

Jens Engel
Said Al-Akel



Einführung in den Grund-, Erd- und Dammbau

Konstruktion, Bauverfahren, Nachweise



3., aktualisierte Auflage

HANSER



Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial. Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

plus-63tyl-idg71

plus.hanser-fachbuch.de



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

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/Lauer • *Einführung in die Boden- und Felsmechanik*

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*

Malpricht • *Schalungsplanung*

Rjasanowa • *Mathematik für Bauingenieure*

Jens Engel

Said Al-Akel

Einführung in den Grund-, Erd- und Dammbau

Konstruktion, Bauverfahren, Nachweise

3., aktualisierte Auflage

HANSER

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Engel, HTWK Dresden

Prof. Dr.-Ing. Said Al-Akel, HTWK Dresden



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

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.

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 – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2021 Carl Hanser Verlag München

Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Frank Katzenmayer

Herstellung: Anne Kurth

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelbild: © stock.adobe.com/Kara

Satz: Jens Engel

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-46948-8

E-Book-ISBN 978-3-446-47136-8

Vorwort zur 3. Auflage

Das vorliegende Buch behandelt die Grundlagen des Grundbaus als Teil der Geotechnik. Es ist als Lehrbuch für Studierende an Fachhochschulen konzipiert, soll aber auch für die praktische Arbeit Hilfe und Unterstützung sein.

Es stehen die grundlegenden Arbeitsschritte für den Entwurf und die statischen Nachweise im Mittelpunkt. Aus der Funktion, die das Bauwerk später erfüllen soll, ergeben sich Lastannahmen und Anforderungen an die Standsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit. Unter Berücksichtigung der Baugrundverhältnisse muss der Planer die optimale Variante aus einer Vielzahl technisch möglicher Lösungen auswählen. Es sind Kenntnisse zu den konstruktiven Grundlagen und den Vor- und Nachteilen der einzelnen Varianten erforderlich, um schließlich die Realisierbarkeit und den technischen Gesamtaufwand beurteilen zu können.

Für alle weitergehenden Untersuchungen müssen zunächst die Abmessungen mit einfachen Methoden abgeschätzt werden. Dazu sind in den entsprechenden Abschnitten des Buches Faustformeln und konstruktive Grundregeln angegeben, die den Entwurf und die grobe Festlegung der Abmessungen von Gründungen oder anderen Bauwerken des Erd- und Grundbaus erlauben. Diese „Faustformeln“ sind außerdem ein nützliches Hilfsmittel, um die Plausibilität von Berechnungsergebnissen zu überprüfen. Die zunehmende Bedeutung solcher Plausibilitätskontrollen resultiert nicht zuletzt aus der verstärkten Nutzung von Computerprogrammen bei der Nachweisführung.

Im vorliegenden Buch werden alle rechnerischen Nachweise auf Grundlage des Eurocodes EC 7 [25] behandelt. Der Vergleich mit Ergebnissen nach früheren Berechnungsmodellen und nach „Faustformeln“ kann auch hier sehr hilfreich sein.

Als Lehrbeispiel wird die Planung einer Verkehrsstrasse genutzt. In dem in dieser Reihe erschienenen Buch „Einführung in die Boden- und Felsmechanik“ wurden an diesem fiktiven Bauwerk bereits die Grundlagen der Baugrunderkundung und -untersuchung dargestellt. Als nächster Schritt sind die Brücke über den Fluss und das südlich anschließende Dammbauwerk auf weichem Untergrund konstruktiv zu entwerfen und die erforderlichen geotechnischen Nachweise zu führen.

Die Übungen bestehen jeweils aus einem Entwurfsteil, bei dem für unterschiedliche Aufgabenstellungen Varianten konstruktiv zu erarbeiten und nach der Vorbemessung mit Faustformeln zu vergleichen sind. Der zweite Teil behandelt schließlich die klassischen Nachweise.

Zur Vertiefung des Stoffs wird in den einzelnen Kapiteln auf Übungsaufgaben verwiesen, die sich auf das Lehrbeispiel beziehen. Aufgabenstellungen, Lösungen und weitere Arbeitsunterlagen sind im Internet abrufbar unter:

<https://plus.hanser-fachbuch.de>

Den Zugangscode dafür finden Sie auf der ersten Seite des Buchs. Das Beispielprojekt wurde erarbeitet unter Einbeziehung praktischer Erfahrungen bei der Bearbeitung realer Aufgabenstellungen sowie auf Grundlage der Inhalte der Übungen im Rahmen des Bauingenieurstudi-

ums. Besonderer Dank hierbei gilt Herrn M.Sc. E. Kammel für die ingenieurtechnische Bearbeitung.

Die Autoren haben sich bemüht, die Erfahrungen in der Ausbildung von Bauingenieuren und bei der Lösung baupraktischer Fragestellungen mit einfließen zu lassen. Neben der Überarbeitung des Layouts sind in der vorliegenden 3. Auflage die Bezüge zu aktuellen Normen und Regelwerken dem aktuellen Stand angepasst worden. Nicht alles konnte in der vorliegenden Auflage gleichermaßen detailliert dargestellt werden. Hinweise zu Korrekturen oder Ergänzungen nehmen wir gern entgegen.

Dresden, im Sommer 2021

Jens Engel
Said Al-Akel

Inhalt

1	Einführung	13
1.1	Aufgabengebiete	13
1.2	Ingenieurleistungen, Beispielprojekt	14
2	Sicherheitsnachweise im Grundbau	19
2.1	Einführung	19
2.1.1	Grundlagen der Berechnungen	19
2.1.2	Sicherheitskonzepte	20
2.2	Standsicherheit nach DIN EN 1997-1	22
2.2.1	Grundlagen	22
2.2.2	Nachweisführung	24
2.2.3	Einwirkungen und Beanspruchungen	25
2.2.4	Widerstände	30
2.2.5	Nachweise	32
2.2.5.1	Grenzzustand der Tragfähigkeit ULS	32
2.2.5.2	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit SLS	34
3	Flächengründungen	35
3.1	Funktion, Tragwerk	35
3.2	Bauweisen, Entwurf und Vorbemessung	37
3.2.1	Einzel- und Streifenfundamente	37
3.2.2	Plattengründung	44
3.2.3	Pfeilergründung	46
3.2.4	Kastengründung	47
3.3	Nachweise	49
3.3.1	Grundlagen – Spannungsverteilung, Schnittkräfte	50
3.3.1.1	Einzel- und Streifenfundamente	50
3.3.1.2	Berechnung elastischer Fundamente	56
3.3.2	Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)	60
3.3.2.1	Grundbruch	60
3.3.2.2	Gleitsicherheit	62

3.3.2.3	Lagesicherheit – Grenzzustände EQU, HYD.....	63
3.3.3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS).....	65
3.3.4	Nachweis des Sohlwiderstands	68
4	Pfahlgründungen.....	71
4.1	Funktion, Tragwerk.....	71
4.1.1	Anwendungsgebiete.....	71
4.1.2	Tragwerke für Gründungen mit Pfählen.....	72
4.2	Bauweisen, Entwurf und Vorbemessung.....	75
4.2.1	Verdrängungspfähle	77
4.2.1.1	Fertigrammpfähle.....	77
4.2.1.2	Ortbetonrammpfähle.....	80
4.2.1.3	Vollverdrängungsbohrpfähle (Schraubpfahl)	83
4.2.2	Bohrpfähle.....	84
4.2.3	Mikropfähle	89
4.3	Berechnung, Nachweise	91
4.3.1	Grundlagen	91
4.3.2	Beanspruchungen E axial belasteter Pfähle	92
4.3.2.1	Grundsätze.....	92
4.3.2.2	Beanspruchungen bei Pfahlrostgründungen	95
4.3.3	Widerstände R axial auf Druck beanspruchter Pfähle.....	97
4.3.3.1	Statische Pfahlprobelastung	97
4.3.3.2	Erfahrungswerte für Einzelpfähle.....	97
4.3.4	Nachweise bei axial beanspruchten Pfählen.....	107
4.3.4.1	Nachweis der Tragfähigkeit STR, GEO-2	107
4.3.4.2	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit SLS	108
4.3.5	Horizontal belastete Pfähle.....	108
5	Stützkonstruktionen	111
5.1	Funktion, Tragwerk.....	111
5.2	Bauweisen, Entwurf und Vorbemessung.....	112
5.2.1	Verbundbauweise.....	112
5.2.1.1	Schwergewichtsmauern.....	112
5.2.1.2	Winkelstützmauern.....	114
5.2.1.3	Raumgitterstützwand	116
5.2.1.4	Bewehrte Erde und geokunststoffbewehrte Bauweisen	116
5.2.1.5	Nagelwände.....	118
5.2.2	Stützbauweisen	120

5.2.2.1	Trägerbohlwände	122
5.2.2.2	Spundwände	124
5.2.2.3	Bohrpfahlwände	132
5.2.2.4	Schlitzwände	134
5.2.2.5	Injektionswände	135
5.3	Nachweise	136
5.3.1	Verbundbauweise	136
5.3.1.1	Winkelstützmauern	136
5.3.1.2	Bodenvernagelung	139
5.3.2	Stützbauweisen	141
5.3.2.1	Belastender Erddruck	141
5.3.2.2	Durchgehende Wände – Berechnung nach BLUM	143
5.3.2.3	Nachweisführung bei durchgehenden Wänden nach EC 7	147
5.3.2.4	Trägerbohlwände	153
6	Verankerungen	161
6.1	Funktion und Tragwerk	161
6.2	Entwurf und Vorbemessung	162
6.2.1	Bauweisen – Überblick	162
6.2.2	Verpressanker	163
6.3	Nachweise	170
6.3.1	Verpressanker – Herausziehwiderstand	171
6.3.2	Aufbruch des Verankerungsbodens	171
6.3.3	Nachweis der ausreichenden Ankerlänge – Tiefe Gleitfuge	172
7	Baugruben, Gräben	175
7.1	Funktion, Tragwerk	175
7.2	Bauweisen, Entwurf und Vorbemessung	176
7.2.1	Nicht verbaute Baugruben und Gräben	176
7.2.2	Grabenverbau	178
7.2.3	Baugrubenverbau	180
7.3	Nachweise	185
7.3.1	Aufbruch der Baugrubensohle	185
7.3.2	Hydraulischer Grundbruch	186
7.3.3	Aufschwimmen	187

8	Wasser und Bauwerk	189
8.1	Grundwasser	189
8.1.1	Wasser und Bauwerk	189
8.1.2	Grundwasserhaltung – Verfahren	190
8.1.2.1	Schwerkraftentwässerung (gravimetrisch)	191
8.1.2.2	Vakuumentwässerung	193
8.1.2.3	Elektroosmose	194
8.2	Berechnungsgrundlagen	194
8.2.1	Brunnenbemessung	194
8.2.2	Geschlossene Wasserhaltung, senkrechte Brunnen	197
8.2.3	Offene Wasserhaltung	199
8.2.4	Filterstabilität	200
8.3	Abdichtungen, Dränage	202
8.3.1	Konstruktion und Entwurf	202
8.3.1.1	Grundlagen, Einflüsse	202
8.3.1.2	Aufbau und Sicherung der Wirksamkeit von Abdichtungen	204
8.3.2	Abdichtungsarten	205
8.3.3	Hinweise zu Planung und Bemessung	207
9	Konstruktiver Erdbau	209
9.1	Erd- und Dammbauwerke	209
9.1.1	Aufgaben des Erdbaus	209
9.1.2	Dammbauwerke	210
9.1.3	Baumaterial, Verarbeitung	213
9.2	Bauweisen, Entwurf und Vorbemessung	217
9.2.1	Eignungsuntersuchungen	217
9.2.2	Verdichtung und Bodenaustausch	217
9.2.2.1	Verdichtungsanforderungen und Verdichtungskontrolle	218
9.2.2.2	Oberflächenverdichtung	219
9.2.2.3	Dynamische Tiefenverdichtung	223
9.2.3	Bodenaustausch	226
9.2.3.1	Oberflächennaher Bodenaustausch	226
9.2.3.2	Bodenaustausch bis in große Tiefe	227
9.2.4	Verfestigung	231
9.2.4.1	Oberflächennahes Einmischen	231
9.2.4.2	Injektionen	232
9.3	Rechnerische Nachweise bei Erdbauwerken	235
9.3.1	Grundlagen	235
9.3.1.1	Verkehrsbauwerke	235
9.3.1.2	Deiche, Stauanlagen	236

10 Grundbau und bestehende Bauwerke	237
10.1 Probleme beim Bauen im Bestand	237
10.1.1 Unterfangung	238
10.1.2 Unterfahrung	240
10.2 Baugrundverursachte Schäden an Bauwerken	241
10.2.1 Äußere Anzeichen von Schäden	241
10.2.2 Ursachen für Schäden (Beispiele)	242
10.2.3 Zahlenmäßige Schadensbeurteilung	244
10.2.3.1 Verfahren zur Abschätzung des Restrisikos	245
10.2.3.2 Anwendungsbeispiel - Stützmauer	248
Literatur	255
Index	261

1

Einführung

Nur unter Berücksichtigung der bautechnisch konstruktiven Aspekte ist eine gezielte Untersuchung und Erkundung des Baugrunds möglich. Dazu müssen die Vor- und Nachteile der möglichen Bauweisen bekannt sein. Bereits bei der Bewertung eines Baufelds sollten die möglichen Varianten für Gründung und Baugrube berücksichtigt werden. Der Rasterabstand und die Tiefe der Erkundung werden beispielsweise nach der Art und den Abmessungen der Gründung und der Baugrube gewählt. Ebenso muss bei der Bestimmung von Kennwerten an Boden und Fels von vornherein die spätere bauliche Ausführung beachtet werden. Eine umfassende Zusammenstellung der erforderlichen Grundlagen der Fachgebiete Ingenieurgeologie und Bodenmechanik ist in [55] enthalten. Im Fach Grund-, Erd- und Dammbau werden die Bauweisen und die Regeln der Bemessung als Teil des gesamten ingenieurtechnischen Leistungsumfangs behandelt (siehe *Bild 1.1*).

■ 1.1 Aufgabengebiete

Bevor mit den rechnerischen Nachweisen nach dem Teilsicherheitskonzept begonnen werden kann, sind die Abmessungen abzuschätzen und die Baumaterialien auszuwählen. Erst durch Vergleich und Optimierung mehrerer Varianten ist die endgültige Festlegung der Abmessungen der Vorzugslösung möglich. Dabei gewinnt der Einsatz von Computerprogrammen immer mehr an Bedeutung. Für die Kontrolle der Plausibilität der Ergebnisse wird man auch hier auf Erfahrungswerte zurückgreifen müssen.

Faustformeln können dabei ein sinnvolles Hilfsmittel sein. Sie sind aufgrund praktischer Erfahrungen entstanden, die über Jahrhunderte vor allem aus der handwerklichen Umsetzung von Baumaßnahmen hervorgegangen sind. Bis ins späte Mittelalter wurden der Errichtung von Bauwerken im Wesentlichen die Erfahrungen der Baumeister zugrunde gelegt. Diese sind nach dem Prinzip „Versuch und Irrtum“ entstanden. Misserfolge dieser Vorgehensweise sind heute höchstens als Legenden überliefert. Die Ansprüche an Bauwerke wie Kathedralen oder Befestigungsanlagen stiegen und waren Anlass, den Wissensstand voranzutreiben. Im 17. Jahrhundert wurden z. B. in Frankreich Regelquerschnitte für bis zu 30 m hohe Stützmauern von General VAUBAN entwickelt (zitiert in [96]). Mit den Fortschritten in Physik, Mechanik und Mathematik konnten die entsprechenden Hilfsmittel auch auf die Bemessung von Grundbauwerken angewendet werden. Ausgehend von statischen Methoden wurden Lösungen, die zunächst für Spezialfälle galten, so verallgemeinert, dass sie für viele Anwendungen einsetzbar sind. Auf dieser Grundlage entstanden die ersten Theorien des Erddrucks (1773 COULOMB [45]: „Über eine Anwendung der Maxima- und Minima-Rechnung auf einige Probleme bezüglich der Architektur“, 1856 RANKINE [85]: „Über die Stabilität von lockerer Erde“).

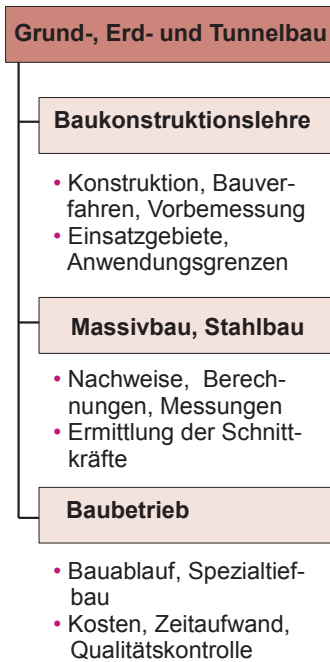


Bild 1.1 Einordnung in die Fachgebiete des Bauingenieurwesens – Übersicht

Rechnerische Untersuchungen sind daher erst seit der Entwicklung der Ingenieurwissenschaften etwa ab dem 18. Jahrhundert bei der Dimensionierung von Grundbauwerken mit eingeflossen. Bemessungsverfahren auf Grundlage älterer Sicherheitskonzepte, z. B. dem summarischen Sicherheitskonzept, sind deshalb eine weitere Möglichkeit zur Prüfung der Plausibilität der Berechnungen. Mit diesen Verfahren liegen langjährige, meist gute Erfahrungen vor und es ist mit einigen Bemessungsansätzen möglich, die erforderlichen Abmessungen direkt zu berechnen.

■ 1.2 Ingenieurleistungen, Beispielprojekt

In der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure HOAI [71] sind die Ingenieurleistungen für die unterschiedlichen Spezialgebiete detailliert beschrieben. Die Geotechnik ist eine Querschnittsdisziplin, die Grundlagen für die Ingenieurleistungen der Objekt- und der Tragwerksplanung sowie der Projektsteuerung bereitstellt. Dies betrifft u. a. die folgenden, in der HOAI [71] aufgeführten Leistungen (siehe *Tabelle 1.1*):

- Objektplanung: §41-44 Leistungen bei Ingenieurbauwerken
§45-48 Leistungen bei Verkehrsanlagen
- Fachplanung: §49-52 Tragwerksplanung
- Beratungsleistungen: Anlage 1, 1.3 Geotechnik
Anlage 1, 1.4 Ingenieurvermessung

Kenntnisse zu den Verfahren, den statischen und konstruktiven Kriterien sind genauso wichtig wie die Berücksichtigung der Auswirkungen auf Natur und Umwelt, auf bestehende Bauwerke

Tabelle 1.1 Übersicht über Leistungsphasen und Aufwand für einige Ingenieurleistungen

Phase	Objektplanung §43		Tragwerksplanung §51		Geotechnik Anl. 1.3.3	
1	Grundlagen	2 %	Grundlagen	3%	Erkundungskonzept	15 %
2	Vorplanung	20 %	Vorplanung	10 %	Baugrundbeschreib.	35 %
3	Entwurfsplanung	25 %	Entwurfsplanung	15 %	Gründungsberatung	50 %
4	Genehmigungspl.	5%	Genehmigungspl.	30 %		
5	Ausführungsplanung	15 %	Ausführungsplanung	40 %		
6	Vorbereitung Vergabe	13 %	Vorbereitung Vergabe	2 %		
7	Mitwirkung bei der Vergabe	4 %	Mitwirkung bei der Vergabe			
8	Bauoberleitung	15 %				
9	Objektbetreuung, Dokumentation	1 %				

sowie bezüglich der Inanspruchnahme von Flächen, Medien und Transportleistungen. Bei der ingenieurtechnischen Bearbeitung von Bauvorhaben kann in allen Leistungsphasen auch die Einbeziehung geotechnischer Aspekte erforderlich sein.

1 Grundlagenermittlung: Es sind die wichtigsten Vorgaben aus der Aufgabenstellung und den Randbedingungen des Bauvorhabens zusammenzustellen und hinsichtlich der erforderlichen weiteren Untersuchungen auszuwerten. Die Anforderungen an die Funktion des Bauwerks durch die geplante Nutzung oder an vorübergehende Baumaßnahmen (z. B. Baugrubensicherung, Wasserhaltung) bilden die Grundlage für die Ableitung von Lastannahmen und die Nutzung von Erfahrungen, die unter vergleichbaren Bedingungen gewonnen worden sind. Aus geotechnischer Sicht gehört die Auswertung der vorhandenen Informationen und die Besichtigung der örtlichen Gegebenheiten zu dieser Leistungsphase.

2 Vorplanung: Ziel der Vorplanung ist die Erarbeitung von Lösungsvarianten und deren Beurteilung. Dabei sind die Einflüsse auf die bauliche und konstruktive Gestaltung ebenso zu beachten wie die Wirtschaftlichkeit und die Umweltverträglichkeit. Es sind konstruktive Lösungen für geotechnische Teile des Bauvorhabens zu betrachten, z. B. Gründungen, Baugruben, Geländesicherungen. Voraussetzung dafür sind Kenntnisse und Erfahrungen mit den unterschiedlichen Bauweisen. Bei der Variantenuntersuchung müssen auch die Auswirkungen während baulicher Zwischenzustände berücksichtigt werden. Dies betrifft z. B. die Zwischenlagerung von Aushubmassen, den Wiedereinbau, den Platz- und Medienbedarf für die Baustelleneinrichtung bei speziellen Bauverfahren oder die Auswirkung von Erschütterungen auf bestehende Bauwerke durch die Bautätigkeit.

3 Entwurfsplanung: Die bauliche Lösung wird konstruktiv geplant und eine zeichnerische Darstellung entwickelt, die die wesentlichen Abmessungen und Informationen zur technischen Umsetzung enthält. Faustformeln und Erfahrungswerte können für die Festlegung konstruktiver Lösungen und die Kontrolle der Berechnungsergebnisse sehr hilfreich sein. Ziel ist die überschlägige Bemessung des Tragwerks.

4 Genehmigungsplanung: Eine zentrale Rolle kommt der Aufstellung prüffähiger statischer Berechnungen für das Tragwerk und die Hilfskonstruktionen zu. Teil der Tragwerksplanung sind die Gründungen sowie die geotechnischen Tragwerke wie Baugruben, Dämme, Ein-

schnittböschungen usw.. Für die öffentlich-rechtlichen Verfahren und Genehmigungen sind die erforderlichen Unterlagen und Pläne zu erstellen. Geotechnische Aufgaben können sich in diesem Zusammenhang beispielsweise in Bezug auf die Planung einer Wasserhaltung bzw. Versickerung, der Nutzung der Geothermie, der Verankerung von Baugrubenwänden im Bereich angrenzender Grundstücke oder dem geplanten Einpressen von Substanzen in den Untergrund ergeben.

5 Ausführungsplanung: Die Ergebnisse der einzelnen Fachplaner werden im Rahmen der Ausführungsplanung zusammengeführt. Dies betrifft auch die Vorgaben der Geotechnik für die Bauausführung. Dazu zählen die Festlegungen zur erforderlichen Verdichtung, die Auswahl der Böden, der Sicherungsverfahren für Baugruben und Gräben usw..

6 Vorbereitung der Vergabe: Als Voraussetzung für die Einholung von Angeboten sind die Leistungen und Mengen zu ermitteln und als Einzelpositionen in Leistungsverzeichnissen zu beschreiben. Teil dieser Leistungsbeschreibungen sind auch die Vorgaben für den Erd- und Grundbau oder den Spezialtiefbau. Die Beschreibung der Verfahren und der eingesetzten Stoffe gehört zum Fachgebiet Geotechnik.

7 Mitwirkung bei der Vergabe: Die Angebote müssen geprüft und bewertet werden. Neben der Wirtschaftlichkeit sind hier auch konstruktive bautechnische Aspekte von Bedeutung. Zu den Aufgaben des Fachgebiets Geotechnik gehört die Beurteilung der Bauprodukte oder Verfahren in Hinblick auf ihre Eignung für die speziellen Randbedingungen, die Beratung der Objekt- und Tragwerksplaner bei der Bewertung besonderer Leistungen, vor allem des Spezial- und Tiefbaus.

8 Bauoberleitung: Während der Errichtung des Bauwerks und der Durchführung der Bauhilfsmaßnahmen sind die Einzelheiten und Probleme im Rahmen von Ortsterminen und Beratungen zu klären. Für Bauleistungen des Erd- und Grundbaus ist häufig die Eigen- und Fremdüberwachung als Teil der Ingenieurleistungen erforderlich.

9 Objektbetreuung, Dokumentation: Die Überwachung und Beseitigung von Mängeln sowie die Zusammenstellung der zeichnerischen Darstellungen und rechnerischen Nachweise gehören zu den Ingenieurleistungen dieser Leistungsphase. Probleme im Zusammenhang mit Ausführungsmängeln von Konstruktionen des Erd- und Grundbaus können auch langfristig Auswirkungen auf die neu errichteten oder bereits bestehenden Bauwerke haben. Um derartige Ursachen richtig erkennen und die geeigneten Gegenmaßnahmen einleiten zu können, ist die Erfassung und Dokumentation der maßgebenden Einflussgrößen eine grundlegende Voraussetzung. Es sind außerdem vertiefte Kenntnisse über die Verfahren des Spezialtiefbaus und die geotechnischen Zusammenhänge bei der Beurteilung von Schäden erforderlich.

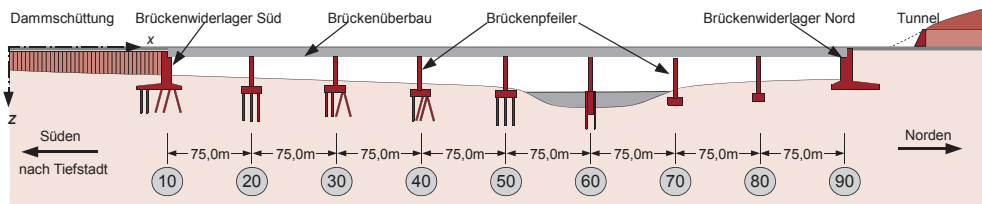


Bild 1.2 Beispiel Bahntrasse Damm-Brücke-Tunnel, Bauwerke und Stationierung

Als Grundlage für die Übungsbeispiele dienen zwei fiktive Bauvorhaben, die bereits im Buch „Einführung in die Boden- und Felsmechanik“ [55] behandelt worden sind. Zwei Verkehrsstras-

Tabelle 1.2 Entwurf Bahnbrücke, Kräfte aus Eigen- und Verkehrslasten

Achse	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Gewicht Überbau $V_{z1,G}$ in MN	14,00	40,11	34,51	34,51	34,51	34,51	34,51	40,11	14,00
Gewicht Unterbau $V_{z2,G}$ in MN		0,65	1,00	1,17	1,43	1,70	1,87	1,70	
LM 71 $V_{z,Q}$ in MN	3,52	9,18	7,97	7,97	7,97	7,97	7,97	9,18	3,52
Bremsen/Anfahren $H_{x,Q}$ in MN					1,5	1,5			
Bremsen/Anfahren $M_{y,Q}$ in MNm					18,60	20,85			
Wind aus Überbau $H_{y1,Q}$ in kN	521	1494	1285	1285	1285	1285	1285	1494	521
Wind aus Überbau $M_{x1,Q}$ in MNm		9,63	10,86	12,14	14,07	16,00	17,28	18,60	
Wind aus Unterbau $H_{y2,Q}$ in kN		9,6	16,0	19,2	24,0	28,8	32,0	28,8	
Wind aus Unterbau $M_{x2,Q}$ in kNm		14,4	40,0	57,6	90	129,6	160	129,6	
Schiffsanprall in MN						6,50			

sen (siehe *Bild 1.2* und *Bild 1.3*) sollen als Kombination von Damm-, Brücken- und Tunnelbauwerken errichtet werden. Der Untergrund im Bereich des ca. 600 m langen Trassenabschnitts wird im Süden überwiegend von weichen Ablagerungen gebildet. Das Grundwasser ist hier in geringem Abstand zur Geländeoberfläche zu erwarten. Im Norden werden die Baugrundeigenschaften vor allem von den nichtbindigen Sand- und Kiesablagerungen und dem Festgestein geprägt. Die Komplexität der Bauaufgabe und die Gelände- und Untergrundsituation erfordern die Anwendung unterschiedlicher konstruktiver Lösungen. Während im Süden für die Gründung der Einsatz von Pfählen oder tief reichenden Bodenverbesserungen erforderlich sein wird, kann für die im Norden befindlichen Bauwerke eine Flachgründung in Frage kommen. Das Ziel der Erarbeitung des komplexen Übungsbeispiels war es, die unterschiedlichen Aufgabenstellungen und Bauweisen bei der Bearbeitung der geotechnischen Teile einer Ingenieuraufgabe zusammenhängend betrachten zu können. Die in den *Tabellen 1.2* und *1.3* zusammengestellten Lasten sind auf Grundlage eines Vorentwurfs ermittelt worden.

Damm: Dämme sind Bauwerke, bei denen der Boden als Baumaterial eingesetzt wird und in Abhängigkeit von der Funktion des Bauwerks bestimmte Anforderungen an die Eigenschaften erfüllen muss. Bei Straßen- oder Eisenbahndämmen betrifft dies in erster Linie die Tragfähigkeit und das Verformungsverhalten in vertikaler Richtung. Für das Dammbauwerk ist die Gründung nach den gleichen Regeln zu planen wie für Hoch- und Ingenieurbauwerke. Es ist der Einsatz einer Flachgründung unmittelbar unter der Dammaufstandsfläche, eine Bodenverbesserung unter dem Damm oder eine Tiefgründung möglich. Zu den Bauweisen, die zum Einsatz kommen können, gehören u. a. geokunststoffbewehrte Stützbauwerke, Rütteldruck- oder Rüttelstopfsäulen, geokunststoffbewehrte Erdkörper über punktförmigen Traggliedern, Vorbelastung des Untergrunds oder geokunststoffummantelte Säulen.

Brückenwiderlager: Im Bereich des Übergangs zwischen Damm und Brücke wird ein Widerlager angeordnet. Dies besteht aus einer Stützwand, die die Belastungen aus dem Erddruck und der Brücke aufnehmen und über die Gründung in den Untergrund ableiten muss. Die Gründung kann bei tragfähigem Baugrund als Flachgründung erfolgen. Wenn die Tragfähigkeit des Untergrunds für eine Flachgründung nicht ausreicht, kommen z. B. Pfahlgründungen oder Verfahren zur Baugrundverbesserung in Betracht. Für die Errichtung sind möglicherweise Maßnahmen zur Herstellung der Baugrube und zur Wasserhaltung einzuplanen.

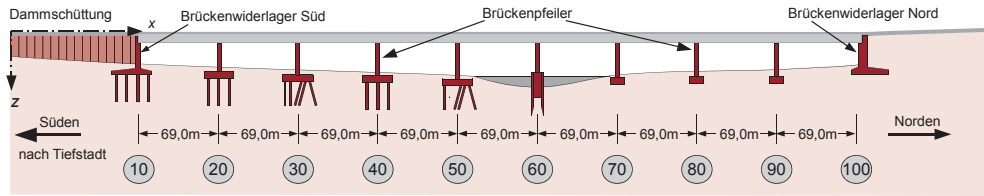


Bild 1.3 Beispiel Straßentrasse Damm-Brücke, Bauwerke und Stationierung

Tabelle 1.3 Entwurf Straßenbrücke, Kräfte aus Eigen- und Verkehrslasten

Achse	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Überbau $V_{z1,G}$ [MN]	8,92	25,55	21,99	21,99	21,99	21,99	21,99	21,99	25,55	8,92
Unterbau $V_{z2,G}$ [MN]		1,45	1,59	1,69	1,89	1,89	2,09	1,89	1,69	
LM 1 $V_{z,Q}$ [MN]	2,35	5,25	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	5,25	2,35
Bremsen $H_{x,Q}$ [kN]						474,3	474,3			
Bremsen $M_{y,Q}$ [MNm]						6,59	6,59			
Wind Überbau $H_{y1,Q}$ [kN]	376	1078	928	928	928	928	928	928	1078	376
Wind Überb. $M_{x1,Q}$ [MNm]		11,05	10,16	10,62	11,55	11,55	12,47	11,55	12,34	
Wind Unterbau $H_{y2,Q}$ [kN]		21,8	24,0	25,6	28,8	28,8	32,0	28,8	25,6	
Wind Unterb. $M_{x2,Q}$ [kNm]		74,0	90,0	102,4	129,6	129,6	160,0	129,6	102,4	
Schiffsanprall [MN]						6,50				

Brückenpfeiler: Im ufernahen Bereich ist für die Errichtung der Pfeilerfundamente die Herstellung von Baugruben bis unterhalb des Grundwasserspiegels erforderlich. Für die Pfeiler im Bereich des Flussbetts muss dagegen eine Baugrube im offenen Wasser hergestellt werden. Dafür können z. B. Spundwände oder unterschiedliche Arten von Fangedämmen zum Einsatz kommen.

Einschnitte: Der Übergang zwischen Brücke und Tunnel im Norden macht in einigen Bereichen die Herstellung und Sicherung von Einschnitten erforderlich. Diese können als Böschungen oder als Kombination von Böschung und Stützbauwerk geplant werden. Vernagelungen oder Stützkonstruktionen in Kombination mit Böschungen sind geeignete Verfahren.

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

Sicherheitsnachweise im Grundbau

Teil der Planung von Bauvorhaben sind rechnerische Nachweise. Grundlage für diese Berechnungen sind die Vorgaben aus der Nutzung des Bauwerks, die Abmessungen des einzelnen Bauwerksteils sowie die Kennwerte zur Beschreibung der Materialeigenschaften. Boden und Fels sind in diesem Zusammenhang ebenfalls als Baumaterialien aufzufassen. Bei Dammbauwerken oder als Hinterfüllung sind sie Baumaterialien, als geologisch entstandene Ablagerungen Baugrund. Die Verfahren zur Ermittlung der Kennwerte werden in der Boden- und Felsmechanik behandelt [55].

■ 2.1 Einführung

2.1.1 Grundlagen der Berechnungen

Bei der rechnerischen Untersuchung von Konstruktionen des Erd- und Grundbaus sind Kräfte, Momente, Spannungen und Verformungen zahlenmäßig zu beschreiben. Da es sich hierbei um vektorielle Größen handelt, muss die positive Orientierung und die Bezeichnung der Richtungen vereinbart werden (siehe *Bild 2.1*).

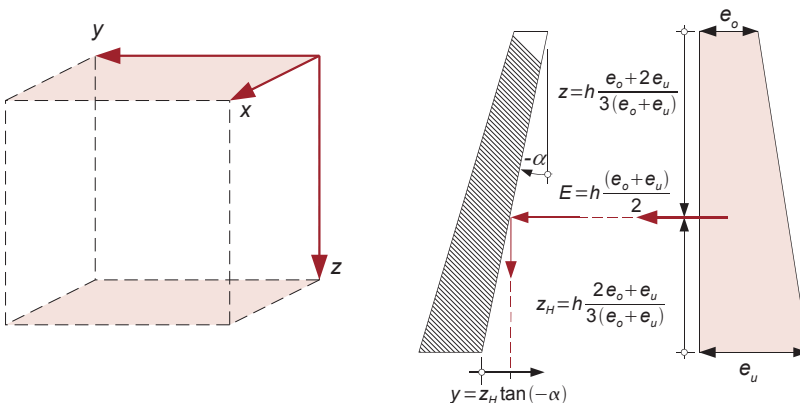


Bild 2.1 Koordinatensystem (links), Bezeichnungen und Rechenregeln für die Ermittlung der Erddruckkraft bei trapezförmiger Druckverteilung (rechts)

Die Festlegung des Koordinatensystems ist auch im Erd- und Grundbau eine Voraussetzung für die rechnerische Behandlung von Tragwerksproblemen. Es werden wie in anderen Berei-

chen der Bautechnik die Grundlagen und Vereinbarungen der technischen Mechanik angewendet (siehe dazu z. B. [46]). Man benutzt ein rechtsdrehendes, rechtwinkliges Koordinatensystem. Für die Achsenbezeichnung und die Bezeichnung der unterschiedlichen Größen sind Regeln nützlich, die die Lesbarkeit einer Berechnung vereinfachen. Ziel der hier zusammengestellten Festlegungen ist es, den Schreibaufwand bei den rechnerischen Nachweisen unter Beibehaltung eines hohen Maßes an Verständlichkeit zu reduzieren und die grundlegenden Vereinbarungen der Statik zu berücksichtigen.

Koordinatensystem: Es wird hier ein Koordinatensystem gemäß *Bild 2.1* mit den Achsenbezeichnungen x, y und z benutzt, wobei die z -Achse nach unten gerichtet ist. Die Lage des Ursprungs ist der jeweiligen Aufgabenstellung anzupassen.

Vorzeichenregeln: Im Gegensatz zur in der Mechanik üblichen Konvention sind Druckkräfte, Druckspannungen und Verkürzungen hier positiv definiert.

Bezeichner: Beanspruchungen werden hier durch die auf den betrachteten Schnitt bezogene Richtung gekennzeichnet. Neben den im Eurocode genutzten Bezeichnern (V für normal bzw. senkrecht gerichtete Größen, H für tangential bzw. horizontal gerichtete Größen) werden hier auch die Bezeichner N (normal) und T (tangential) verwendet. Normalspannungen werden mit dem Symbol σ und Tangentialspannungen mit τ bezeichnet.

Fußzeiger: Die Fußzeiger werden für unterschiedliche Zwecke genutzt. Bei Widerständen werden die gleichen Buchstaben zur Kennzeichnung der Richtung als Fußzeiger benutzt, die bei Beanspruchungen als Formelzeichen die Richtung angeben (z. B. Beanspruchung tangential H , Widerstand tangential R_H). Für charakteristischen Werte steht der Fußzeiger k und für Bemessungswerte d .

2.1.2 Sicherheitskonzepte

Die zahlenmäßige Erfassung der Sicherheit erfordert den Vergleich mit Referenzzuständen. Dafür werden die Zustände herangezogen, bei denen das Tragwerk gerade versagt oder die vorgesehene Funktion nicht mehr uneingeschränkt erfüllen kann. Grundlage sind Beobachtungen von Schadensereignissen an Bauwerken. Typische Phänomene werden experimentell und theoretisch untersucht, um daraus Verfahren zur Vorhersage dieser Zustände abzuleiten. Diese Verfahren können mathematische Berechnungsmodelle oder Methoden der experimentellen Untersuchung (Probebelastungen) oder eine Mischung aus beiden Vorgehensweisen sein.

Bei Bauwerken, die mit Einzel- oder Streifenfundamenten gegründet sind, z. B. Stützmauern (siehe *Bild 2.2*), Silos oder Türmen, muss die Gründung die Lasten in senkrechter und horizontaler Richtung sowie die Momentenbelastung sicher aufgenommen werden. Die entsprechenden Versagensszenarien sind:

Grundbruch: Beanspruchung vertikal (normal) – Vertikalkraft V (N)

Gleiten: Beanspruchung horizontal (tangential) – Horizontalkraft H (T)

Kippen: Verdrehung – Moment M

Geländebruch: Bauwerk und umgebender Boden versagen als Ganzes

Für andere Bauweisen sind entsprechend andere Szenarien maßgebend.

Es lässt sich damit vorhersagen, unter welchen Bedingungen ein Tragwerk versagt. Die Sicherheit wird schließlich durch Begrenzung der wirklichen Einwirkungen erreicht. Konzepte für

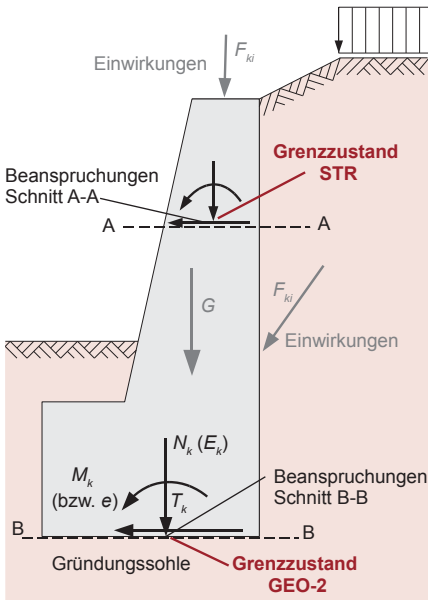


Bild 2.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit, Beispiel Stützmauer

zahlenmäßige Vorgaben werden seit vielen Jahrzehnten entwickelt. Einfache Methoden basieren auf der Ermittlung der für das Versagen erforderlichen Beanspruchungen bzw. zugehörigen Abmessungen der Bauteile und die Begrenzung der zulässigen Einwirkungen durch Division der Grenzwerte mit einem summarischen Sicherheitsfaktor η bzw. einen Zuschlag auf die erforderlichen Querschnittsabmessungen.

Mit der Weiterentwicklung der Nachweisverfahren entstand das Bedürfnis, unterschiedliche Einflüsse zahlenmäßiger besser zu erfassen. Unsicherheiten infolge streuender Materialeigenschaften, unbekannter Fehler bei deren experimenteller Ermittlung, örtlicher und zeitlicher Veränderungen des Baugrunds, fehlerhafter Bauausführung sowie Fehler bei der Bildung des Berechnungsmodells, sollen durch Sicherheitszu- oder -abschläge bei den Berechnungen berücksichtigt werden. Die entsprechenden Konzepte sollen in sich geschlossen, einfach anwendbar und physikalisch sinnvoll sein. Das aktuelle Sicherheitskonzept nutzt Teilsicherheitsbeiwerte γ , um diese Einflüsse zu erfassen.

Es werden zwei Grenzzustände unterschieden. Nachweise, mit denen das Versagen eines Bauwerks oder Bauteils ausgeschlossen wird, gehören zum **Grenzzustand der Tragfähigkeit** (ULS - ultimate limit state). Es wird eine Gefährdung für Menschen und Umwelt damit ausgeschlossen. Zum Nachweis dieses Grenzzustands werden die Kräfte, Momente oder Spannungen mit günstig wirkenden Größen bzw. Widerständen verglichen. Diese Vergleiche müssen für alle Schnitte erfüllt sein. Zum rechnerischen Nachweis der Sicherheit werden die charakteristischen Einwirkungen durch Multiplikation mit Teilsicherheitsbeiwerten in Bemessungswerte umgewandelt und die charakteristischen Widerstände durch Division mit Teilsicherheitsbeiwerten abgemindert. Verformungen und Verschiebungen werden beim Grenzzustand der Tragfähigkeit nicht untersucht.

Es sind die Gleichgewichtsbedingungen zu beachten, d. h. die Summe der ungünstigen Einwirkungen in **vertikaler** und **horizontaler** Richtung sowie die Summe der Momente müssen durch Widerstände des Bauteils oder des Baugrunds bzw. günstige Einwirkungen aufgenom-

men werden. Der Grundsatz der Nachweise besteht dementsprechend aus dem Vergleich von Kräften oder Spannungen **normal** und **tangential** und der Bewertung der **Momente**.

Beim Nachweis des Grenzzustands der Tragfähigkeit wird nur geprüft, ob die planmäßige Beanspruchung zum Versagen des Bauteils oder Bauwerks führen kann. Unabhängig davon reagiert jedes Material auf die Änderung der Beanspruchung mit Verformungen. Diese Verformungen des Bauwerks dürfen die Gebrauchstauglichkeit nicht beeinträchtigen. Es muss deshalb nachgewiesen werden, dass die für die Nutzung maßgebenden Werte nicht überschritten werden. Dafür ist eine zweite Gruppe von Nachweisen zu führen, mit denen sichergestellt wird, dass die vorgesehene Nutzung garantiert werden kann. Diese Nachweise erfassen den **Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit** (SLS - serviceability limit state). Es sind ebenso wie bei der Tragfähigkeit die drei Komponenten horizontal, vertikal und rotierend zu betrachten.

Bei statisch bestimmten Tragwerken sind Setzungen und Setzungsunterschiede i. Allg. unbedenklich bezüglich der Standsicherheit. Der Gebrauchskomfort kann dagegen erheblich eingeschränkt werden (siehe *Bild 2.3 (a)*). Demgegenüber führen Setzungsunterschiede bei statisch unbestimmten Bauwerken zu Zwangsbeanspruchungen des Tragwerks. Durch die Setzung eines Brückenpfeilers kann bei Durchlaufträgern zu Biegebeanspruchungen an der Unterseite führen, für die das Tragwerk nicht ausgelegt ist (siehe *Bild 2.3 (b)*).

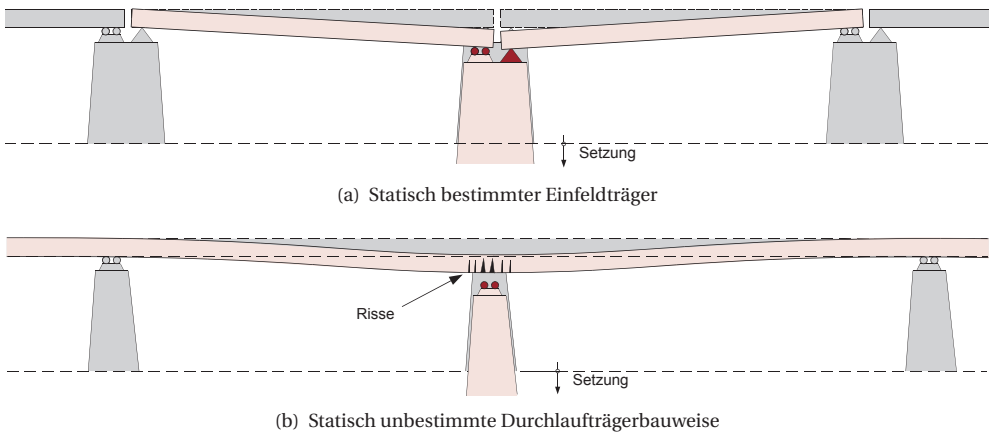


Bild 2.3 Auswirkungen von Setzungsunterschieden bei unterschiedlichen statischen Systemen

■ 2.2 Standsicherheit nach DIN EN 1997-1

2.2.1 Grundlagen

Für das gesamte Bauwesen werden die Grundlagen der Tragwerksplanung im Eurocode DIN EN 1990 [24] einheitlich geregelt. Dies betrifft u. a. die Definition und Bezeichnung der Grenzzustände, die Festlegung der Bemessungssituationen und die Regeln für die Berechnung der Beanspruchungen und Widerstände. Der Inhalt der DIN EN 1990 wird in vielen Fachbüchern als Teil der Tragwerksplanung bzw. im Rahmen der Grundlagen der Statik (einschließ-

lich der Lastannahmen) behandelt. Man findet in diesen Kapiteln die Grundlagen in knapper Form, die Berechnungsregeln und die Zahlenwerte für Teilsicherheiten und Kombinationsbeiwerte. Die durch den Eurocode erreichte Vereinheitlichung der Begriffe und Definitionen ist im Bereich der Geotechnik mit der Einführung neuer Bezeichnungen und Grundsätze verbunden. Das Grundkonzept der Nachweisführung mit Teilsicherheitsbeiwerten bleibt erhalten und entspricht weitestgehend der Vorgehensweise der bisher gültigen DIN 1054 (2005) [4].

Im Eurocode EC-7, Teil 1, werden die grundsätzlichen Regelungen der DIN EN 1990 auf die Bemessung in der Geotechnik angewendet. Neben der europäischen Norm DIN EN 1997-1 [25] sind für den Entwurf und die Bemessung in der Geotechnik weitere nationale Dokumente zu beachten, die gemeinsam mit dem EC-7 zu einem Normenhandbuch [54] zusammengefasst worden sind.

Bemessungssituationen: Bisher war es üblich, die Dauer und Häufigkeit des Auftretens von bestimmten Einwirkungen durch Lastfälle zu charakterisieren. Ständige Lasten und regelmäßig auftretende Verkehrslasten sind beispielsweise im Lastfall 1 zusammengefasst worden. Die Sicherheitsbeiwerte für diesen Lastfall waren am größten. Sehr seltene Einwirkungen wurden dagegen dem Lastfall 3 zugeordnet, bei dem deutlich kleinere Sicherheitsbeiwerte anzusetzen waren. Anstelle dieser Lastfälle treten jetzt **Bemessungssituationen**, mit denen typische Einwirkungskombinationen zusammengefasst werden. In Deutschland werden bei geotechnischen Aufgabenstellungen die ständigen und vorübergehenden Bemessungssituationen getrennt behandelt.

BS-P: Bemessungssituation für ständige (persistent situations) Einwirkungen (früher Lastfall 1). Es werden die Beanspruchungen aus den üblichen Nutzungen erfasst und in ständige und regelmäßig auftretende veränderliche Einwirkungen unterschieden.

BS-T: Bemessungssituation für vorübergehende Einwirkungen (transient situations). Dies betrifft zeitlich begrenzte Zustände (z. B. Bauzustände bei Herstellung oder Umbau von Bauwerken, Baugruben) oder seltene Einwirkungen (z. B. ungewöhnlich groß, planmäßig einmalig, möglicherweise nie) die zusätzlich zu den in BS-P erfassten Einwirkungen auftreten.

BS-A: Bemessungssituation für außergewöhnliche Einwirkungen (accidental situations) (z. B. Feuer, Brand, Explosion, Anprall, extremes Hochwasser, Ankerausfall).

BS-E: Bemessungssituation für Erdbeben (earthquake).

Grenzzustände: Wie oben beschrieben werden grundsätzlich die zwei Grenzzustände ULS und SLS unterschieden. Die Grenzzustände sind einheitlich für das gesamte Bauwesen in [24] definiert. Im EC-7 bzw. der DIN EN 1997-1 [25] sind diese Festlegungen übernommen worden. Durch die Nachweise des Grenzzustands der Tragfähigkeit werden unterschiedliche Versagensszenarien nachgebildet. Dadurch ist es nicht möglich, Einwirkungen und Widerstände einheitlich zu behandeln. Das Eigengewicht des Bodens kann als Belastung auf ein Bauteil eine Einwirkung darstellen, die rechnerisch durch einen Teilsicherheitsbeiwert etwas zu vergrößern ist, kann aber auch als stützender Erddruck als Widerstand auftreten, der dann mit Teilsicherheiten abzumindern ist.

ULS: Grenzzustand der Tragfähigkeit (Ultimate Limit State),

SLS: Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (Serviceability Limit State).

Beim Nachweis der Lagesicherheit unterscheidet man in stabilisierende und destabilisierende Einwirkungen (siehe *Bild 2.4*). Um diesem unterschiedlichen Tragverhalten bei den rechnerischen Nachweisen Rechnung tragen zu können, werden die verschiedenen Versagensszena-

rien speziellen Untergruppen des Grenzzustands der Tragfähigkeit zugeordnet. Für jede Untergruppe ist der rechnerische Nachweis und der Ansatz der Teilsicherheitsbeiwerte gesondert geregelt. Auf Grundlage dieser Definitionen wird z. B. der Kippsicherheitsnachweis dem Grenzzustand EQU (Gleichgewichtsverlust) zugeordnet.

EQU: (equilibrium) Gleichgewichtsverlust des als Starrkörper angenommenen Tragwerks oder des Baugrunds, **Festigkeiten** des Baugrunds oder der Baustoffe sind **nicht entscheidend**. Es wird damit Kippen und Abheben erfasst.

STR: (structural) Versagen oder sehr große Verformungen des Tragwerks, einschließlich Fundamente, Pfähle, usw., **Festigkeit der Baustoffe** ist für den Widerstand **entscheidend**. Ermittlung der Schnittgrößen und Nachweis der inneren Abmessungen.

GEO-2: Versagen oder sehr große Verformung des Baugrunds, wobei die Festigkeit der Locker- und Festgesteine für den Widerstand entscheidend ist. Nachweis der äußeren, bodenmechanisch bedingten Abmessungen.

GEO-3: Versagen oder sehr große Verformung des Baugrunds, wobei die Festigkeit der Locker- und Festgesteine für den Widerstand entscheidend ist. Nachweis der Gesamtstandsicherheit.

UPL: (uplift) Gleichgewichtsverlust von Bauwerk oder Baugrund infolge von Wasserdruck oder anderer Vertikalkräfte. Aufschwimmen.

HYD: (hydraulic) Versagen durch Strömungsgradienten, hydraulischer Grundbruch, innere Erosion, Piping.

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit: Auch beim Nachweis des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit SLS sind die drei Wirkungsrichtungen der Beanspruchungen zu untersuchen. Im Gegensatz zum Grenzzustand der Tragfähigkeit ist beim Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nachzuweisen, dass die Verformungen vertikal und horizontal und die Verdrehungen keine Werte übersteigen, die die Nutzung des Bauwerks beeinträchtigen. Da zwischen Verschiebung und Kraft in einer Richtung ein Zusammenhang besteht, kann für einfache Fälle der Nachweis auch auf eine Begrenzung der Kraft bzw. des Moments in der jeweiligen Richtung zurückgeführt werden.

2.2.2 Nachweisführung

Der Nachweis der Grenzzustände darf mit folgenden Methoden geführt werden:

- rechnerische Nachweise,
- Anwendung konstruktiver Maßnahmen, Entwurf und Bemessung aufgrund anerkannter Tabellenwerte,
- Modellversuche und Probelastungen,
- Beobachtungsmethode.

Für rechnerische Nachweise sieht der EC7-1 drei mögliche Verfahren vor:

Verfahren 1: Untersuchung von zwei Kombinationen von Teilsicherheitsbeiwerten. Dieses Verfahren ist in Deutschland ausgeschlossen.

Verfahren 2: Beanspruchungen werden mit Teilsicherheitsbeiwerten vergrößert, Widerstände mit Teilsicherheitsbeiwert abgemindert. In der Geotechnik wird die gesamte Berechnung mit

charakteristischen Werten durchgeführt, Teilsicherheitsbeiwerte werden am Ende zur Umrechnung der charakteristischen Schnittgrößen in Bemessungsschnittgrößen angewendet. Diese Vorgehensweise wird für die Grenzzustände STR und GEO-2 benutzt (früher GZ 1B).

Verfahren 3: Bei den rechnerischen Nachweisen werden die Scherparameter mit Teilsicherheitsbeiwerten abgemindert und nur die veränderlichen Einwirkungen werden mit Teilsicherheiten erhöht (GEO-3).

Die beiden in Deutschland zulässigen Verfahren werden den unterschiedlichen Grenzzuständen wie folgt zugeordnet:

- **UPL und HYD:** Gegenüberstellung der **Bemessungswerte** von günstigen und ungünstigen Einwirkungen.
- **STR und GEO-2:** Vergleich von **Bemessungswerten** der Beanspruchungen $E_{d,i}$ und der Widerstände $R_{d,i}$. Die Bemessungswerte ergeben sich aus den charakteristischen Werten durch Multiplikation bzw. Division mit Teilsicherheitsbeiwerten (Nachweisverfahren 2).
- **GEO-3:** Vergleich von **Bemessungswerten** der Beanspruchungen $E_{d,i}$ und der Widerstände $R_{d,i}$. Die Bemessungswerte der Widerstände werden mit Bemessungswerten der Scherfestigkeit berechnet (Nachweisverfahren 3).

2.2.3 Einwirkungen und Beanspruchungen

Die Bemessungswerte der Beanspruchungen E_d sind in den maßgebenden Schnitten durch das Bauwerk und den Baugrund sowie in den Berührungsflächen zwischen Bauwerk und Baugrund zu ermitteln. Es wird im Regelfall die Gültigkeit des Superpositionsprinzips vorausgesetzt. Die Einwirkungen werden als charakteristische bzw. repräsentative Werte F_k bzw. F_{rep} in die Berechnung eingeführt. Erst bei der Aufstellung der Grenzzustandsbedingung sind die mit diesen Werten ermittelten charakteristischen bzw. repräsentativen Größen in Form von Schnittkräften mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_F und ggf. mit den Kombinationsbeiwerten ψ für Einwirkungen bzw. Beanspruchungen in Bemessungswerte E_d der Beanspruchungen umzurechnen. In DIN EN 1990 sind die Zusammenhänge für die Berechnung der Beanspruchungen allgemein gültig angegeben. Es wird damit die Vereinheitlichung der Nachweise im gesamten Bauingenieurwesen angestrebt. Die speziellen Erfordernisse der Geotechnik werden durch Konkretisierungen berücksichtigt.

Einwirkungen: Der Träger in *Bild 2.4* ist im Auflager B gelenkig gelagert und wird durch die Linienlast p_1 am Abheben gehindert. Für den Nachweis der Lagesicherheit ist p_1 als stabilisierende Einwirkung zu berücksichtigen und deshalb mit einem Teilsicherheitsbeiwert abzumindern. Zur Berechnung der Schnittkräfte des Trägers im Bereich zwischen den Auflagern A und B (siehe *Bild 2.5*) wird dagegen die Last p_1 eine Einwirkung, die beim rechnerischen Nachweis mit einem Teilsicherheitsbeiwert vergrößert wird. Bei den rechnerischen Nachweisen sind zunächst alle Einwirkungen zusammenzustellen und als Voraussetzung für die Ermittlung der maßgebenden Beanspruchung je nach untersuchtem Versagensablauf zu bewerten und miteinander zu kombinieren.

Charakteristische Einwirkungen F_k sind z. B. Eigengewicht, Erddruck, Wasserdruck, Gründungslasten oder Lasten aus der Nutzung (in *Bild 2.5* p_1, p_2, F_2). Der repräsentative Wert einer Einwirkung F_{rep} ergibt sich aus dem charakteristischen Wert F_k durch Multiplikation mit 1,0