, die durch das Prinzip „Versuch und Irrtum“ gekennzeichnet waren, werden Bauwerke nicht mehr ausschließlich auf Grundlage von Erfahrungen errichtet, sondern vor Baubeginn werden sie konstruktiv und rechnerisch durchgeplant. Dies umfasst Nachweise der Standsicherheit, der Gebrauchstauglichkeit und Nachweise zu speziellen Nutzungsanforderungen, z. B. den Wärme- oder Schallschutz. Die Nachweise basieren auf naturwissenschaftlichen Grundlagen und ingenieurtechnischen Überlegungen.

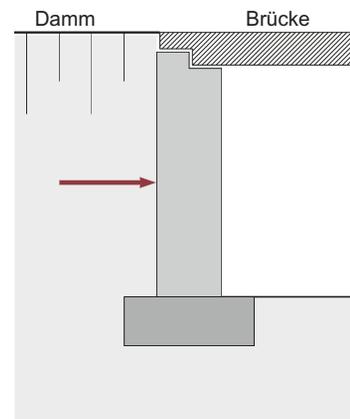
- **Überwachung der Materialeigenschaften:** Die bautechnischen Eigenschaften der eingesetzten Baumaterialien sollen optimal ausgenutzt werden. Aus den Berechnungen ergeben sich Anforderungen an die Festigkeit, das Gewicht und die Verformbarkeit des Baustoffs. Durch Materialprüfungen müssen diese Anforderungen nachgewiesen werden. Kenntnisse über die Kennwerte, die Prüfverfahren und die generelle Eignung von Baumaterialien sind dafür Grundvoraussetzung.
- **Errichtung des Bauwerks:** Sowohl die Planung als auch die eigentliche Errichtung von Bauwerken erfordern die Zusammenarbeit unterschiedlicher Gewerke oder Fachplaner. Die Koordinierung setzt ingenieurtechnisches und baubetriebliches Wissen voraus.

## 1.2 Boden- und Felsmechanik als Teil des Bauingenieurwesens

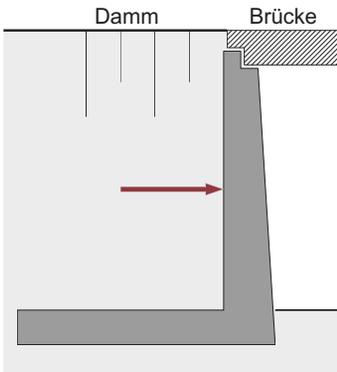
Die Bodenmechanik behandelt die Grundlagen der Berechnung der Reaktion des Bodens auf Einwirkungen durch Bauwerke, durch die Bautätigkeit selbst oder durch Beanspruchungen aus Verkehrs- und Wasserlasten. Tritt Boden oder Fels als Baugrund auf, müssen dessen Eigenschaften festgestellt und zahlenmäßig erfasst werden. Wird dagegen Boden oder Fels als Baumaterial eingesetzt, lassen sich die Eigenschaften durch Einbau und Verdichtung gezielt beeinflussen. Während im ersten Fall die Bemessung des Bauwerks, d. h. die Festlegung der Abmessungen auf Grundlage der Bodeneigenschaften erfolgt, werden im zweiten Fall Anforderungen durch Zahlenwerte vorgegeben, deren Einhaltung im Zuge der Errichtung des Bauwerks kontrolliert werden muss. Boden oder Fels ist dann ein Baumaterial im üblichen Sinn.

Die Leistungen, die ein Bauingenieur zu erbringen hat, sind z. B. in der HOAI [1] ausführlich beschrieben. Zu den ersten Leistungsphasen gehört die Grundlagenermittlung. Darunter fallen Informationen, die bereits in einem frühen Planungsstadium Einfluss auf den Entwurf des Bauwerks haben. Die Beschaffenheit des Baugrunds und die Grundwasserhältnisse gehören zu diesen grundlegenden Informationen. Wie man zu diesen Informationen kommt, wird in diesem Buch behandelt. Da der Untergrund auch im Ergebnis erdgeschichtlicher Prozesse entstanden ist, sind die geologischen Grundlagen bei der bautechnischen Bewertung mit zu berücksichtigen. Sie allein reichen aber nicht aus, um Bauprojekte umfassend zu planen.

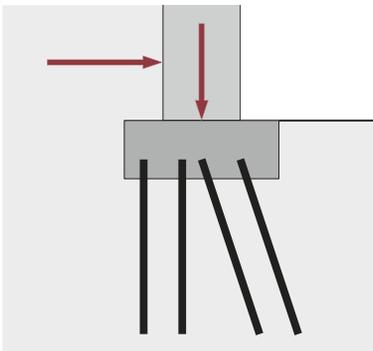
Für die ingenieurmäßige Erfassung der Eigenschaften des Untergrunds benötigt man Kennwerte, mit denen die Eigenschaften beschrieben werden können, mathematische Beziehungen, mit denen Veränderungen vorhergesagt werden können und Methoden, um diese Kennwerte fest-



**Bild 1.4:** Brückenwiderlager: Variante Schwergewichtsmauer



**Bild 1.5:** Brückenwiderlager: Variante Winkelstützmauer



**Bild 1.6:** Brückenwiderlager: Variante Pfahlgründung

zustellen. In stärkerem Maße als in anderen baustoffspezifischen Fachgebieten müssen die gegenseitigen Wechselbeziehungen zwischen

- Baustoffkunde,
- Festigkeitslehre und
- Bemessungsansätzen des Bodens in Abhängigkeit der Konstruktion

beachtet werden.

Ziel der Boden- und Felsmechanik ist die Bereitstellung von Verfahren, die die rechnerische Nachweisführung und die zahlenmäßige Erfassung der Eigenschaften von Boden und Fels ermöglichen. Es muss nachgewiesen werden, dass die Bauwerke standsicher sind (Grenzzustand der Tragfähigkeit, Stabilität) sowie keine schädlichen Verformungen erleiden (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit). Darüber hinaus ist die Wirkung des Wassers im Boden zu berücksichtigen.

### 1.3 Beispiel für ein Bauprojekt: Beschreibung

Zur Veranschaulichung der grundsätzlichen Arbeitsweisen wird im Folgenden als Beispiel die Planung der Ingenieur- und Erdbauwerke einer Verkehrsstrasse benutzt. Die Region um die Gemeinden Tiefstadt/Taldorf im Süden soll mit dem Gebiet Berghausen/Hochburg im Norden durch eine Autobahn und eine Hochgeschwindigkeitseisenbahnstrecke verbunden werden.

Schönstadt, das Verwaltungszentrum für das gesamte Gebiet, liegt zwischen beiden Regionen und soll deshalb in die Trassenführung einbezogen werden. Beide Verkehrsstrassen queren den Fluss Dinalbe. Dafür ist die Errichtung von zwei Brücken erforderlich. Da das Gelände nördlich der Dinalbe ansteigt, wird die Eisenbahnstrecke als Tunnel weitergeführt, die Autobahn soll dem Geländeverlauf folgen bzw. abschnittsweise als Einschnitt hergestellt werden. Südlich der Dinalbe verläuft das Gelände flach bzw. steigt nur geringfügig. An die Brücke schließt sich deshalb im Süden ein Verkehrsdamm an.

Nachdem der Verlauf der Autobahn- und der Eisenbahntrasse feststeht, ist das gesamte Projekt planerisch zu bearbeiten, wobei die Aufteilung in einzelne Abschnitte, sogenannte Lose, dazu dient, die zeitgleiche Bearbeitung durch mehrere Planer zu vereinfachen. Liegt diese Einteilung vor, kann mit dem Entwurf der einzelnen Abschnitte begonnen werden.

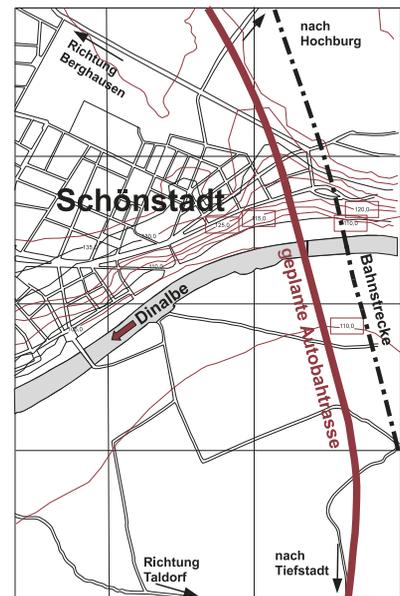
Aus mehreren Entwürfen ist die nach wirtschaftlichen und bautechnischen Kriterien optimale Lösung auszuwählen. Alle vorgeschlagenen Varianten müssen realisierbar sein. Die Gründung und das gesamte

Bauwerk müssen standsicher sein und während der geplanten Nutzungsdauer dürfen keine Zustände eintreten, die die Funktion beeinträchtigen.

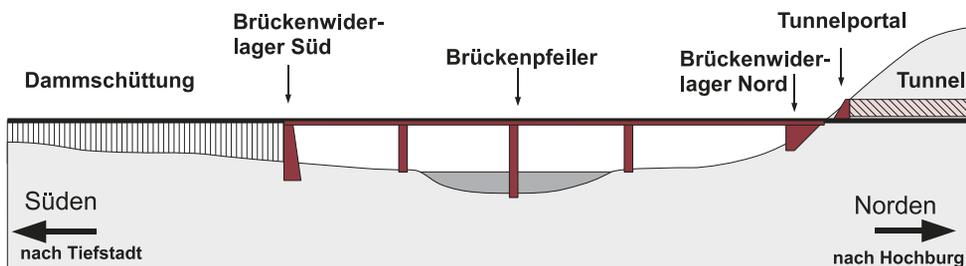
Da alle Bauwerke in irgend einer Form ihre Lasten in den Untergrund abtragen oder selbst durch den Boden belastet werden, z. B. Tunnel oder Stützmauern, müssen die Eigenschaften des Baugrunds berücksichtigt werden. Erst wenn die bautechnisch relevanten Eigenschaften bekannt sind, können die Entwürfe für Gründungen, Stützbauwerke, Baugruben, Tunnel usw. aufgestellt und miteinander verglichen werden. Die zahlenmäßige Beschreibung der Eigenschaften des Baugrunds und der Vorgänge bei baulichen Eingriffen ist Gegenstand der Boden- und Felsmechanik. Dagegen werden die eigentlichen Bauweisen, die Vor- und Nachteile der Konstruktionen und die kompletten rechnerischen (statischen) Nachweise in den Fachgebieten Erd- und Dammbau, Grundbau und Tunnelbau behandelt.

Bei dem Planungsbeispiel Damm-Brücke-Tunnel wird ein ca. 600 m langer Ausschnitt aus einer mehrere Kilometer langen Strecke betrachtet. Für den Ausschnitt gemäß *Bild 1.7* ist unter Berücksichtigung der Topographie die gesamte Strecke in Einschnitte, Dämme, Brücken und Tunnel zu unterteilen. *Bild 1.8* gibt einen schematischen Überblick über die erforderlichen Bauwerke. Bereits bei der Vorplanung sind einige grundsätzliche Überlegungen zu beachten.

**Damm (Los 1):** Dämme sind Aufschüttungen von Lockergestein. Dazu muss der Boden gelöst, verladen, zur Baustelle transportiert und dort eingebaut werden. Der Damm soll standsicher sein, d. h. Rutschungen wie in *Bild 7.1* dürfen nicht eintreten. Dafür muss der angelieferte Boden bezüglich seiner Eigenschaften grundsätzlich geeignet sein und er muss so eingebaut und verdichtet werden, dass die Standsicherheit gewährleistet ist. Außerdem darf der Damm nicht versinken, d. h. vor Aufschütten des Damms muss der Untergrund auf seine Tragfähigkeit hin bewertet und gegebenenfalls verbessert werden.



**Bild 1.7:** Topographische Karte mit dem geplanten Verkehrszug



**Bild 1.8:** Schematischer Schnitt durch das Gelände, Anordnung der Ingenieurbauwerke

**Brücke (Los 2):** Am Anfang und am Ende der Brücke sind Widerlager angeordnet. Diese gewährleisten den Übergang vom Brückenbauwerk zum Damm, Tunnel bzw. zum Gelände. Gleichzeitig dienen die Widerlager der Abstützung des Geländesprungs. Für die Abstützung der Brücke sind Pfeiler zu errichten. Die Pfeiler tragen die Lasten der Brücke und des Verkehrs in den Untergrund ab. Ist die Tragfähigkeit unmittelbar unterhalb der Aufstandsfläche ausreichend hoch, kann eine Flachgründung angeordnet werden. Andernfalls ist die Herstellung von Tiefgründungen, z. B. mit Pfählen erforderlich.

**Einschnitte (Los 3):** Einschnitte können senkrecht erfolgen, wobei dann eine Sicherung durch Stützmauern oder ähnliche Konstruktionen erforderlich ist, oder sie werden als Böschungen hergestellt. Stützwände müssen dem Druck des Erdreichs standhalten. Die Berechnung dieses „Erddrucks“ ist Aufgabe des Bauingenieurs. Böschungen sollen möglichst steil hergestellt werden, damit der erforderliche Aushub nicht zu groß ausfällt. Sie müssen aber auch ausreichend standsicher sein. Für den Nachweis der Standsicherheit oder die Berechnung des Erddrucks benötigt man Berechnungsverfahren und Kennwerte des Untergrunds.

**Tunnel (Los 4):** Bei der Herstellung von Tunneln wird der Zustand des Untergrunds erheblich verändert. Die Auswirkungen dieser Veränderungen dürfen keine negativen Folgen auf die vorhandene Bebauung haben. Es sind die Grundlagen für die wirtschaftliche und sichere Konstruktion des Tunnels bereitzustellen.

Die Anforderungen an die Planung sind sehr vielfältig. Ziel ist es, optimale Lösungen aus einem breiten Spektrum möglicher Bauweisen auszuwählen, diese Vorzugsvariante rechnerisch nachzuweisen und alle Bauhilfsmaßnahmen (Baugrubenverbau) und baubetrieblichen Aspekte bei der Planung zu berücksichtigen.

## 2 Geologische Grundlagen

### 2.1 Nutzen geologischer Informationen für Bauprojekte

Aus der geologisch-mineralogischen und der geohydraulischen Bewertung des Untersuchungsgebiets ergeben sich wichtige Schlussfolgerungen bezüglich der Eigenschaften des Untergrunds. Durch die Verbindung geologischer Grundlagen mit ingenieurtechnischen Überlegungen ist die Fachrichtung Ingenieurgeologie entstanden, die geologische, boden- und felsmechanische Methoden kombiniert. Es werden hier nur diejenigen ingenieurgeologischen Aspekte behandelt, die für die Tätigkeit des Bauingenieurs von Bedeutung sind. Dies betrifft vor allem das Verständnis der geologischen Begriffe und Beschreibungen, sowie die Erkundung des Untergrunds als Baugrund und als Baustoff.

Ziel der Tätigkeit des Bauingenieurs ist es, die Eigenschaften des Untergrunds soweit zu erkunden, dass eine wirtschaftliche und sichere Bemessung des Bauwerks möglich ist. Bevor zeit- und kostenintensive Untersuchungen veranlasst werden, müssen alle verfügbaren Informationen ausgewertet worden sein, die Hinweise auf die Eigenschaften des Baugrunds liefern können. Dazu gehört die Bewertung der topographischen, klimatischen und geologischen Bedingungen in der Umgebung der geplanten Baumaßnahme und besonders der Entstehungsgeschichte des Bodens. Grundkenntnisse über die Erdgeschichte, den Aufbau der Erde und die Zusammensetzung und Entstehung der Gesteine vermitteln die naturwissenschaftlichen Fachgebiete Geologie und Mineralogie.

Für die Beschaffung von Informationen über das Bauvorhaben und die örtlichen Gegebenheiten werden Karten, das Internet, Datensammlungen in Behörden, Institutionen oder anderen Einrichtungen und vor allem Ortsbesichtigungen genutzt. Beispiele für Hinweise, die berücksichtigt werden sollten:

- Verkehrswege zum Baufeld für Erkundung, Transporte oder andere Zwecke.
- Beschaffenheit des Geländes (Böschungsneigung, Bewuchs, Befahrbarkeit, Überflutung).
- Allgemeine Topographie (Geländeneigung).
- Hinweise zum Wasser im Baugrund (offene Gewässer, Brunnen, usw.)

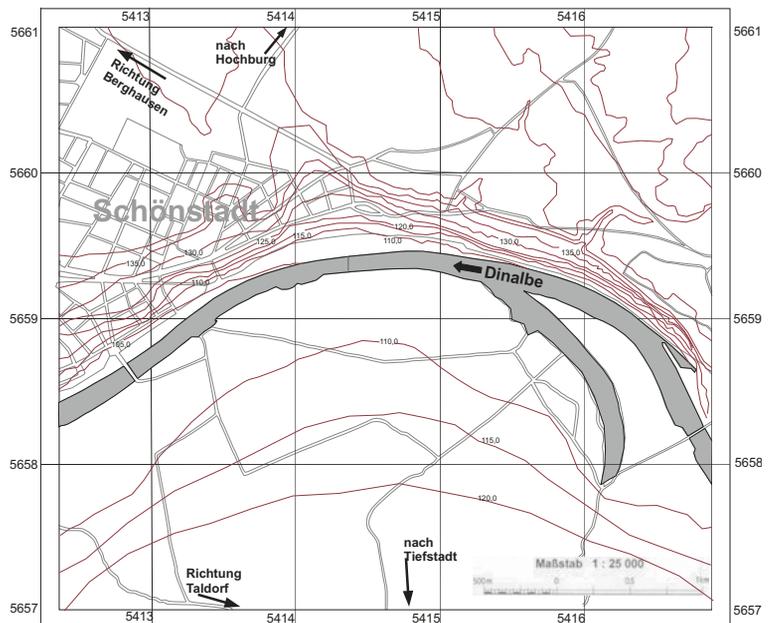
#### Beispielprojekt

- **Topographie:** südlich der Dinalbeben und flach, nördlich ansteigendes Gelände von 105 m auf ca. 140 m über NN.
- **Gewässer Fluss:** südlich häufige Überflutungen, feinkörnige, meist weiche Sedimente, Flussauen feucht und sumpfig.
- **Wasserstand:** Grundwasser kommuniziert mit Wasserstand im Fluss.
- **Hang nördlich:** standfeste Böden, evtl. Festgestein unterhalb der Deckschicht.

- Überlieferte Hinweise auf Probleme (z. B. Straßennamen in Bergbaugebieten, Objektbezeichnungen „Alte Ziegelei“, Bezeichnungen für Landschaften „Obermoor“, „Heide“, usw.).

Ein Ergebnis der ingenieurgeologischen Untersuchungen ist die Benennung und Beschreibung des Baugrunds. Dadurch ist es möglich, die Eigenschaften qualitativ abzuschätzen. In Verbindung mit boden- und felsmechanischen Untersuchungen und unter Berücksichtigung der Baumaßnahme erfolgt anschließend die zahlenmäßige Beschreibung der Baugrundeigenschaften als Teil der Tätigkeit des Bauingenieurs.

Bei der Standortwahl und der Planung der Erkundungsmaßnahmen für ein Bauwerk sind ingenieurgeologische Überlegungen unverzichtbar. Vor allem bei Projekten, bei denen mit Auswirkungen auf ausgedehnte Bereiche des Untergrunds zu rechnen ist, z. B. Talsperren, Tunnel, langen Einschnitten, Dammbauwerken oder Felsböschungen sollten Geologen in die Untersuchungen eingebunden werden.



**Bild 2.1:** Kartenausschnitt des Gebiets um Schönstadt

## 2.2 Allgemeine geologische Grundlagen

### 2.2.1 Aufbau der Erde im Überblick

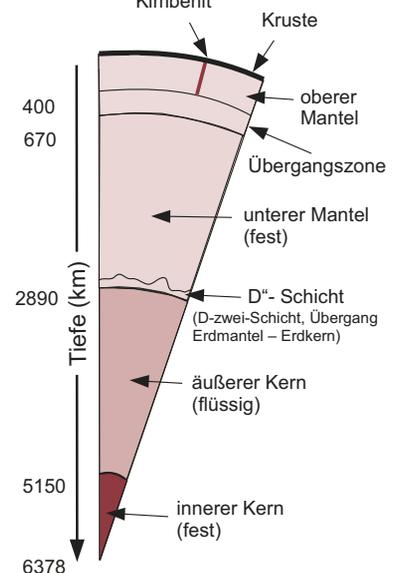
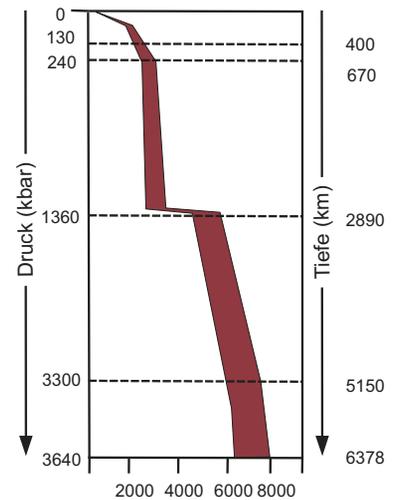
Die Erde ist geometrisch ein deformierter Rotationsellipsoid – ein birnenförmiger Geoid. Die Dichte  $\rho$  ist das Verhältnis von Masse und Volumen  $\rho = \frac{m}{V}$ . Eine nützliche Orientierung liefert die Dichte von Wasser, die im Mittel  $\rho_w = 1,0 \text{ t/m}^3 = 1,0 \text{ g/cm}^3$  beträgt. Für die Berechnung der Kräfte wird die Wichte  $\gamma$  benutzt, die als Quotient von Gewichtskraft und Volumen definiert ist. Sie berechnet sich als Produkt von Dichte  $\rho$  und Erdbeschleunigung  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  zu  $\gamma = \rho g$ . Die mittlere Wichte von Wasser ist  $\gamma_w = 9,81 \approx 10,0 \text{ kN/m}^3$  und die mittlere Wichte der Erde  $\gamma = 54,17 \approx 55,0 \text{ kN/m}^3$ .

**Tabelle 2.1:** Erreichte Endteufen einiger Tiefenbohrungen

Bohrung	Tiefe [m]	Verhältnis zum Erdradius [%]
Kola UdSSR 1970-1994 (Forschungsbohrung)	12262	0,192
Oklahoma USA 1974 (Erdgasbohrung)	9583	0,150
KTB Windischeschenbach BRD 1990-94 (Forschungsbohrung)	9101	0,142
Zistersdorf Österreich 1983 (Erdgasbohrung)	8553	0,134
Mirow 1 DDR 1974 (Erdölbohrung)	8009	0,125

Ungefähr 71 % der  $510 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  großen Erdoberfläche werden von Ozeanen bedeckt. Das Innere der Erde besteht aus Schalen unterschiedlicher Dichte. Mit der Tiefe nehmen Druck und Temperatur zu. Die geothermische Tiefenstufe ist die Tiefe, in der sich die Erdkruste um  $1^\circ \text{C}$  erwärmt. Sie liegt im Mittel bei 33 m. Je nach regionaler Situation können erhebliche Abweichungen von diesem Mittelwert auftreten (z. B. Schwäbische Alb: 11 m, Südafrika: 90 m). Das mit ca. 12 km Endteufe tiefste Bohrloch der Welt befindet sich auf der Halbinsel Kola. Vulkane können Bruchstücke des Erdmantels immerhin aus 80-120 Kilometern Tiefe an die Erdoberfläche fördern. Einige Diamanten enthalten Einschlüsse, die in rund 700 Kilometern Tiefe entstanden sind.

Die Erkenntnisse zum Aufbau des Inneren der Erde resultieren daher nicht aus der direkten Inaugenscheinnahme, sondern aus geophysikalischen Untersuchungsverfahren, z. B. der Auswertung von Erdbe-



**Bild 2.2:** Schalenbau, Druck- und Temperaturverlauf im Inneren der Erde

**Tabelle 2.2:** Einteilung des Erdkörpers in Schalen

Tiefe unter GOF [km]	Bezeichnung der Schicht	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Temperatur [°C]	Geschwindigkeit der p-Wellen [km/s]
10-30	Obere Kruste	2,7	<25-740	5,6-6,3
–	Conrad-Diskontinuität	–	–	–
6-50	Untere Kruste	3,0	–	6,4-7,4
–	Mohorovičić-Diskontinuität	–	–	–
400	Oberer Mantel	3,3	1400	8,0-8,3
900	Übergangszzone	4,6	–	8,2-8,4
2900	Unterer Mantel	5,7	2500	8,0-8,3
–	Wiechert-Gutenberg-Diskontinuität	–	–	–
5100	Äußerer Kern	9,4	2500-3000	8,1-9,4
6370	Innerer Kern	11-13,5	3000-5000	11,3

ben. Von einem Erdbebenherd gehen starke Wellen aus, die horizontal an der Erdoberfläche verlaufen, aber auch quer durch den Erdkörper dringen.

#### Erde – Mittlere Kennwerte

<b>Radius</b>	≈ 6378,26 km (Äquator)
<b>Volumen</b>	≈ 1,083 · 10 <sup>12</sup> km <sup>3</sup>
<b>Masse</b>	≈ 5,98 · 10 <sup>21</sup> t
<b>Dichte <math>\rho</math></b>	≈ 5,52 g/cm <sup>3</sup>

#### Mittlere Kennziffern der Schalen

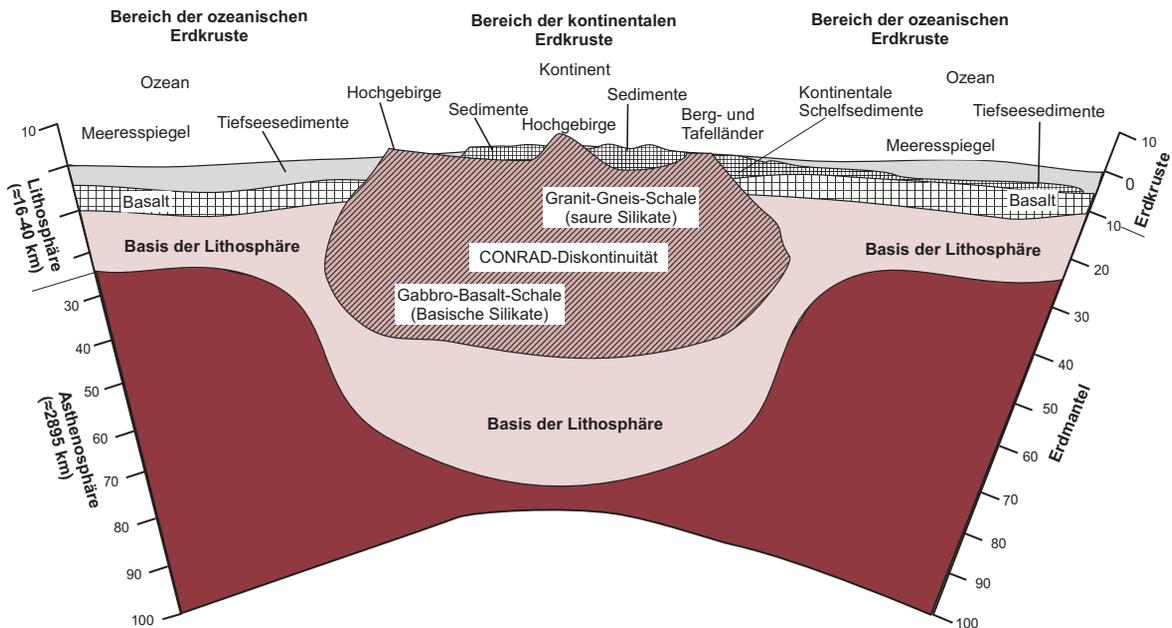
<b>Erdkruste</b>	0,4 % der Masse $\rho \approx 2,8$ g/cm <sup>3</sup>
<b>Erdmantel</b>	67,2 % der Masse $\rho \approx 4,5$ g/cm <sup>3</sup>
<b>Erdkern</b>	32,4 % der Masse $\rho \approx 11,0$ g/cm <sup>3</sup>

Durch die zeitliche Erfassung des Auftretens von Wellen an Messstationen lässt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen berechnen. Diese ist abhängig von der Dichte des durchquerten Materials. Auch andere physikalische Phänomene, z. B. die elektrische Leitfähigkeit oder die Erdanziehung lassen sich für die Untersuchung der Eigenschaften des Untergrunds nutzen. Geophysikalische und bodendynamische Messverfahren zur Untersuchung des Bodens und zur Ermittlung von Kennwerten sind auf dieser Grundlage entwickelt worden (Geoelektrik, Geomagnetik, Gravimetrie, Geoseismik, Georadar, usw.).

Durch die Messung der Wellenausbreitung bei Erdbeben sind mehrere sprunghafte Änderungen der Dichte nachgewiesen worden, die auf den schalenförmigen Aufbau der Erde schließen lassen. Man unterscheidet dabei Longitudinalwellen, auch P-Wellen (Primärwellen) oder Kompressionswellen genannt – und S-Wellen (Schwerwellen). Die P-Welle schwingen in Ausbreitungsrichtung und können sich in festen, flüssigen und gasförmigen Materialien ausbreiten. Dagegen schwingen S-Wellen quer zur Ausbreitungsrichtung (Transversalwelle). Sie können sich nicht in Flüssigkeiten oder Gasen ausbreiten, da diese einer Scherverformung keinen Widerstand entgegenzusetzen.

Die Erdkruste umfasst die Zone von der Erdoberfläche bis zur Mohorovičić-Diskontinuität. Man unterscheidet zwischen kontinentaler Kruste mit 30-60 km Dicke und der ozeanischen Kruste unter den Ozeanen mit einer Dicke von nur 5-7 km. Unter der Erdkruste befindet sich der

obere Erdmantel, der sich bis ca. 400 km Tiefe erstreckt. Die Lithosphäre bezeichnet den Bereich von der Erdkruste einschließlich des oberen Mantels. Der Erdkern gliedert sich in einen flüssigen äußeren Kern und in einen wahrscheinlich festen inneren Kern. Die Abgrenzung zwischen den Schalen wird von Diskontinuitäten gebildet, die durch deutliche Sprünge der Laufzeitkurven der Erdbebenwellen zu erkennen sind. Je härter und schwerer ein Gestein ist, um so höher ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen.



**Bild 2.3:** Aufbau und Mächtigkeit der Lithosphäre unter den Kontinenten und Ozeanen

## 2.2.2 Geologische Zeitrechnung

Die geologische Zeitrechnung beginnt mit der Bildung und Erstarrung der Erdkruste vor ca. 4,8 Milliarden Jahren. Ältere Schichten werden normalerweise von jüngeren Schichten überlagert. Durch die Überlagerung wird der Boden zusammengedrückt und verdichtet.

Seine Festigkeit nimmt dadurch zu. Wird ein Bauwerk in jungen, nicht vorbelasteten Schichten gegründet, ist mit größeren Verformungen und geringerer Festigkeit zu rechnen. Umgekehrt lässt sich aus dem Alter und der Entstehung einer Schicht erkennen, ob diese früher einmal von einer anderen Schicht überlagert worden ist. Auf Grundlage der Überle-

### Systematik der Zeitangaben

- **Äonen:** sehr langer geologischer Zeitraum > 500 Mio. Jahre (4 Äonen: Phanerozoikum, Proterozoikum, Archaikum, Hadaikum)
- **Ära, Zeitalter:** Erdzeitalter > 100 Mio. Jahre (z. B. Phanerozoikum – Zeitalter: Känozoikum, Mesozoikum, Paläozoikum)

### Systematik der Zeitangaben

- **Periode, Formation:** < 100 Mio. Jahre (z. B. Phanerozoikum/Känozoikum – Formation: Quartär, Neogen (früher Tertiär), Paläogen)
- **Epoche, Abteilung:** 10 Mio. Jahre (z. B. Phanerozoikum/Känozoikum/Quartär – Epoche: Holozän, Pleistozän).

### Kurzcharakteristik der Zeitalter (Ären)

#### Känozoikum

(Erdneuzeit: 65 Mio. Jahre bis heute)

	Tertiär, Quartär
Flora	Blütenpflanzen, Nadelhölzer
Fauna	Säugetiere (Raubtiere, Huftiere, Primaten)
Klima	Schwankungen
Entwicklung und Differenzierung der Menschheit	

#### Mesozoikum

(Erdmittelalter: 251 bis 65 Mio. Jahre)

	Trias, Jura, Kreide
Fauna	Reptilien, Riesensaurier, Säugetiere

#### Paläozoikum

(Erdaltertum: 542 bis 251 Mio. Jahre)

	Kambrium, Ordovizium, Silur, Devon, Karbon, Perm
Flora	üppiger Pflanzenwuchs
Fauna	Reptilien (Saurier)

#### Präkambrium

(Erdur- und Erdfrühzeit: 3800-542 Mio. Jahre)

	Entstehung der Erde abgeschlossen
Flora	Beginn Photosynthese, Algen, Bakterien
Fauna	niedere Wirbellose

gung, dass ältere Schichten immer von jüngeren überlagert werden, erfolgt in der Geologie die Bestimmung des relativen Alters (Lagerungsgesetz von Steno). Die Bestimmung des relativen Alters beruht auf der Verwendung von Zeitmarken, z. B. Gebirgsbildungen oder Leitfossilien. Die Lebewesen haben sich immer einsinnig gerichtet verändert. Der biologische Entwicklungsprozess ist nicht umkehrbar oder wiederholbar. Auf dieser Grundlage kann das relative Alter von Gesteinsschichten durch Fossilien bestimmt werden. Leitfossilien sind Lebensformen, die nur eine kurze Zeit existierten und weit verbreitet waren. Auch petrologische (gesteinskundliche) Merkmale, z. B. Aschen-Lagen aus großen Vulkanausbrüchen, können zur relativen Altersbestimmung benutzt werden.

Die Methoden zur Bestimmung des absoluten Alters von Schichten beruhen auf naturwissenschaftlichen Überlegungen. Zur Altersbestimmung kann die jahreszeitliche Abfolge der Ablagerungsprozesse, ähnlich den Jahresringen von Bäumen, genutzt werden, z. B. bei Bändertonen, bei denen sich helle, sandige Sommerlagen mit dunklen, tonigen Winterlagen abwechseln. Die radiometrische Altersbestimmung gehört zu den physikalischen Verfahren. Das Alter wird aufgrund der Beobachtung des Zerfalls radioaktiver Elemente ermittelt.

Im 19. und 20. Jahrhundert ist eine geologische Zeitskala entwickelt worden, deren Abschnitte sich auf die Abfolge von Gesteinen und Fossilien beziehen. Die Unterteilung der Zeitskala erfolgt nach Äonen, Zeitalter, Formationen und Epochen (siehe *Tabelle 2.4*). Eine Datierung ist nur als Größenordnung sinnvoll, wobei in größeren Abständen Anpassungen der Zuordnung von Begriffen zu Zeitspannen vorgenommen worden sind. So ist der Begriff „Tertiär“ im Jahr 2000 aus der international gültigen und von der Internationalen Kommission für Stratigraphie herausgegebenen Geologischen Zeitskala gestrichen worden. Bei der Beurteilung des Baugrunds mithilfe historischer Unterlagen ist er nach wie vor gebräuchlich und wird deshalb hier ebenfalls noch benutzt.

Es ist üblich, für die erste Charakterisierung der Baugrundsichtung, die geologischen Bezeichnungen zu nutzen. Die Bestimmung des Zeitalters einer Schicht erfolgt auf Grundlage geologischer Überlegungen. Bei schwierigen Verhältnissen sollte ein Fachmann (Geologe) hinzugezogen werden. Für die Planung von Baumaßnahmen kann die richtige Interpretation dieser Informationen sehr nützlich sein.

Die Eiszeiten sind wichtige erdgeschichtliche Ereignisse der jüngeren Erdgeschichte. Sie haben das Landschaftsbild und die Ablagerungsbedingungen in einigen Regionen wesentlich geprägt. Während des Pleistozäns kam es zu einer großflächigen Vergletscherung von Nordeuropa, wobei das Eis unterschiedlich weit von Norden nach Süden vordrang. Gleichzeitig erfolgte eine Vergletscherung von den Alpen her nach Norden. Mittel- und Süddeutschland blieben eisfrei. Hier lagerten sich periglaziale Sedimente ab. Das letzte Rückzugsstadium der Verei-

sung begann ca. 15.000 bis 8.000 Jahre vor der Zeitrechnung. Seit dem hebt sich der skandinavische Schild unter der Entlastung kontinuierlich heraus. Die von den Gletschern transportierten Verwitterungsprodukte wurden ungeordnet in Moränen oder durch das Schmelzwasser sortiert abgelagert. Eiszeitliche Sedimente sind Lockergesteine wie Kiese, Sande, Geschiebemergel und Geschiebelehme.

**Tabelle 2.3:** Übersicht zur Zeitskala der Erdgeschichte

Beginn [Mio. a]	Ära/Zeitalter	Periode	Epoche	Ereignisse
0,0118	Känozoikum (Neozoikum, Erdneuzeit)	Quartär (Jungzeit)	Holozän	Moderner Mensch (Homo sapiens)
1,8			Pleistozän	Neandertaler, Homo erectus
5,3		Tertiär (Neuzeit)	Pliozän	Vormenschen (z.B. Australopithecus)
23,03			Miozän	Primaten (z.B. Pliopithecus)
33,9			Oligozän	Huftiere (z.B. Protoceras)
55,8			Eozän	Urhufer (z.B. Uintatherium)
65,5			Paläozän	Aussterben der Dinosaurier
144,5	Mesozoikum	Kreide	erste Blütenpflanzen (Angiospermen)	
199,6	Mittelzeit	Jura	Dinosaurier, erste Vögel (z.B. Archaeopteryx)	
251,1		Trias	erste Dinosaurier und Säugetiere	
299		Perm	Reptilien (z.B. Dimetrodon), Insektenordnungen	
359,2	Altzeit	Karbon	Amphibien, erste Reptilien (z.B. Edaphosaurus)	
416		Devon	Fische, erste Amphibien und Bäume	
443,7		Silur	kieferlose Wirbeltiere; erste Landpflanzen	
488,3		Ordovizium	erste Wirbeltiere, marine Algen	
542		Kambrium	erste Tiere mit Hartteilen	
1500		Präkambrium	Proterozoikum	älteste Tiere (z.B. Würmer, Quallen, Algen)
3800	(Urzeit)	Archaikum	Sauerstoff, älteste Mikroorganismen	
4570	Hadaikum		Formation des Planeten Erde	

Die in der *Tabelle 2.3* dargestellten Zeitangaben basieren auf den Angaben der Internationalen Stratigraphischen Kommission ICS (<http://www.stratigraphy.org/>). Obwohl die Bezeichnungen „Tertiär“ und „Quartär“ abgeschafft und durch „Paläogen“ bzw. „Neogen“ ersetzt worden sind, werden sie hier benutzt, weil viele geologische Informationsquellen diese Begriffe enthalten.