

Hans-Jürgen Lang · Jachen Huder · Peter Amann · Alexander M. Puzrin

---

## Bodenmechanik und Grundbau

Hans-Jürgen Lang · Jachen Huder†  
Peter Amann · Alexander M. Puzrin

# Bodenmechanik und Grundbau

Das Verhalten von Böden und Fels  
und die wichtigsten grundbaulichen  
Konzepte

9., bearbeitete Auflage

 Springer

Prof. Hans-Jürgen Lang  
Weidstr. 20  
8103 Unterengstringen  
Switzerland

Prof. Dr.-Ing. Peter Amann  
Ernst-Pasque-Strasse 27  
64665 Alsbach-Hähnlein  
Germany  
prof.amann@t-online.de

Prof. Dr. Jachen Huder†

Prof. Dr. Alexander M. Puzrin  
ETH Zürich  
Institut für Geotechnik  
Wolfgang-Pauli-Strasse 15  
8093 Zürich  
Switzerland  
alexander.puzrin@igt.baug.ethz.ch

ISBN 978-3-642-14686-2

e-ISBN 978-3-642-14687-9

DOI 10.1007/978-3-642-14687-9

Springer Heidelberg Dordrecht London New York

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1982, 1984, 1985, 1990, 1994, 1996, 2003, 2011

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes. 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.

*Einbandentwurf:* WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media  
([www.springer.de](http://www.springer.de))

# Vorwort zur neunten Auflage

Die vorliegende 9. Auflage unterscheidet sich gegenüber der 8. Auflage vor allem durch die Beseitigung von Fehlern und kleinere Abänderungen im Kapitel 12 bei der Pfahlfundation. Ausserdem wurden die Beispiele im Abschnitt 14.5 überarbeitet und neu gestaltet. Den Autoren ist es zudem ein Anliegen, den im Dezember 2008 verstorbenen Mitautor **Jachen Huder**, geboren am 16. 8.1922, Dr. sc. techn. und seit 1971 a.o. Professor, seit 1977 o. Professor, für Grundbau und Bodenmechanik an der ETH Zürich zu würdigen. Jachen Huder stammte aus dem Unterengadin und seine Muttersprache war Rätoromanisch.

Als junger Armee-Angehöriger erlitt er einen schweren Unfall, der den Verlust seiner rechten Hand und andere gravierende Schäden zur Folge hatte. Trotz dieser Behinderungen (die ihn bis ins Alter beeinträchtigten) absolvierte er an der ETH Zürich das Studium des Bauingenieurwesens, das er 1949 mit dem Diplom abschloss. Anschliessend war er als Privat-Assistent bei Prof. E. Meyer-Peter, dem damaligen Direktor der Versuchsanstalt für Wasser- und Erdbau an der ETH (VAWE) tätig, ab 1952 als wiss. Mitarbeiter der VAWE. Von 1954 bis 1956 weilte er am Norwegian Geotechnical Institute, von wo er als Mitarbeiter von Laurit Bjerrum entscheidende Impulse über die 'moderne' Bodenmechanik mit an die VAWE brachte. Im Jahre 1963 promovierte er mit einer Arbeit über die Scherfestigkeit strukturempfindlicher Böden zum Dr. sc. techn. . In Anerkennung seiner Verdienste wurde Jachen Huder 1968 als Titular-Professor der ETH ausgezeichnet.

Das Wirken von Jachen Huder an der ETH Zürich trug in Forschung und Lehre auf dem Gebiet Bodenmechanik / Grundbau massgeblich bei zu dem überraschend grossen Interesse und den Erfolg dieser ab 1968 grundlegend neu konzipierten Studienrichtung bei den Studierenden, aber auch für die Baupraxis, in der Jachen Huder als Berater und Experte grosses Ansehen genoss: Bei allen seinen wissenschaftlichen Interessen verstand sich Jachen Huder nämlich in erster Linie als Ingenieur, der den Weg zu Praxis-tauglichen Einsichten und Methoden wies.

Jachen Huder war ein kritischer Geist und ein unverwechselbarer Charakter mit Ecken und Kanten, der denjenigen, die ihn zu überzeugen vermochten, ein verlässlicher Freund war. Wir werden ihn stets in ehrendem Angedenken halten.

Zürich, im Juli 2010

H.J.Lang · P. Amann · A. Puzrin

# Vorwort zur achten Auflage

Die vorliegende 8. Auflage unterscheidet sich von der 7. Auflage von 2002 neben der Bereinigung von Unstimmigkeiten vor allem durch die Überarbeitung des Kapitels 9 „Stabilitätsprobleme“. Anlass zu dieser Überarbeitung war nicht zuletzt der inzwischen stattgefundene Generationenwechsel in der Autorenschaft. Für die Lösung der Stabilitätsprobleme wurde neu die Behandlung als unterer und oberer Grenzwert nach den Näherungsmethoden der Plastizitätstheorie aufgenommen. Dabei wurde Wert auf die Beibehaltung des Grundkonzepts, nämlich der Beachtung der Genauigkeit des System-Modells und des Rechen-Modells im Hinblick auf die praktische Anwendung im Grundbau gelegt (vgl. Vorwort zur 1. Auflage 1982). Weiter wurden die Gemeinsamkeiten der Stabilitätsprobleme, nämlich die Art des Bruches (Scherbruch), der Bruchmechanismus und die Wirkung des Grundwassers zusammen mit der Unterscheidung von Beanspruchung und Festigkeit stärker hervorgehoben. Mit den eingebrachten Ergänzungen musste die Nummerierung des Kapitels 9 nahezu vollständig geändert werden. Der Inhalt des Buches ist nach Ansicht der Autoren nach wie vor das Grundwissen in Bodenmechanik und Grundbau, das ein universitär diplomierter Ingenieur unabhängig von den Veränderungen der Studienstufen und Bezeichnung der Abschlüsse beherrschen sollte. Das Buch ist in den Prüfungen an der ETH-Zürich als Lösungshilfe zugelassen. In der Oberstufe dient es als Nachschlagwerk und wird durch zusätzliche Umdrucke zu aktuellen Themen und Forschungsergebnissen ergänzt. An dieser Stelle sei all jenen gedankt, die bei der Überarbeitung mitgewirkt haben, insbesondere Herrn Prof. Puzrin für seine Anregungen und Mitarbeit, Herrn Dipl.-Ing. ETH Ivo Sterba und Frau Dr. Sophie Messerklinger für die Überarbeitung der Ergänzungen und Korrekturen. Frau Mengia Amberg und Frau Esther Schilling sei für die Ausführung der Zeichnungen und des Manuskriptes gedankt.

Zürich, im Mai 2006

H.-J. Lang · J. Huder · P. Amann · A. Puzrin

# Vorwort zur siebten Auflage

Die vorliegende 7. Auflage unterscheidet sich von der 6. Auflage von 1996 neben der Bereinigung von Unstimmigkeiten vor allem durch die Aufnahme zusätzlicher Abschnitte zur Wasserhaltung (Kapitel 7.2 und 7.11) und die vollständige Neufassung des Abschnittes 14.5 zu den allgemeinen Randbedingungen des aktiven und passiven Erddruckes. Durch Letzteres konnten die Tabellen I bis K entfallen, weil die Berechnung von Erddruckbeiwerten aus den angegebenen Gleichungen leicht über die handelsüblichen Taschenrechner bewerkstelligt werden kann. Die Sammlung von Anwendungs- und Berechnungsbeispielen wurden dementsprechend ergänzt und ein weiteres zur Stabilität einer Felsböschung hinzugefügt. Die Ergänzungen entstammen der Projekterfahrung der Autoren und wurden für den Abdruck vereinfacht, wobei im Unterricht auf die Gesamtproblematik ausführlich eingegangen wird. Schliesslich wurden aus pädagogischen Gründen diejenigen Textstellen stärker gekennzeichnet, bei denen die im Bauwesen Tätigen von sich aus zwischen totalen und effektiven Spannungen zu unterscheiden wissen. Diese Unterscheidung wird bekanntlich in der Praxis (und teilweise auch im Buch) aus Gründen der Vereinfachung nicht immer konsequent durchgeführt.

Das Buch wird für den Unterricht in der Grundstufe eingesetzt und ist in den Prüfungen an der ETH als Lösungshilfe zugelassen. In der Oberstufe dient es als Nachschlagewerk und wird durch zusätzliche Umdrucke zu aktuellen Themen ergänzt.

An dieser Stelle sei all jenen gedankt, die bei der Überarbeitung mitgewirkt haben, insbesondere Frau Prof. Springman für ihre Anregungen und den Herren Prof. Felix Bucher, Dr. Markus von Moos und Dipl.-Ing. Carlo Scapozza für die Überarbeitung der Ergänzungen und Korrekturen. Frau Mengia Amberg und Frau Monica Dekanovsky sei für die Ausführung der Zeichnungen und des Manuskriptes gedankt.

Zürich, im August 2002

H.-J. Lang · J. Huder · P. Amann

# Vorwort zur sechsten Auflage

Die vorliegende 6. Auflage unterscheidet sich gegenüber der 5. Auflage von 1994 neben der Bereinigung von Unstimmigkeiten hauptsächlich durch die Aufnahme von zwei neuen Kapiteln.

Das neue Kapitel 16 „Boden und Fels“ enthält eine Einführung, die den Studierenden des Bauingenieurwesens an der ETH Zürich im Rahmen der Vorlesung „Grundlagen Bodenmechanik/Grundbau II“ (4. Semester) als Vorbereitung auf die weiterführenden Lehrveranstaltungen über Felsmechanik/Felsbau sowie Grund- und Felsbau gegeben wird. Zweck dieser Vorbereitung ist es vor allem, die engen Bezüge zwischen der Behandlung von Problemen grund- und felsbaulicher Art aufzuzeigen, aber auch die Besonderheiten von Fels gegenüber den Lockergesteinen herauszustellen.

Das neue Kapitel 17 „Beispiele“ soll es den Studierenden des 3. und 4. Semesters erleichtern, die in den Kapiteln 1 bis 14 dargestellten Sachverhalte zu verstehen. Dies soll durch Beispiele erreicht werden, in denen bestimmte Überlegungen (auch zahlenmässig) besprochen werden. Der Sinn besteht vor allem auch darin, dass die Studierenden in nachvollziehbarer Art eigene Überlegungen kontrollieren können. Das Kapitel 17 ersetzt Unterlagen, die bisher separat zu den Lehrveranstaltungen „Grundlagen Bodenmechanik/Grundbau I und II“ abgegeben wurden. Klar ist, dass solche Beispiele bei grundbaulichen Fragen durchaus auch problematisch sein können, weil es im Rahmen eines Lehrbuches weder möglich noch sinnvoll ist, auf alle denkbaren Verzweigungen der behandelten Sachverhalte einzugehen. Die Autoren verweisen deshalb ausdrücklich auf den Abschnitt 17.0 „Einführung“.

Zürich, im Februar 1996

H.-J. Lang · J. Huder · P. Amann

# Vorwort zur ersten Auflage

Das vorliegende Buch entspricht im Wesentlichen, jedoch mit einigen Ergänzungen, den Vorlesungen über Bodenmechanik und Grundbau im Grundstudium der Abteilung für Bauingenieurwesen und teilweise auch derjenigen für Kulturtechnik der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich (ETHZ), wie sie von Lang gehalten werden. Diese Lehrveranstaltungen haben im Laufe der Zeit die üblichen Wandlungen erfahren, bis die hier vorliegende Konzeption eines Grundkurses Bodenmechanik/Grundbau entstanden war. Diese Lehrveranstaltungen sind mit insgesamt 144 Stunden Vorlesungen und Übungen dotiert. Da der Schwerpunkt der Vorlesungen schon im 3. und 4. Semester liegt, sind die voraussetzbaren Grundlagen eingeschränkt, was sich in der Behandlung des Stoffes widerspiegelt. Die Autoren betrachten diesen Grundkurs als diejenige Basisinformation über das Verhalten von Böden und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte, welche an alle Studierenden des Bauingenieurwesens und womöglich auch der Kulturtechnik herangetragen werden sollte. Davon unberührt bleiben selbstverständlich weiterführende Lehrveranstaltungen im Vertiefungsstudium.

Die Begriffe Bodenmechanik und Grundbau sind untrennbar, und es erscheint nicht sinnvoll, eine gegenseitige Abgrenzung suchen zu wollen. Der Grundkurs soll es ermöglichen, den Studierenden an folgende Ziele zu führen:

- die grundsätzlichen Folgen von Eingriffen in den Boden zu erkennen,
- die wichtigsten bodenmechanisch/grundbaulichen Konzepte zu verstehen,
- die Probleme dort zu erkennen, wo sie mit ihrem Schwerpunkt wirklich liegen,
- einfache grundbauliche Probleme selbständig beurteilen zu können, und
- vor allem auch erkennen zu können, wann die eigenen Fähigkeiten dies nicht mehr zulassen.

Das Hauptproblem an grundbaulichen Aufgaben ist häufig die Uneinheitlichkeit und Kompliziertheit der durch die Natur gegebenen Randbedingungen, wie z. B. Aufbau des Bodens und dessen hydrologische Verhältnisse. Diese Schwierigkeit kann nur durch eine vernünftige Vereinfachung zu einem *Modell* überwunden werden; einer der anspruchsvollsten Aspekte grundbaulicher Probleme. „Vernünftig“ im Zusammenhang mit der Modellbildung heisst, dass das Modell einerseits einfach genug ist, um praktikabel zu sein, andererseits aber doch in den wirklich massgebenden Punkten die Natur repräsentiert. Diese Modellbildung kann man nicht aus Büchern in allgemeiner Form lernen; hier hilft nur die Praxis im konkreten Fall weiter. Dennoch setzt dieses Buch in seinen einzelnen Kapiteln oftmals stillschweigend ein vernünftiges Modell voraus.

Zum Entstehen dieses Buches haben Frau Th. Frei und Frau H. Gehri beigetragen. Ihnen sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Zürich, im März 1982

H.-J. Lang · J. Huder



# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                                   |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Grundbegriffe</b>                                                              | <b>1</b>  |
| 1.1      | Einführung .....                                                                  | 1         |
| 1.2      | Die Korngrößenverteilung .....                                                    | 1         |
| 1.3      | Die Kenngrößen des Naturzustandes .....                                           | 3         |
| 1.4      | Weitere, abgeleitete Kenngrößen .....                                             | 3         |
| 1.5      | Die Lagerungsdichte $D$ .....                                                     | 4         |
| 1.6      | Der Durchlässigkeitsbeiwert $k$ .....                                             | 4         |
| 1.7      | Die Plastizitätseigenschaften der Böden .....                                     | 6         |
| 1.8      | Die Liquiditätszahl $I_L$ .....                                                   | 6         |
| 1.9      | Die Aktivitätszahl $I_A$ .....                                                    | 8         |
| 1.10     | Die Struktur der Böden .....                                                      | 8         |
| 1.11     | Klassifikation der Böden .....                                                    | 10        |
| <b>2</b> | <b>Totale und effektive Spannungen</b>                                            | <b>13</b> |
| 2.1      | Einführung .....                                                                  | 13        |
| 2.2      | Spannungen im elastisch-isotropen Halbraum .....                                  | 13        |
| 2.3      | Totale Spannung, Porenwasserdruck<br>und effektive Spannung .....                 | 15        |
| 2.4      | Spannungsänderungen und Porenwasserüberdruck .....                                | 17        |
| 2.5      | Porenwasserdruck im teilweise gesättigten Boden .....                             | 19        |
| 2.6      | Spannungsverhältnisse in unbelasteten<br>und belasteten geschichteten Böden ..... | 20        |
| 2.7      | Der Ruhedruck .....                                                               | 22        |
| 2.8      | Spannungen durch Kapillarkräfte .....                                             | 23        |
| <b>3</b> | <b>Spannungsausbreitung im Boden</b>                                              | <b>25</b> |
| 3.1      | Einführung .....                                                                  | 25        |
| 3.2      | Einfluss einer vertikalen Einzelkraft $P$ .....                                   | 26        |
| 3.3      | Einfluss einer horizontalen Einzelkraft $H$ .....                                 | 28        |
| 3.4      | Einfluss von Linienlasten .....                                                   | 29        |
| 3.5      | Unendlich lange Streifenlasten .....                                              | 29        |
| 3.6      | Allgemeine Flächenlasten .....                                                    | 31        |
| 3.7      | Berechnung mit Hilfstafeln .....                                                  | 33        |
| 3.8      | Berechnung mit Einflusskarten .....                                               | 33        |
| 3.9      | Randbedingungen in der Natur .....                                                | 35        |
| <b>4</b> | <b>Künstliche Verdichtung von Böden</b>                                           | <b>37</b> |
| 4.1      | Einführung .....                                                                  | 37        |
| 4.2      | Die Zustandsdarstellung .....                                                     | 38        |
| 4.3      | Die Proctorkurve .....                                                            | 38        |
| 4.4      | Einfluss der Bodenart .....                                                       | 39        |
| 4.5      | Eigenschaften des verdichteten Bodens .....                                       | 40        |
| 4.6      | Verdichtungskontrolle .....                                                       | 42        |
| 4.7      | Beurteilung der Brauchbarkeit gegebener Böden<br>als Dammschüttmaterial .....     | 43        |
| 4.8      | Böden mit Überkorn .....                                                          | 43        |
| 4.9      | Beeinflussung des Wassergehaltes .....                                            | 45        |
| 4.10     | Auswirkungen der Verdichtung<br>auf den Spannungszustand im Boden .....           | 46        |
| 4.11     | Maschinelle Verdichtung .....                                                     | 48        |

|          |                                                                                                                            |            |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>5</b> | <b>Formänderungseigenschaften der Böden</b>                                                                                | <b>49</b>  |
| 5.1      | Das Verhalten eines elastischen Materials und von Böden .....                                                              | 49         |
| 5.2      | Der Zusammendrückungsmodul $M_E$ bzw. $E_v$<br>und der Steifemodul $E_s$ .....                                             | 51         |
| 5.3      | Der Ödometerversuch:<br>Das Zusammendrückungsdiagramm .....                                                                | 52         |
| 5.4      | Der Kompressionsbeiwert $C_c$ .....                                                                                        | 53         |
| 5.5      | Normal und überkonsolidierte Böden .....                                                                                   | 54         |
| 5.6      | Die Zeit-Setzungs-Kurve aus dem Ödometerversuch .....                                                                      | 55         |
| 5.7      | Der Konsolidationsgrad $U$ .....                                                                                           | 56         |
| 5.8      | Die Konsolidationstheorie .....                                                                                            | 56         |
| 5.9      | Die Verteilung der Porenwasserüberdrücke<br>innerhalb der konsolidierenden Tonschicht .....                                | 60         |
| 5.10     | Näherungsverfahren für beliebige Randbedingungen .....                                                                     | 61         |
| 5.11     | Die Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes $k$<br>von gesättigten Tonen .....                                            | 63         |
| 5.12     | Mehrdimensionale Konsolidation .....                                                                                       | 63         |
| 5.13     | Mehrschichtprobleme .....                                                                                                  | 65         |
| 5.14     | Nichtplötzliche Belastung .....                                                                                            | 66         |
| 5.15     | Beschleunigung des Konsolidationsvorganges .....                                                                           | 67         |
| 5.16     | Kontrollen des Konsolidationsvorganges .....                                                                               | 68         |
| 5.17     | Deformationen, deren Verlauf nicht mittels<br>der Konsolidationstheorie ermittelt werden kann .....                        | 68         |
| <b>6</b> | <b>Festigkeitseigenschaften der Böden</b>                                                                                  | <b>71</b>  |
| 6.1      | Einführung .....                                                                                                           | 71         |
| 6.2      | Das Bruchgesetz von Mohr-Coulomb .....                                                                                     | 71         |
| 6.3      | Die Darstellung des Bruchkriteriums im $p', q$ -Diagramm .....                                                             | 72         |
| 6.4      | Versuche zur experimentellen Ermittlung<br>der Scherparameter .....                                                        | 73         |
| 6.5      | Das Prinzip des triaxialen Scherversuches .....                                                                            | 75         |
| 6.6      | Der triaxiale KD-Versuch .....                                                                                             | 75         |
| 6.7      | Der triaxiale KU-Versuch .....                                                                                             | 75         |
| 6.8      | Scherfestigkeit körniger Böden .....                                                                                       | 77         |
| 6.9      | Scherfestigkeit bindiger Böden (Tone) .....                                                                                | 79         |
| 6.10     | Grenzgleichgewichtszustände .....                                                                                          | 81         |
| 6.11     | Scherdeformationen von Böden .....                                                                                         | 83         |
| 6.12     | Abschätzen des Scherwinkels $\varphi'$ .....                                                                               | 85         |
| <b>7</b> | <b>Einflüsse des Grundwassers im Boden</b>                                                                                 | <b>87</b>  |
| 7.1      | Das Strömungsnetz .....                                                                                                    | 87         |
| 7.2      | Die Bestimmung des $k$ -Wertes .....                                                                                       | 89         |
| 7.3      | Wasserdrücke im ruhenden Grundwasser .....                                                                                 | 93         |
| 7.4      | Der Strömungsdruck .....                                                                                                   | 93         |
| 7.5      | Der Druckabbau beim Durchströmen<br>von Schichtpaketen, bestehend aus Schichten<br>unterschiedlicher Durchlässigkeit ..... | 95         |
| 7.6      | Die Anisotropie geschichteter Böden .....                                                                                  | 96         |
| 7.7      | Wasserdrücke im strömenden Grundwasser .....                                                                               | 96         |
| 7.8      | Der hydraulische Grundbruch .....                                                                                          | 99         |
| 7.9      | Verminderung des Druckes im Grundwasser<br>(Entspannung) .....                                                             | 102        |
| 7.10     | Messsysteme zur Messung des Potenzials .....                                                                               | 103        |
| 7.11     | Wasserhaltung in Baugruben .....                                                                                           | 105        |
| 7.12     | Innere Erosion und Filter .....                                                                                            | 107        |
| <b>8</b> | <b>Setzungsberechnung</b>                                                                                                  | <b>109</b> |
| 8.1      | Einführung .....                                                                                                           | 109        |
| 8.2      | Prinzip der Setzungsberechnung .....                                                                                       | 109        |
| 8.3      | Setzungsberechnung in Tabellenform .....                                                                                   | 111        |
| 8.4      | Einflusstiefe der Zusatzbelastung .....                                                                                    | 112        |

|          |                                                                                                 |            |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.5      | Berücksichtigung von kombinierten<br>Be- und Entlastungen .....                                 | 113        |
| 8.6      | Auftrieb und Gebäudegewicht.....                                                                | 114        |
| 8.7      | Gewichtsausgleich.....                                                                          | 115        |
| 8.8      | Vorbelastung.....                                                                               | 115        |
| 8.9      | Überbelastung.....                                                                              | 116        |
| 8.10     | Schlaife und starre Lasten .....                                                                | 118        |
| 8.11     | Setzungsdifferenzen .....                                                                       | 119        |
| 8.12     | Zulässige Setzungen und Setzungsdifferenzen .....                                               | 120        |
| 8.13     | Schwerpunktverlagerung und Stabilität<br>von hohen Bauwerken .....                              | 120        |
| <b>9</b> | <b>Stabilitätsprobleme</b> .....                                                                | <b>123</b> |
| 9.0      | Problemstellung.....                                                                            | 123        |
| 9.0.1    | Einführung.....                                                                                 | 123        |
| 9.0.2    | Die gemeinsamen Eigenschaften<br>der Stabilitätsprobleme .....                                  | 123        |
| 9.0.3    | Die Lösung des Stabilitätsproblems .....                                                        | 124        |
| 9.1      | Böschungsstabilität .....                                                                       | 125        |
| 9.1.1    | Einführung.....                                                                                 | 125        |
| 9.1.2    | Vereinfachungen gegenüber der Natur.....                                                        | 127        |
| 9.1.3    | Die schwedische Methode<br>der Stabilitätsberechnung .....                                      | 128        |
| 9.1.4    | Die Einflüsse des Wassers .....                                                                 | 130        |
| 9.1.5    | Das vereinfachte Verfahren nach Bishop .....                                                    | 133        |
| 9.1.6    | Das vereinfachte Verfahren nach Janbu.....                                                      | 133        |
| 9.1.7    | Die Praxis der Stabilitätsberechnung.....                                                       | 135        |
| 9.1.8    | Die unendlich lange Böschung<br>in einem Reibungsmaterial .....                                 | 136        |
| 9.1.9    | Die allgemeine Berechnung des Sicherheitsgrads .....                                            | 136        |
| 9.1.10   | Die kinematischen Methoden<br>von Culmann und Taylor .....                                      | 137        |
| 9.1.11   | Hilfsmittel zur Ermittlung der Standsicherheit<br>einfacher Böschungen im homogenen Boden ..... | 139        |
| 9.1.12   | Geometrie des Bruches; andere Methoden .....                                                    | 141        |
| 9.1.13   | Einführung von Ankerkräften<br>in die Stabilitätsberechnung.....                                | 142        |
| 9.2      | Tragfähigkeit.....                                                                              | 142        |
| 9.2.1    | Einführung.....                                                                                 | 142        |
| 9.2.2    | Problemstellung .....                                                                           | 143        |
| 9.2.3    | Die Näherungsmethoden<br>für den undrainierten Zustand .....                                    | 143        |
| 9.2.4    | Die statische Methode<br>für den drainierten Zustand.....                                       | 144        |
| 9.2.5    | Die allgemeine Tragfähigkeitsformel .....                                                       | 145        |
| 9.2.6    | Die Tragfähigkeitsfaktoren $N_c$ , $N_q$ und $N_\gamma$ .....                                   | 146        |
| 9.2.7    | Allgemeines und örtliches Abscheren .....                                                       | 147        |
| 9.2.8    | Einflüsse des Porenwasserdruckes.....                                                           | 148        |
| 9.2.9    | Grösse der Sicherheit $F_{\text{stat}}$ .....                                                   | 148        |
| 9.2.10   | Andere Randbedingungen .....                                                                    | 148        |
| 9.2.11   | Exzentrizität des Lastangriffes.....                                                            | 149        |
| 9.2.12   | Formfaktoren $s$ .....                                                                          | 150        |
| 9.2.13   | Tiefenfaktoren $d$ .....                                                                        | 150        |
| 9.2.14   | Lastneigungsfaktoren $i$ .....                                                                  | 150        |
| 9.2.15   | Geländeneigungsfaktoren $g$ .....                                                               | 150        |
| 9.2.16   | Fundamentneigungsfaktoren $b'$ .....                                                            | 151        |
| 9.2.17   | Undrainierte Belastung ( $\varphi = 0$ ) .....                                                  | 151        |
| 9.2.18   | Abgleiten des Fundamentes<br>auf der Fundamentsohle.....                                        | 152        |
| 9.2.19   | Der Begriff der „zulässigen Bodenpressung“ .....                                                | 153        |

|           |                                                                 |            |
|-----------|-----------------------------------------------------------------|------------|
| 9.3       | Erddruck .....                                                  | 153        |
| 9.3.1     | Einführung.....                                                 | 153        |
| 9.3.2     | Die Erddrucktheorie von Rankine .....                           | 154        |
| 9.3.3     | Deformationen und Erddruck.....                                 | 154        |
| 9.3.4     | Verteilung des Erddruckes .....                                 | 155        |
| 9.3.5     | Wirkung der Kohäsion .....                                      | 156        |
| 9.3.6     | Kurzfristige Stabilität und Wirkung<br>des Grundwassers.....    | 157        |
| 9.3.7     | Die Erddrucktheorie von Coulomb .....                           | 157        |
| 9.3.8     | Der Erddruck als Stabilitätsproblem<br>(nach Coulomb) .....     | 158        |
| 9.3.9     | Der Einfluss der Kohäsion .....                                 | 160        |
| 9.3.10    | Der Einfluss von Auflasten auf dem Gelände .....                | 162        |
| 9.3.11    | Der Einfluss der Wandreibung.....                               | 162        |
| 9.3.12    | Zusammenfassung der Näherungsverfahren<br>und Einflüsse.....    | 163        |
| 9.3.13    | Allgemeine Randbedingungen .....                                | 163        |
| 9.3.14    | Grafische Ermittlung des Erddruckes .....                       | 164        |
| 9.3.15    | Die freie Standhöhe $h_c$ .....                                 | 164        |
| 9.3.16    | Erddruck in geschichteten Böden .....                           | 165        |
| 9.3.17    | Erddruck auf eine Winkelstützmauer .....                        | 167        |
| 9.3.18    | Abschirmung des Erddruckes .....                                | 168        |
| 9.3.19    | Einfluss des Wassers auf den Erddruck .....                     | 169        |
| 9.3.20    | Erddruck-Umlagerung.....                                        | 169        |
| 9.3.21    | Gewölbewirkung.....                                             | 170        |
| <b>10</b> | <b>Vertikale Baugrubenabschlüsse .....</b>                      | <b>173</b> |
| 10.1      | Problemstellung.....                                            | 173        |
| 10.2      | Übersicht über die wichtigsten Wandsysteme.....                 | 173        |
| 10.3      | Belastungen der Wände .....                                     | 177        |
| 10.4      | Bauzustände.....                                                | 179        |
| 10.5      | Die nicht abgestützte, im Boden eingespannte Wand .....         | 180        |
| 10.6      | Die einfach abgestützte Wand .....                              | 182        |
| 10.7      | Mehrfach abgestützte Wand.....                                  | 187        |
| 10.8      | Erdwiderstand vor schmalen Druckflächen.....                    | 188        |
| 10.9      | Systemsicherheit und Abstützungen .....                         | 189        |
| <b>11</b> | <b>Die Sohldruckverteilung unter Fundamenten .....</b>          | <b>191</b> |
| 11.1      | Einführung .....                                                | 191        |
| 11.2      | Allgemeiner Grundsatz .....                                     | 191        |
| 11.3      | Die relative Steifigkeit $K$ .....                              | 192        |
| 11.4      | Das Spannungstrapezverfahren.....                               | 193        |
| 11.5      | Das Bettungsmodulverfahren (Bettungszifferverfahren) .....      | 194        |
| 11.6      | Der Bettungsmodul $k_s$ .....                                   | 196        |
| 11.7      | Das Steifezahlverfahren .....                                   | 198        |
| 11.8      | Bemerkungen zu den Verfahren .....                              | 200        |
| 11.9      | Das starre Fundament .....                                      | 201        |
| <b>12</b> | <b>Tiefgründung .....</b>                                       | <b>203</b> |
| 12.1      | Einführung .....                                                | 203        |
| 12.2      | Baugrundverbesserung.....                                       | 203        |
| 12.3      | Pfahlarten.....                                                 | 205        |
| 12.4      | Der Lasttransport in Pfählen .....                              | 206        |
| 12.5      | Die Abschätzung von Spitzenwiderstand<br>und Mantelreibung..... | 207        |
| 12.6      | Die negative Mantelreibung .....                                | 208        |
| 12.7      | Rammpfähle in sensitiven Böden .....                            | 210        |
| 12.8      | Die Setzung von Einzelpfählen .....                             | 210        |
| 12.9      | Die Gruppenwirkung.....                                         | 213        |
| 12.10     | Die horizontale Belastung von Pfählen .....                     | 213        |

|           |                                                                      |            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>13</b> | <b>Sicherheitsüberlegungen</b>                                       | <b>217</b> |
| 13.1      | Einführung                                                           | 217        |
| 13.2      | Stabilitätsprobleme                                                  | 218        |
| 13.3      | Böschungsstabilität                                                  | 221        |
| 13.4      | Tragfähigkeit von Fundamenten                                        | 222        |
| 13.5      | Erddruckprobleme                                                     | 223        |
| 13.6      | Abgleiten und Kippen von Fundamenten                                 | 226        |
| 13.7      | Hydraulischer Grundbruch                                             | 226        |
| 13.8      | Auftriebssicherheit von Bauwerken                                    | 226        |
| 13.9      | Deformationen (Setzungen)                                            | 227        |
| 13.10     | Zusammenfassung                                                      | 227        |
| <b>14</b> | <b>Ausgewählte Beispiele</b>                                         | <b>229</b> |
| 14.0      | Einführung                                                           | 229        |
| 14.1      | Die einfach abgestützte Wand: Einflüsse des Wassers                  | 229        |
| 14.2      | Hydraulischer Grundbruch und Auftrieb                                | 237        |
| 14.3      | Der Einfluss der Spannungsgeschichte<br>am Beispiel der Vorbelastung | 239        |
| 14.4      | Stabilitätsberechnung nach Janbu                                     | 244        |
| 14.5      | Aktiver und passiver Erddruck:<br>Allgemeinere Randbedingungen       | 249        |
| <b>15</b> | <b>Tropische Böden</b>                                               | <b>257</b> |
| 15.1      | Einführung                                                           | 257        |
| 15.2      | Das Residualprofil                                                   | 257        |
| 15.3      | Die Verwitterung                                                     | 257        |
| 15.4      | Neubildungen                                                         | 259        |
| 15.5      | Die Klassifikation tropischer Böden                                  | 259        |
| 15.6      | Die äusseren Einflüsse als System-Bestandteile                       | 260        |
| 15.7      | Die Erosion                                                          | 261        |
| <b>16</b> | <b>Boden und Fels</b>                                                | <b>267</b> |
| 16.1      | Einführung                                                           | 267        |
| 16.2      | Grundeigenschaften von Boden und Fels                                | 267        |
| 16.3      | Trennflächengefüge und Gefügemodell                                  | 269        |
| 16.4      | Lösen und Verdichten von Fels                                        | 270        |
| 16.5      | Formänderungseigenschaften von Fels                                  | 271        |
| 16.6      | Festigkeitseigenschaften von Fels                                    | 273        |
| 16.7      | Eigenspannungen im Gebirge                                           | 275        |
| <b>17</b> | <b>Beispiele</b>                                                     | <b>277</b> |
| 17.0      | Einführung                                                           | 277        |
| 17.1      | Kenngrossen für Böden                                                | 277        |
| 17.2      | Kenngrossen des Naturzustandes, Volumenbilanz                        | 279        |
| 17.3      | Totale und effektive Spannungen                                      | 279        |
| 17.4      | Festigkeitseigenschaften<br>und einfachste Stabilitätsberechnung     | 282        |
| 17.5      | Undrainierte Scherfestigkeit $s_u$                                   | 283        |
| 17.6      | Künstliche Verdichtung                                               | 284        |
| 17.7      | Setzungsberechnung, Kompressionsbeiwert $C_c$                        | 285        |
| 17.8      | Setzungsberechnung, Spannungsgeschichte                              | 286        |
| 17.9      | Eindimensionale Konsolidation                                        | 290        |
| 17.10     | Hydraulische Aspekte einer Baugrube                                  | 291        |
| 17.11     | Sohlpressung von Fundamenten                                         | 292        |
| 17.12     | Stabilitätsberechnung,<br>Einfluss von Porenwasserüberdrücken        | 294        |
| 17.13     | Stabilitätsfaktoren                                                  | 297        |
| 17.14     | Erddruck und Tragfähigkeit                                           | 298        |
| 17.15     | Pfahlfundation                                                       | 300        |
| 17.16     | Nicht abgestützte vertikale Wand                                     | 301        |
| 17.17     | Einfach abgestützte vertikale Wand                                   | 303        |
| 17.18     | Mehrfach abgestützte vertikale Wand                                  | 305        |

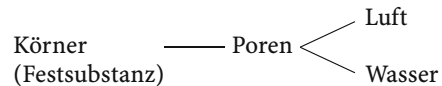
|                                           |                                                        |            |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------|
| 17.19                                     | Bestimmung des $k$ -Wertes aus einem Pumpversuch ..... | 306        |
| 17.20                                     | Grundwasserabsenkung mit einer Mehrbrunnenanlage.....  | 307        |
| 17.21                                     | Standsicherheit einer Felsböschung .....               | 310        |
| <b>Anhang</b>                             |                                                        | <b>313</b> |
| Tabelle A bis E                           | Spannungsverteilungen im Baugrund.....                 | 313        |
| Tabelle F                                 | Setzung des kennzeichnenden Punktes K .....            | 318        |
| Tabelle G                                 | Sohlpressungen unter einer Fundamentplatte .....       | 319        |
| Tabelle H <sub>1</sub> bis H <sub>8</sub> | Konsolidation .....                                    | 319        |
| <b>Literatur</b>                          |                                                        | <b>327</b> |
| <b>Sachverzeichnis</b>                    |                                                        | <b>333</b> |

# 1 Grundbegriffe

## 1.1 Einführung

In diesem Buch ist von Böden im Sinne von Lockergesteinen die Rede; dies im Gegensatz zum Begriff Festgestein oder Fels. Die Lockergesteine sind weitgehend durch Verwitterung aus den Festgesteinen entstanden. Der Transport vom Entstehungs- zum Ablagerungsort erfolgte durch Eis, Wasser oder Luft. Je nach Transportmedium können die Eigenschaften von Lockergesteinen erheblich variieren, doch gibt es noch weitere Faktoren, welche auf das Verhalten von Böden einen mindestens gleichrangigen Einfluss ausüben können, wie die Vorbelastung, um nur ein Beispiel zu nennen. Das Interesse richtet sich in diesem Buch auf das technische Verhalten von Böden bei Belastungsänderungen, bei dem Durchströmen von Wasser und anderen Vorgängen. Zentrale Fragen nach dem Verhalten von Böden bei derartigen Vorgängen, d.h. bei grundbaulichen Problemen, sind häufig das Spannungs-Deformations-Verhalten und das Festigkeitsverhalten wie auch die zeitabhängigen Entwicklungen beider Verhaltensweisen. Andere grundbauliche Probleme setzen die Kenntnis anderer Verhaltensweisen voraus, so z. B. das Verdichtungsverhalten.

Lockergesteine, als Verwitterungsprodukt von Festgesteinen, bestehen aus einzelnen Körnern. Für diese Körner wird auch der Begriff Festsubstanz verwendet. Zwischen den Körnern ist der Porenraum eingeschlossen. Er kann mit Luft, aber auch teilweise oder ganz mit Wasser gefüllt sein. Im letzteren Fall ist der Boden gesättigt, und wenn er dazu noch feinkörnig ist, können seine Festigkeit und das Spannungs-Deformations-Verhalten in hohem Masse zeitabhängig sein. Der Drei-Phasen-Aufbau der Böden ist von entscheidendem Einfluss auf das technische Verhalten:



## 1.2 Die Korngrößenverteilung

Die einzelnen Körner von Böden sind sehr unterschiedlich gross und sehr unterschiedlich geformt. Im Allgemeinen sind grosse Körner (Kieskörner und Steine) eher kugelig bis kubisch geformt, während kleine Körner (Tonminerale) eher plättchenförmig sind. So variiert auch die spezifische Oberfläche sehr stark mit der Korngrösse. Stellt man sich z. B. einen Boden aus lauter gleich grossen Körnern von Kugelform mit einem spezifischen Gewicht der Festsubstanz von  $27 \text{ kN/m}^3$  aufgebaut vor, so beträgt die spezifische Oberfläche bei 1 cm Kugeldurchmesser  $0,0222 \text{ m}^2/\text{N}$ . Bei 0,001 mm Kugeldurchmesser erreicht man schon ca.  $222 \text{ m}^2/\text{N}$ , während die in Wirklichkeit eben nicht aus Kugeln, sondern aus Plättchen mit einem Längen:Breiten:Dicken-Verhältnis von etwa 10:10:1 (Kaolinit) bis etwa 100:100:1 (Montmorillonit) aufgebauten Tonminerale spezifische Oberflächen von bis zu einigen  $10\,000 \text{ m}^2/\text{N}$  haben können. Da die spezifische Oberfläche von Böden ein Mass für sein gesamtes Verhalten ist, wird deutlich, dass das Verhalten eines Bodens stark davon abhängig ist, wie viele und wie grosse Körner er enthält. Diese Auskunft entnimmt man der Korngrößenverteilungskurve (Bild 1.1). Sie wird durch Aussieben, bzw. unterhalb von etwa 0,1 mm Korngrösse durch die Aräometer-Analyse eines Bodens gewonnen. Die Aussage der Korngrößenverteilungskurve ist:  $x$  Gewichtsprozent aller Körner in dem untersuchten Boden haben kleinere Korndurchmesser als  $d_x$ . Der „Korndurchmesser“ wäre bei einem kugelförmigen Korn identisch mit dem Kugeldurchmesser.

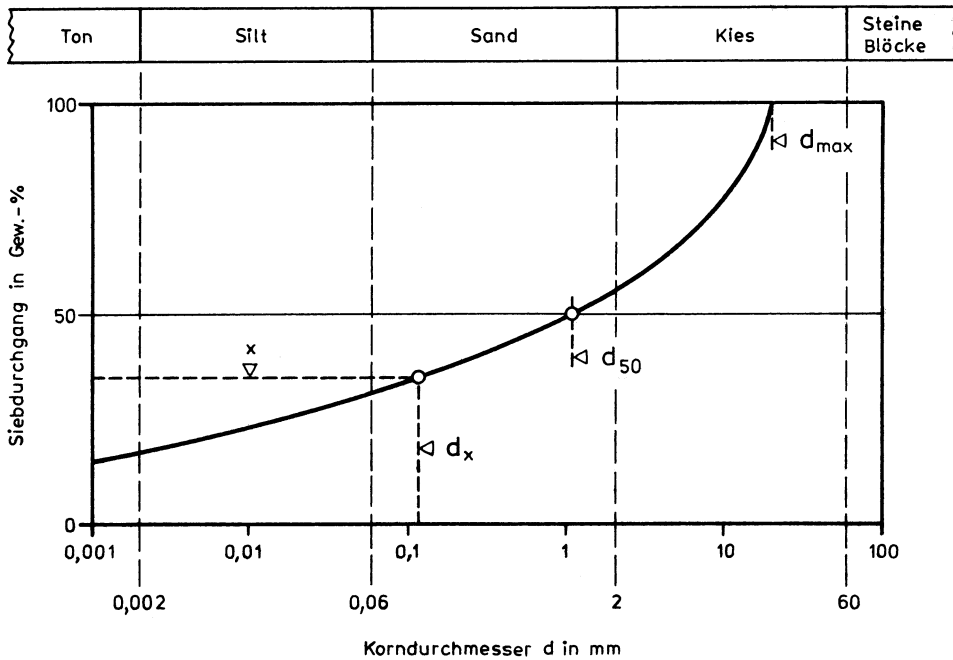


Bild 1.1. Korngrößenverteilung als Summationskurve und „Fraktionen“

Bei nicht kugelförmigen Körnern ist der Korndurchmesser als der Durchmesser eines kreisrunden Loches in einem Siebblech definiert, durch welches man das Korn gerade noch hindurchstecken kann. Im nicht mehr siebbaren Korngrößenbereich, d.h. unterhalb etwa 0,1 mm Korndurchmesser, ist der Korndurchmesser durch die Sinkgeschwindigkeit eines Korns von bestimmtem Gewicht in einer Suspension aus dem zu untersuchenden Boden und Wasser gegeben (Aräometer-Analyse). Über die Kornformen der einzelnen Korngrößen sagt die Korngrößenverteilung nichts aus.

Aus dem Bild 1.1 ist weiter noch ersichtlich, dass die Korngrößen in sogenannte Fraktionen eingeteilt werden, die ihrerseits noch weiter unterteilt werden können (Feinsand, Mittelsand, Grobsand):

|                | Kurzbezeichnung             |
|----------------|-----------------------------|
| <0,002 mm:     | Ton <sup>a</sup> (clay), C, |
| 0,002–0,06 mm: | Silt (silt), M,             |
| 0,06–2 mm:     | Sand (sand), S,             |
| 2–60 mm:       | Kies (gravel), G.           |

<sup>a</sup> Nicht mit Tonmineralen zu verwechseln!

Die Korngröße 0,06 mm ist die Grenze zwischen den feinkörnigen Böden (Tone und Silte) einerseits und den mittel- (Sande) bzw. grobkörnigen (Kiese) Böden andererseits. Die Korngröße 0,06 mm entspricht ungefähr der Sichtbarkeitsgrenze bei bloßem Auge.

Die Steilheit  $C_u$  (auch Ungleichförmigkeitszahl genannt) ist als  $d_{60}/d_{10}$  definiert (Bild 1.2).  $C_u = 1$  bedeutet, dass der Boden aus lauter gleich grossen Körnern besteht. Ein kleiner Wert von  $C_u$  kennzeichnet einen gleichförmigen, ein grosser Wert einen ungleichförmigen Boden. Im

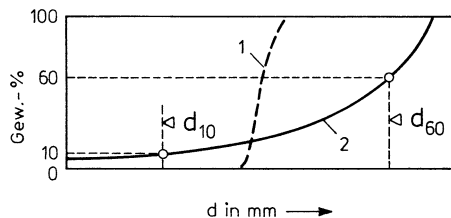
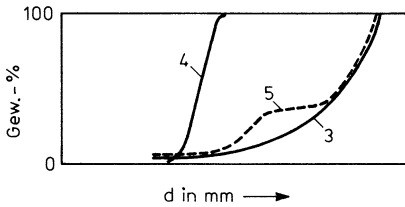


Bild 1.2. Ungleichförmigkeitszahl  $C_u = d_{60}/d_{10}$ . 1: gleichförmiger Boden ( $C_u$  klein); 2: ungleichförmiger Boden ( $C_u$  gross)





**Bild 1.3.** Gute und schlechte Kornabstufung. 3: Gute Kornabstufung (W), alle Korngrößen vertreten, gewichtsmässig viel grobe Fraktion; 4: schlechte Kornabstufung (P), eine Korngrösse vorherrschend; 5: schlechte Kornabstufung (P), eine Korngrösse fehlend

ersteren Fall spricht man von schlechter Kornabstufung, im letzteren von guter Kornabstufung (Bild 1.3). Die Kurzbezeichnungen hierfür lauten P (poorly graded) bzw. W (well graded). Die Kurzbezeichnung W ist (siehe Klassifikation) den Böden vorbehalten, welche bezüglich  $C_u$  und der Krümmungszahl  $C_K = d_{30}^2/(d_{10}d_{60})$  in bestimmten Grenzen liegen. Die Idealkurve für gute Kornabstufung ist die Fuller-Kurve (Abschnitt 1.11). Die W-Korngrößenverteilung bedeutet, dass jeweils so viele kleinere Körner in dem Boden vertreten sind, dass damit die Porenräume zwischen den grösseren Körnern gefüllt werden können. Die W-Korngrößenverteilung erlaubt also dichteste Packung und gute Verdichtung.

### 1.3 Die Kenngrößen des Naturzustandes

Entnimmt man dem Boden eine Probe, so lassen sich daran zunächst das Gesamtgewicht  $G_{\text{tot}}$  (inklusive Wasser) und das Volumen  $V_{\text{tot}}$  feststellen. Ausdrücklich ist hervorzuheben, dass mit  $V_{\text{tot}}$  das Volumen im naturfeuchten Zustand gemeint ist (Schwinden bei Wasserentzug, Bild 1.7). Durch Trocknen bei  $105^\circ\text{C}$  lässt sich auch das Gewicht der Festschubstanz  $G_s$  und aus  $G_{\text{tot}} - G_s = G_w$  auch das Gewicht des Wassers ermitteln. Aus diesen Werten errechnen sich zunächst die Kenngrößen des Zustandes in der Natur, woraus dann weitere beschreibende Kenngrößen abgeleitet werden können:

Raumgewicht feucht:

$$\gamma = \frac{G_{\text{tot}}}{V_{\text{tot}}},$$

Wassergehalt (Angabe in %):

$$w = \frac{G_w}{G_s},$$

spezifisches Gewicht der Festschubstanz:

$$\gamma_s = \frac{G_s}{V_s},$$

wobei  $V_s$  das Volumen der Festschubstanz ist, z. B. aus Pyknometeranalyse ermittelt.

Für überschlägliche Berechnungen kann man in Ermangelung von Messwerten häufig von Feuchtraumgewichten  $\gamma = (19 \cdots 22) \text{ kN/m}^3$  ausgehen, während  $\gamma_s$  häufig in der Größenordnung von  $26\text{--}27 \text{ kN/m}^3$  liegt. Die Wassergehalte von Böden sind erheblich von dem Gehalt an Feinanteilen abhängig. Als Größenordnungen kommen folgende Werte in Betracht:

saubere Kiese:

$$w = (3 \cdots 8) \%,$$

saubere Sande:

$$w = (5 \cdots 20) \%,$$

tonige Silte kleiner bis mittlerer Plastizität:

$$w = (15 \cdots 35) \%,$$

Tone hoher Plastizität:

$$w = (20 \cdots 70) \%.$$

Mischungen von Kiesen oder Sanden mit feinkörnigen Bestandteilen liegen je nach Menge der feinkörnigen Bestandteile hinsichtlich des Wassergehaltes zwischen den genannten Werten. Organische oder organisch verunreinigte Böden wie auch Seekreiden können auch Wassergehalte von 100 % oder mehr aufweisen.

### 1.4 Weitere, abgeleitete Kenngrößen

#### Definitionen

Volumen der Poren:

$$V_p,$$

spezifisches Gewicht des Wassers:

$$\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3,$$

Volumen des Wassers:

$$V_w,$$

Raumgewicht trocken:

$$\gamma_d = \frac{G_s}{V_{\text{tot}}},$$

Raumgewicht gesättigt:

$$\gamma_g = \gamma \text{ für } S_r = 1,$$

Raumgewicht unter Auftrieb:

$$\gamma' = \gamma_g - \gamma_w,$$

Porosität (Porenanteil):

$$n = \frac{V_p}{V_{\text{tot}}},$$

Porenzahl: 
$$e = \frac{V_p}{V_s},$$

Sättigungszahl: 
$$S_r = \frac{V_w}{V_p}.$$

### Häufig gebrauchte Umrechnungsformeln

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w} = (1 - n)\gamma_s,$$

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} = \frac{e}{1 + e},$$

$$\gamma = \gamma_d + S_r n \gamma_w,$$

$$S_r = \frac{w \gamma_d}{n \gamma_w} = \frac{w}{\frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{\gamma_w}{\gamma_s}},$$

$$\gamma_g = (1 - n)\gamma_s + n\gamma_w = \gamma_d + n\gamma_w,$$

$$\gamma' = \gamma_d - (1 - n)\gamma_w,$$

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 = \frac{n}{1 - n}.$$

Hinweis auf Abschnitte 17.1 und 17.2.

## 1.5 Die Lagerungsdichte $D$

Die mechanischen Eigenschaften von rolligen, nicht bindigen Böden, d. h. von Kiesen und Sanden ohne oder mit nur wenig Feinanteilen, sind in erster Linie von ihrer Lagerungsdichte abhängig. Masse für diese Grösse sind das Raumgewicht, die Porosität  $n$  oder auch die Porenzahl  $e$ . Während die Eigenschaften der bindigen Böden vor allem von ihrer Liquiditätszahl  $I_L$  (Abschnitt 1.8) abhängen, wird die Lagerungsdichte von Kiesen und Sanden durch die relative Lagerungsdichte  $D$  charakterisiert.

Die Lagerungsdichte  $D$  beruht auf einem Vergleich zwischen der vorhandenen Lagerungsdichte und dem maximalen (dichteste Lagerung) sowie dem minimalen Wert (lockerste Lagerung). Die lockerste Lagerung wird durch vorsichtiges Einfüllen des getrockneten rolligen Bodens in ein Gefäss bekannten Volumens ermittelt. Dabei soll jede Verdichtung ausgeschlossen sein. Die dichteste Lagerung kann z. B. durch Einrütteln des Bodens im Wasser und anschliessendes Absaugen des Wassers von dem Fuss des Gefässes festgestellt werden. Wichtig dabei ist, dass durch die Verdichtung keine Zer-

trümmerung von Körnern stattfindet. Andernfalls ergäbe sich eine andere Korngrössenverteilung.

Die Lagerungsdichte  $D$ , rsp. die relevante Dichte  $I_d$  eines Bodens, der in Natur die Porosität  $n$ , rsp. die Porenzahl  $e$  aufweist, ist wie folgt definiert:

$$D = \frac{n_{\max} - n}{n_{\max} - n_{\min}}, \quad I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

|                        |                        |
|------------------------|------------------------|
| sehr lockere Lagerung: | $D < 0,15,$            |
| lockere Lagerung:      | $D = 0,15 \dots 0,30,$ |
| mitteldichte Lagerung: | $D = 0,30 \dots 0,50,$ |
| dichte Lagerung:       | $D = 0,50 \dots 0,80,$ |
| sehr dichte Lagerung:  | $D > 0,80.$            |

Lauter gleich grosse Kugeln weisen eine maximale Porosität von  $n_{\max} \approx 48\%$  und ein Minimum von  $n_{\min} \approx 26\%$  auf. Gleichförmige Böden liegen nahe bei diesen Werten, während ungleichförmige Böden kleinere extreme Porositäten haben. Am ausgesprochensten ist dies bei Böden mit einer W-Korngrössenverteilung der Fall.

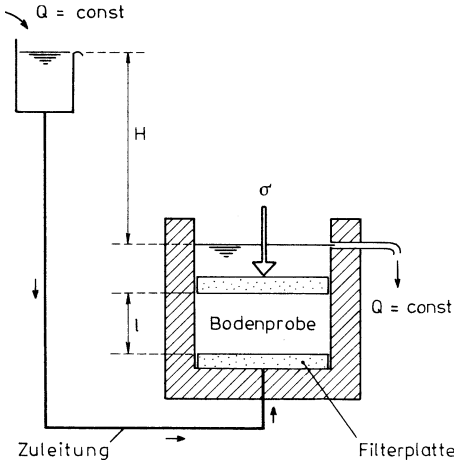
Eine andere Möglichkeit, eine Aussage über die „relative“ Lagerungsdichte eines Bodens zu machen, besteht aus dem Vergleich des in der Natur vorhandenen Trockenraumgewichtes mit dem maximalen, durch Verdichtung erzielbaren Wert (Siehe Kapitel 4; Proctorversuch). Allerdings können dabei gebräuchte Körner zertrümmert werden, sodass eine Veränderung der Korngrössenverteilung durch den Proctorversuch eintritt.

## 1.6 Der Durchlässigkeitsbeiwert $k$

Dem durch die Porenräume eines Bodens strömenden Wasser wird ein je nach der Grösse und dem Durchmesser dieser Porenräume kleinerer oder grösserer Widerstand entgegengesetzt. Ein Mass für diesen Widerstand ist der Durchlässigkeitsbeiwert  $k$ . Er ist durch das Gesetz von Darcy definiert:

$$v = ki,$$

wobei die Filtergeschwindigkeit  $v$ ; eine fiktive Grösse ist:  $v = Q/F$  mit  $Q$  als Durchflussmenge



**Bild 1.4.** Ermittlung des  $k$ -Wertes bei variabler axialer Belastung  $\sigma$ . Querschnittsfläche der Bodenprobe  $F$ .  $v = Q/F$ ,  $k = v/i = Ql/FH$

je Zeit und  $F$  als gesamter Durchflussquerschnitt einschliesslich Festsubstanz. Die wirkliche Fliessgeschwindigkeit  $\bar{v}$  des Wassers in den Porenräumen ist grösser als  $v$  und wegen der unregelmässigen Gestalt der Porenräume nicht konstant. Das hydraulische Gefälle  $i$  der Sickerströmung im Boden ist definiert als Potenzialdifferenz geteilt durch Länge des Sickerweges, d. h.  $i = H/l$  (Bild 1.4). Die in dem Bild 1.4 skizzierte Messmethode setzt voraus, dass in den Zuleitungen usw. keine merklichen Energieverluste auftreten. Anderenfalls würde die oben gegebene Definition von  $i$  nicht zutreffend sein.

Der Durchlässigkeitsbeiwert  $k$ , kurz  $k$ -Wert genannt, wird in der Regel in cm/s angegeben. Er variiert in sehr starkem Masse; der Schwankungsbereich beträgt bei den häufig vorkommenden Böden etwa 8–10 Zehnerpotenzen. Als Grössenordnungen können etwa folgende Werte gelten:

|                                                        |                                              |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Saubere Kiese:                                         | $k = (10^{+1} \dots 10^{-2}) \text{ cm/s}$ , |
| saubere Sande:                                         | $k = (10^0 \dots 10^{-3}) \text{ cm/s}$ ,    |
| Silte:                                                 | $k = (10^{-3} \dots 10^{-6}) \text{ cm/s}$ , |
| tonige Silte geringer bis mittlerer Plastizität:       | $k = (10^{-5} \dots 10^{-8}) \text{ cm/s}$ , |
| Tone und tonige Silte mittlerer bis hoher Plastizität: | $k = (10^{-7} \dots 10^{-9}) \text{ cm/s}$ . |

Mischungen von sauberen Kiesen oder Sanden mit feinkörnigen Bestandteilen, d. h. siltige oder tonige Kiese oder Sande sind weniger durchlässig als saubere Kiese oder Sande. Bei hohem Feinanteil kann der Boden sogar die Durchlässigkeit der feinkörnigen Matrix aufweisen. (Bild 1.12).

Je nach Grösse des  $k$ -Wertes lassen sich die Böden gut [ $k$  grösser als ca.  $(10^{-3} \dots 10^{-4}) \text{ cm/s}$ ] oder nur schlecht entwässern [ $k = \text{ca. } (10^{-4} \dots 10^{-6}) \text{ cm/s}$ ]. Böden mit  $k$ -Werten von weniger als ca.  $10^{-6} \text{ cm/s}$  sind als praktisch undurchlässig anzusehen.

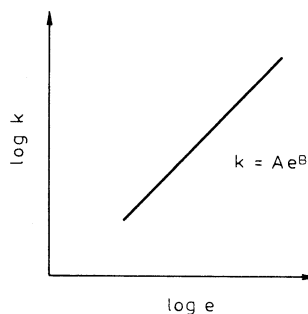
Die oben angegebenen Grössenordnungen der  $k$ -Werte lassen erkennen, dass der  $k$ -Wert eines Bodens vor allem vom Gehalt an Feinanteilen abhängt. Ein anderer deutlicher Einfluss ist die Lagerungsdichte (ausgedrückt durch die Grösse des Raumgewichtes, der Porosität  $n$  oder der Porenzahl  $e$ ). Empirisch bekannt ist der in Bild 1.5 gegebene Zusammenhang zwischen  $k$  und  $e$ .

Es wurden verschiedene Formeln für die Abschätzung der Grösse des  $k$ -Wertes auf Grund der Kornverteilung oder der Porosität angegeben. Als Beispiel sei diejenige von Hazen erwähnt:

$$k [\text{cm/s}] \approx 100 d_{10}^2 [\text{cm}^2] .$$

Diese Formel gibt aber nur für gleichförmige Sande vernünftige Resultate. Für ungleichförmige Materialien ist eine Korrektur mit der Ungleichförmigkeitszahl  $C_u = d_{60}/d_{10}$  angebracht:

$$k \approx \frac{100 d_{10}^2}{C_u} ,$$



**Bild 1.5.** Zusammenhang zwischen dem  $k$ -Wert und der Porenzahl  $e$

wobei wieder, wie oben,  $k$  in cm/s und  $d_{10}$  in cm einzusetzen ist. Auf tonige Böden sollte diese Formel nicht angewendet werden.

## 1.7 Die Plastizitätseigenschaften der Böden

Die Plastizitätseigenschaften der Böden sind ein Mass für ihr Wasserbindungsvermögen. Da nur Körner kleiner Grösse (und darunter wiederum vor allem die Tonminerale!) ein ausreichendes Wasserbindungsvermögen besitzen, ist es nur bei feinkörnigen Böden oder beim Feinanteil gemischtkörniger Böden sinnvoll, von Plastizitätseigenschaften zu sprechen.

Die Plastizitätseigenschaften sind durch die Fließgrenze  $w_L$  und die Ausrollgrenze  $w_P$  definiert. Beides sind Wassergehalte in einem ganz bestimmten Zustand des Bodens und werden durch normierte Versuche festgestellt (Schweiz: SN 670 345, Deutschland DIN 18 122). Wenn der Wassergehalt des Bodens bei der Fließgrenze  $w_L$  liegt, so befindet er sich beim Übergang vom plastischen (bildsamen) zum zähflüssigen Zustand. Analog markiert die Ausrollgrenze  $w_P$  den Wechsel vom plastischen (bildsamen) zum halbfesten Zustand (Bild 1.6). Für die Bestimmung beider Grenzen, auch Konsistenzgrenzen genannt, müssen die gröberen Anteile aus dem Boden entfernt werden (SN 670 345:  $> 0,5$  mm). Diese Tatsache spielt bei der Ermittlung der Liquiditätszahl eine wichtige Rolle (Abschnitt 1.8). Böden, an denen Fließ- und Ausrollgrenze feststellbar sind, werden als bindig bezeichnet.

Die Plastizitätszahl  $I_P$  ist wie folgt definiert:

$$I_P = w_L - w_P .$$

Die Plastizitätskenngrössen (Konsistenzgrenzen-

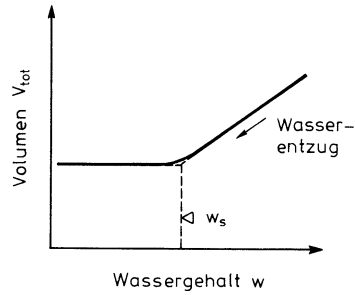


Bild 1.7. Bedeutung der Schrumpfgrenze  $w_s$

zen) erlauben, teilweise für sich allein, teilweise in Verbindung mit dem natürlichen Wassergehalt, wichtige Aussagen über die Eigenschaften und den Zustand feinkörniger bzw. des feinkörnigen Anteils gemischtkörniger Böden. Sie dienen auch zur Klassifikation der feinkörnigen Böden (Abschnitt 1.11).

In Bild 1.6 ist noch die Schrumpfgrenze  $w_s$  markiert. Ihre physikalische Bedeutung geht aus Bild 1.7 hervor: Schrumpfen bei Wasserentzug erfolgt nur bei  $w > w_s$ . Die Schrumpfgrenze gehört jedoch nicht zu den Grössen, welche die Plastizitätseigenschaften von Böden umschreiben.

## 1.8 Die Liquiditätszahl $I_L$

Die Liquiditätszahl  $I_L$  stellt eine Verknüpfung der Plastizitätseigenschaften mit dem natürlichen (vorhandenen) Wassergehalt  $w$  dar. Sie ist damit ein Mass für die Zustandsform des Bodens (Bild 1.8). Die Liquiditätszahl  $I_L$  ist wie folgt definiert:

$$I_L = \frac{w - w_P}{I_P} .$$

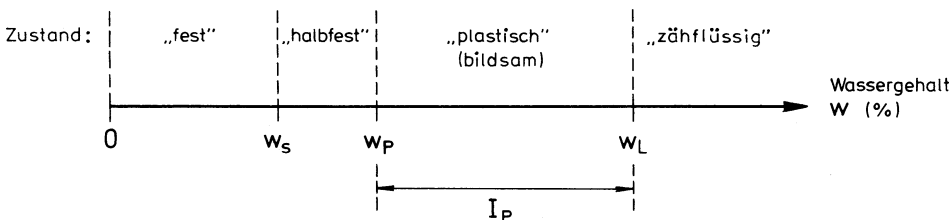
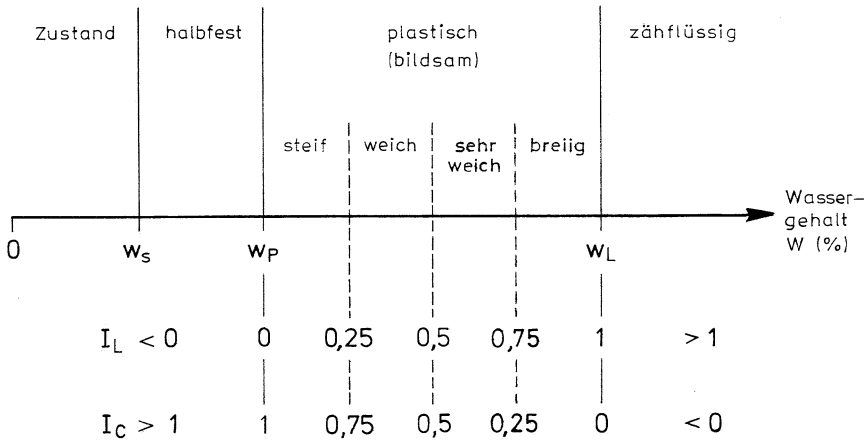


Bild 1.6. Plastizitätseigenschaften (Konsistenzgrenzen).  $w_L$ : Fließgrenze,  $w_P$ : Ausrollgrenze,  $I_P$ : Plastizitätszahl, ferner noch  $w_s$ : Schrumpfgrenze

Bild 1.8. Liquiditätszahl  $I_L$  und Konsistenzzahl  $I_C$ 

In Deutschland häufiger gebraucht wird die Konsistenzzahl  $I_C$ . Ihre Definition lautet:

$$I_C = \frac{w_L - w}{I_p} (= 1 - I_L).$$

Die Bedeutung beider Kenngrößen geht aus der folgenden Zusammenstellung hervor (siehe auch Bild 1.8):

- $w < w_P$ ,  $I_L < 0$ ,  $I_C > 1$ , (halbfest)
- $w = w_P$ ,  $I_L = 0$ ,  $I_C = 1$ ,
- $w_P < w < w_L$ ,  $0 < I_L < 1$ ,
- $1 > I_C > 0$ , (plastisch)
- $w = w_L$ ,  $I_L = 1$ ,  $I_C = 0$ ,
- $w > w_L$ ,  $I_L > 1$ ,  $I_C < 0$ . (zähflüssig)

Beide Kenngrößen erlauben die Unterteilung des plastischen Zustandsbereichs im Sinne verfeinerter Aussagen (Bild 1.8).

Enthält der Boden Körner mit mehr als 0,5 mm Korndurchmesser, so dürfen die Plastizitätseigenschaften und der Wassergehalt  $w$  nicht mehr direkt miteinander verglichen werden. Für die Berechnung der Liquiditätszahl  $I_L$  (oder analog der Konsistenzzahl  $I_C$ ) muss der vorhandene Wassergehalt  $w$  korrigiert werden. Man geht dabei von der Vorstellung aus, dass die Körner  $> 0,5$  mm, die ja für die Ermittlung von  $w_L$  und  $w_P$  entfernt werden müssen, kein oder nur sehr wenig Wasser binden. Tatsächlich ist der Wasserfilm auf der Oberfläche eines Steines auch sehr

dünn und entspricht nur etwa einem Wassergehalt von 0,2 bis 0,5 %. Man kann demnach meist mit guter Näherung davon ausgehen, dass der Wassergehalt der Körner  $> 0,5$  mm gleich null sei.

Das Vorgehen bei der Ermittlung des korrigierten Wassergehaltes  $w^*$ , der dann in die Formel für  $I_L$  bzw.  $I_C$  einzusetzen ist, gestaltet sich wie folgt (Bild 1.9):

Trockengewicht

- ganze Probe:  $G_s$ ,
- davon  $> 0,5$  mm:  $pG_s$ ,
- davon  $< 0,5$  mm:  $(1 - p)G_s$ ,

Wassergewicht

- ganze Probe:  $G_w$

Wassergehalt

- ganze Probe:  $w = \frac{G_w}{G_s}$ ,

Wassergehalt

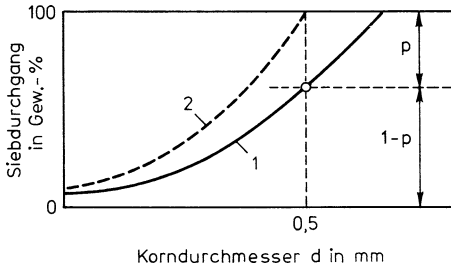
Fraktion

$< 0,5$  mm:

$$w^* = \frac{G_w}{(1 - p)G_s} = \frac{w}{1 - p}.$$

Dabei ist angenommen, dass der Wassergehalt der Fraktion  $> 0,5$  mm gleich 0 ist. Will man dafür einen Wert  $> 0$  einsetzen, so gestaltet sich das Vorgehen analog. Die Annahme eines Wertes  $> 0$  ist vor allem bei grossem „Überkornanteil“  $p$  ratsam.

Die Liquiditätszahl eines bindigen Bodens ist, in Verbindung mit seiner Plastizitätszahl, ein direktes Mass für seine Eigenschaften, so z. B. auch für seine Festigkeit. Konsolidiert man die-



**Bild 1.9.** Überkornanteil  $p$ . 1: Korngrößenverteilung ganze Probe, 2: dito Fraktion  $< 0,5$  mm, an welcher  $w_L$  und  $w_p$  bestimmt werden

sen Boden, d.h. vermindert man seine Porosität durch eine äussere Druckspannung, so wird Wasser aus dem Boden herausgepresst, die Liquiditätszahl sinkt und die Festigkeit steigt. Wird umgekehrt der Boden durch Schervorgänge o. Ä. aufgelockert und nimmt dabei Wasser auf, so steigt die Liquiditätszahl und die Festigkeit nimmt ab. Diese Verminderung ist indes an eine mechanische Auflockerung gebunden, weil sonst ein zumeist gesättigter feinkörniger Boden kein Wasser aufnehmen würde; es sei denn durch Quellen bei einem überkonsolidierten Ton.

## 1.9 Die Aktivitätszahl $I_A$

Die Tonfraktion von Böden (Anteile  $< 0,002$  mm, nicht zu verwechseln mit den Tonmineralen) kann mineralogisch sehr verschieden aufgebaut sein, und damit kann auch das Wasserbindungsvermögen (wie auch die Plastizitätseigenschaften) bei gleichem Anteil der Tonfraktion sehr unterschiedlich sein. Je höher die Anteile der quellfähigen Tonminerale in der Tonfraktion sind, desto grösser ist das Wasserbindungsvermögen und damit auch die Plastizität eines Bodens.

Für die zahlenmässige Erfassung dieses Tatbestandes dient die Aktivitätszahl  $I_A$ , die wie folgt definiert ist:

$$I_A = \frac{I_p}{q^*},$$

wobei  $q^*$  der prozentuale Anteil der Fraktion  $< 0,002$  mm, bezogen auf ein Maximalkorn von  $0,5$  mm, ist.

Beispiel (Bild 1.9): Ein Boden hat eine Plastizitätszahl von  $26,0\%$ . Sein Maximalkorn ist grösser als  $0,5$  mm; der Anteil  $< 0,5$  mm beträgt  $1 - p = 83$  Gew.-%, der Anteil  $< 0,002$  mm  $q = 15$  Gew.-%.

$$q^* = \frac{15\%}{0,83} = 18,1 \text{ Gew.-%}$$

$$I_A = \frac{26,0\%}{18,1\%} = 1,4.$$

Böden mit  $I_A < 0,75$  werden als inaktiv bezeichnet, bei  $0,75 < I_A < 1,25$  als normal aktiv, und bei  $I_A > 1,25$  als aktiv.

Die Aktivitätszahlen einiger Minerale sind:

|                    |                     |
|--------------------|---------------------|
| Quarz:             | $I_A \approx 0,$    |
| Kaolinit:          | $I_A \approx 0,33,$ |
| Illit:             | $I_A \approx 0,90,$ |
| Ca-Montmorillonit: | $I_A \approx 1,5,$  |
| Na-Montmorillonit: | $I_A \approx 7,5.$  |

Die Tonminerale schweizerischer Böden sind meist Illite, die eine Aktivitätszahl nahe 1 haben. Man kann deshalb häufig davon ausgehen, dass die Plastizitätszahl  $I_p$  eine direkte Messgrösse für den Anteil der Tonfraktion im Boden ist. Diese Information ist umso willkommener, als erfahrungsgemäss die Dispergierungsenergie bei der Aräometer-Analyse oft nicht ausreicht, die einzelnen Körner der Fraktion  $< 0,002$  mm vollständig voneinander zu trennen. Ist dies der Fall, so sind natürlich alle empirischen Zusammenhänge zwischen dem „Tongehalt“ eines Bodens und anderen gesuchten Grössen sehr mit Vorsicht anzuwenden.

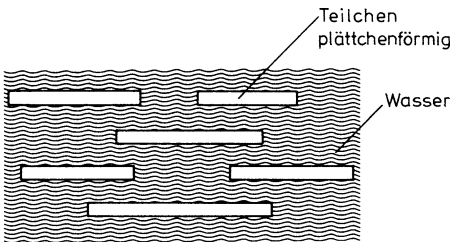
## 1.10 Die Struktur der Böden

Im Abschnitt 1.2 wurde ausgeführt, dass zunächst zwischen feinkörnigen Böden einerseits und grob- oder mittelkörnigen Böden andererseits unterschieden wird, wobei die Grenze bei einer Korngrösse von  $0,06$  mm liegt. Ebenfalls in Abschnitt 1.2 wurde gezeigt, dass grob- oder mittelkörnige Böden im Vergleich zu den feinkörnigen Böden nur eine geringe spezifische Oberfläche besitzen.

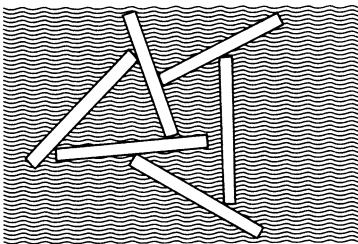
Daraus, und aus der meist in etwa kubischen Form der Kies- und Sandkörner geht hervor, dass in grob- und mittelkörnigen Böden, d.h. Kiesen und Sanden, relativ wenige Berührungstellen zwischen den Körnern vorhanden sind.

In diesen Berührungsstellen wirken bei gegenseitiger Verschiebung der Körner nur Reibungskräfte, und das auch nur, solange als zwischen den Körnern Druckkräfte als Normalkräfte vorhanden sind. Verschwinden die Normalkräfte, so ist auch keine Reibung wirksam. Kiese und Sande lassen sich deshalb mittels Vibrationen verdichten. Diese Art der Struktur wird als Einzelkornstruktur bezeichnet.

Im Gegensatz zu der Einzelkornstruktur von Kiesen und Sanden hängt die gegenseitige Verbundenheit der Körner bei feinkörnigen Böden, und zwar zunehmend mit dem Gehalt an Tonmineralen, nicht mehr nur von den Normalkräften und der Reibung ab. Vielmehr bewirken die Oberflächenladungen der Tonminerale, dass auch beim Verschwinden der Normalkräfte noch eine Festigkeit vorhanden ist. Ebenfalls im Gegensatz zu den Böden mit einer Einzelkornstruktur ist bei den feinkörnigen Böden das Sedimentationsvolumen abhängig von der Wassermenge der Suspension und vom Chemiesmus des Wassers. Bei der Sedimentation können sich zwei grundsätzlich verschiedene Strukturen von feinkörnigen Böden einstellen: die disperse Struktur und die flockulierte Struktur (Bild 1.10).



a



b

**Bild 1.10.** Strukturen bindiger Böden, a: disperse, b: flockulierte Struktur

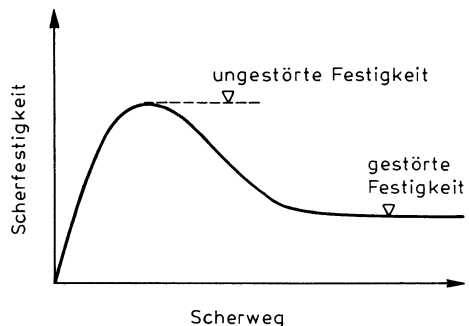
Bei der dispersen Struktur berühren sich die Teilchen (Körner) nicht, weshalb die Scherfestigkeit dieser Struktur kleiner als diejenige der flockulierten Struktur ist. Der gegenseitige Abstand der Teilchen kann zunächst durch Wasserentzug, dann aber nur noch durch grosse Normalkräfte unter ein gewisses Mass vermindert werden. Die disperse Struktur ist stabil.

Anders verhält es sich bei der flockulierten Struktur. Hier berühren sich die Teilchen mit ihren Kanten, weshalb die Scherfestigkeit grösser ist. Da jedoch die flockulierte Struktur nicht stabil ist, kann es zu einem Zusammenbruch der Struktur kommen, welcher mit einer beträchtlichen Festigkeitsabnahme verbunden sein kann (Bild 1.11). Solche Böden nennt man sensitiv, und das Verhältnis

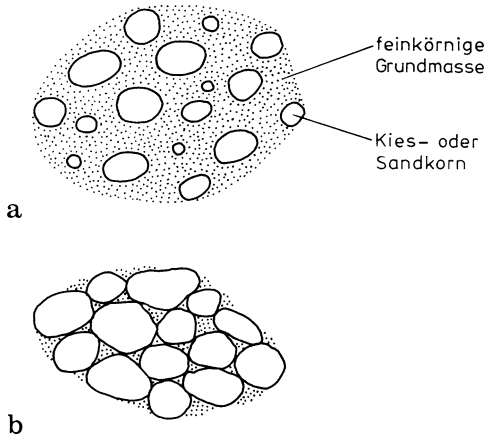
$$\frac{\text{ungestörte Festigkeit}}{\text{gestörte Festigkeit}} = \text{Sensitivität}.$$

Vorbelastete Tone haben eine Sensitivität von etwa 1, während normal konsolidierte Tone Werte von etwa 2 bis 4 aufweisen. Böden mit Sensitivitäten von 4 bis 8 nennt man empfindlich (gegen Strukturzerstörung).

Die primären Strukturen (dispers oder flockuliert) feinkörniger Böden entstehen bei der Sedimentation. Nachherige Änderungen erzeugen sekundäre Strukturen. Solche Änderungen können eintreten durch Austrocknen, Vorbelasten, Auslaugen von Salzen usw. Für die Verhältnisse in der Schweiz und Süddeutschland hat die Vorbelastung durch z.B. einen Gletscher in der Eiszeit die grösste Bedeutung. Durch diese Belastung sind die Teilchenabstände in dispersen Strukturen stark verringert und dadurch



**Bild 1.11.** Festigkeitsverlust beim Zusammenbruch der flockulierten Struktur



**Bild 1.12.** Gemischtkörnige Böden, a: Grobfraktion „schwimmt“ in Feinem; b: Grobfraktion bildet Skelett

ist eine erhöhte Festigkeit erzeugt worden. Im Gegensatz zu einem Boden mit einer Einzelkornstruktur ist diese Festigkeitszunahme auch heute noch, nach Verschwinden der Belastung, erhalten geblieben. Dieser bindige Boden hat also heute eine grössere Festigkeit, als es seiner heutigen Belastung entsprechen würde. Er wird deshalb als überkonsolidiert bezeichnet. Gemischtkörnige Böden enthalten sowohl feinkörnige, bindige als auch grob- oder mittelkörnige Anteile. Ihr Verhalten richtet sich danach, ob die groben Komponenten im Feinen „schwimmen“ oder nicht (Bild 1.12). Ist Ersteres der Fall, so ist der feinkörnige Anteil massgebend für die Eigenschaften des gesamten Bodens. Andernfalls bestimmen die Kies- und Sandkörner, die dann ein Skelett bilden, die Eigenschaften des Bodens. Das „Schwimmen“ der Grobkomponenten im Feinen kann bei allen Kornverteilungskurven angenommen werden, welche wesentlich gestreckter als die W-Kornverteilungskurve verlaufen.

## 1.11 Klassifikation der Böden

Die Klassifikation (Einteilung in Klassen und Benennung) von Böden verfolgt im Wesentlichen zwei Ziele. Einerseits soll durch die Einreihung des Bodens in eine Verhaltensklasse sichtbar gemacht werden, welche Eigenschaften von diesem Boden zu erwarten sind. Andererseits soll im Sinne einer einheitlichen Sprachregelung da-

für gesorgt werden, dass keine Missverständnisse über die Art des Bodens entstehen, wenn die Unterlagen zu anderen Personen gelangen. Das erste Ziel könnte mit einer Vielzahl von Klassifikationskriterien immer vollständiger erfüllt werden. Damit aber das System überschaubar bleibt und damit auch seine Ziele erreichen kann, muss die Anzahl der Klassifikationskriterien beschränkt bleiben.

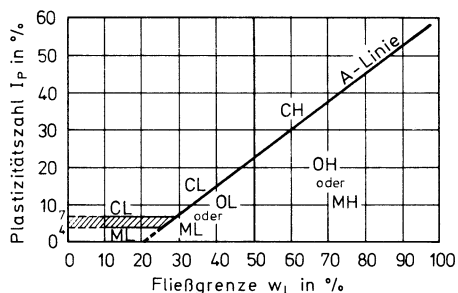
Es gibt viele Klassifikationssysteme für Böden. So wird z. B. die Klassifikation in Deutschland durch die DIN 18 196 geregelt, in der Schweiz durch die Norm SN 670 004-1a und -2a. Hier wird eine stark vereinfachte Klassifikation dargestellt, die weitgehend der USCS-Klassifikation entspricht (Unified Soil Classification System). Die hier dargestellte Klassifikation hat den Vorzug, dass sie wesentlich weniger detailliert (und damit kompliziert) ist, aber doch die wirklich wesentlichen Fragen beantwortet, wie z. B. die Frage, ob ein feinkörniger Boden ein Ton oder ein Silt ist, oder andere.

Die *Klassifikationskriterien* sind folgende Punkte:

- Kornverteilung nach Ausscheiden der Komponenten  $> 60$  mm,
- Plastizitätseigenschaften,
- organische Bestandteile, sofern sie so fein verteilt sind, dass sie die Plastizitätseigenschaften beeinflussen.

Dagegen ist z. B. der Wassergehalt kein Klassifikationskriterium. Die Einteilung in eine Klasse sagt daher nichts über die Zustandsform aus.

$$A\text{-Linie: } I_p = 0,73 \cdot (w_L - 20 \%)$$



**Bild 1.13.** Plastizitätsdiagramm zur labormässigen Klassifikation feinkörniger Böden



Feinkörnige Böden

Böden, welche mehr als 50 Gew.-% Feinbestandteile (Fraktion < 0,06 mm) enthalten, sind *feinkörnig*. Die Einteilung in die, ohne PT, 6 möglichen Klassen geschieht einzig und allein auf Grund der Plastizitätseigenschaften, und zwar mit Hilfe des Plastizitätsdiagrammes (Bild 1.13). Die möglichen Klassen sind:

|                                                                               | Kurzbezeichnung |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Silte ohne oder mit kleiner Plastizität                                       | ML              |
| tonige Silte mit kleiner oder mittlerer Plastizität                           | CL              |
| tonige Silte mit organischen Beimengungen und kleiner Plastizität             | OL              |
| Spezielle Silte mittlerer Plastizität (z. B. Seekreide)                       | MH              |
| Tone oder tonige Silte hoher Plastizität                                      | CH              |
| Tone oder tonige Silte mit organischen Beimengungen und mittlerer Plastizität | OH              |
| Torfe (organisches Material vorherrschend)                                    | PT.             |

Dabei bedeutet L eine Fliessgrenze unter 50 % und H eine Fliessgrenze über 50 %. Die Unterscheidung zwischen den Klassen ML und OL, bzw. MH und OH, kann in manchen Fällen durch die Farbe oder den Geruch usw. möglich sein. Allgemein kann der Einfluss der organischen Beimengungen auf die Plastizitätseigenschaften durch Bestimmung der Konsistenzgrenzen vor (naturfeucht) und nach (wieder angefeuchtet) Ofentrocknung bei 105 °C sichtbar gemacht werden. Enthält der Boden fein verteilte organische Beimengungen, bewirkt die Ofentrocknung eine erhebliche Verminderung der Fließ- und Ausrollgrenze. Organische Beimengungen können auch durch Verfärbungstests mit Natronlauge festgestellt werden.

Grob- und mittelkörnige Böden

Böden, welche mehr als 50 Gew.-% Anteile > 0,06 mm enthalten, sind Kiese oder Sande. Ein Kies liegt vor, wenn vom Anteil > 0,06 mm

mehr als die Hälfte grössere Korndurchmesser als 2 mm aufweist; andernfalls ist der Boden ein Sand.

Enthält ein Kies oder Sand keine oder nur wenig Feinanteile (Grenze: 5 % < 0,06 mm), so wird er als *sauber* bezeichnet. Erfüllt er zudem noch gewisse Bedingungen hinsichtlich Steilheit und Krümmung der Kornverteilungskurve, so wird das Material als gut abgestuft bezeichnet: Klassen GW (sauberer Kies mit guter Kornabstufung) bzw. SW (Sand analog). Andernfalls erfolgt die Zuteilung in die Klassen GP (sauberer Kies mit schlechter Kornabstufung) bzw. SP (Sand analog). Die Bedingungen sind (mit  $C_u$  als Ungleichförmigkeitszahl und  $C_K$  als Krümmungszahl):

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (\text{s. Abschnitt 1.2})$$

$$C_K = \frac{(d_{30})^2}{d_{60}d_{10}},$$

$$\text{GW : } \begin{cases} C_u > 4 \\ 1 < C_K < 3, \end{cases}$$

$$\text{SW : } \begin{cases} C_u > 6 \\ 1 < C_K < 3. \end{cases}$$

Die Ideal-W-Kurve, die Fullerkurve  $p_x = (d_x/d_{\max})^{1/2}$  weist folgende Werte auf:  $C_u = 36$ ,  $C_K = 2,25$ .

Enthält ein Kies oder Sand mehr als 5 Gew.-% Anteile < 0,06 mm, wird er als *siltiger* Kies (Sand) GM (SM) oder als *toniger* Kies (Sand) GC (SC) bezeichnet. Die Entscheidung, ob ein siltiges oder ein toniges Material vorliegt, vollzieht sich nach den Regeln der Klassifikation der feinkörnigen Böden durch entsprechende Untersuchung des feinkörnigen Anteiles des Kiesel (Sandes) gemäss Bild 1.13.

Die 8 Möglichkeiten, einen grob- oder mittelkörnigen Boden einer Klasse zuzuweisen, sind demnach:

|                                                   | Kurzbezeichnung |
|---------------------------------------------------|-----------------|
| Sauberer Kies (Sand) mit guter Kornabstufung      | GW (SW)         |
| sauberer Kies (Sand) mit schlechter Kornabstufung | GP (SP)         |
| siltiger Kies (Sand)                              | GM (SM)         |
| toniger Kies (Sand)                               | GC (SC).        |

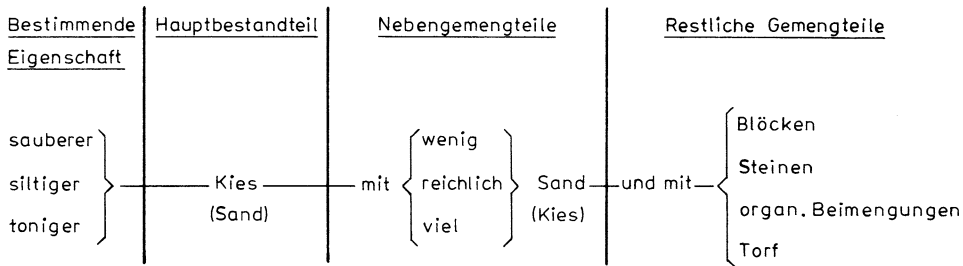


Bild 1.14. Geotechnische Materialbezeichnung für Kiese und Sande

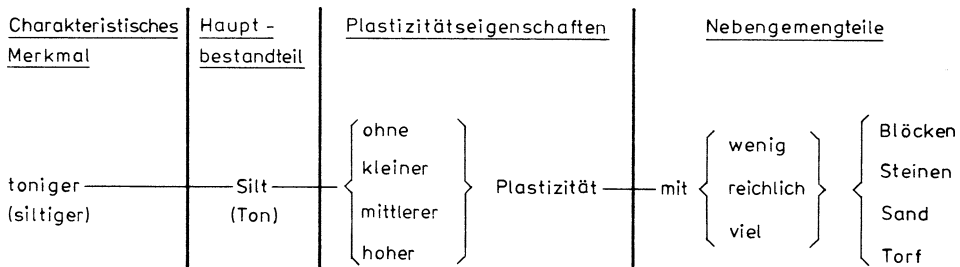


Bild 1.15. Geotechnische Materialbezeichnung für Silte und Tone

Die Norm SN 670 004-2a sieht z.B. innerhalb der siltigen Kiese (Sande) und der tonigen Kiese (Sande) noch eine weitere Unterteilung vor, die bei einem grossen Anteil von Feinbestandteilen zu Doppelklassen-Bezeichnungen führt (z.B. GW-GC). Auf diese Unterscheidung wird hier nicht eingegangen, weil sie im Zusammenhang mit der geotechnischen Materialbezeichnung an sich überflüssig ist.

#### Die Feldmethode der USCS-Klassifikation

Die oben beschriebene Klassifikationsmethode stützt sich auf im Labor erarbeitete Resultate wie Plastizitätseigenschaften und Kornverteilungskurve. Sie wird deshalb auch Labormethode genannt.

Steht kein Labor zur Verfügung, oder müssen die Resultate sehr schnell vorhanden sein, kann die in SN 670 004-1a beschriebene Feldmethode zur Anwendung gelangen. Sie beruht auf Schätzungen der Grösse des Feinanteiles und der Form der Kornverteilungskurve. Die Ermittlung der Plastizitätseigenschaften wird durch eine Schüttelprobe, eine Knetprobe und die Tro-

ckenfestigkeit ersetzt. Mit einiger Übung können auch so sehr zuverlässige Angaben gemacht werden.

#### Die geotechnische Materialbezeichnung

Die Klassifikations-Kurzbezeichnung hat – für sich alleine angegeben – den Nachteil, dass im Prinzip nur der Hauptgemengteil (bei gemischtkörnigem Boden) erscheint. Wenn immer möglich sollte deshalb die Klassifikations-Kurzbezeichnung durch die sogenannte geotechnische Materialbezeichnung ergänzt werden. Der Vorteil dieses Vorgehens liegt darin, dass in vielen Fällen ein wesentlich genaueres Bild vom Boden vermittelt wird.

Die geotechnische Materialbezeichnung wird nach bestimmten Regeln aufgebaut, welche für grob- und mittelkörnige Böden (Bild 1.14) und für feinkörnige Böden (Bild 1.15) verschieden sind. Die quantitativen Angaben für die Nebengemengteile sind wie folgt definiert:

„wenig“: 3 bis 15 Gew.-%,  
 „reichlich“: 16 bis 30 Gew.-%,  
 „viel“: 31 bis 49 Gew.-%.

## 2 Totale und effektive Spannungen

### 2.1 Einführung

Betrachtungen über Spannungs- und Deformationszustände im Boden sind meist nur möglich, wenn man den wechsellastigen Aufbau durch idealisierte Modellvorstellungen ablöst. Wegen des Drei-Phasen-Aufbaues des Bodens (Kapitel 1) ist die Erfassung von Spannungszuständen im Boden erst mit Hilfe des „Effektivspannungs-Konzeptes“ möglich, d.h. durch die Aufteilung der äusseren (totalen) Spannungsänderung  $\Delta\sigma$  in je einen auf das Korngerüst des Bodens ( $\Delta\sigma'$ : effektive Spannungsänderung) und auf das Wasser ( $\Delta u$ : Porenwasserdruckänderung) wirksamen Anteil.

In diesem Werk werden Druckspannungen als positive Spannungen bezeichnet. Hauptspannungen werden  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  benannt, wobei  $\sigma_1$  die grösste und  $\sigma_3$  die kleinste Hauptspannung ist.

Im Raum ist ein ebener Deformationszustand durch das Verschwinden der Deformation in einer der Hauptspannungsrichtungen gegeben, z.B.  $\epsilon_2 = 0$ . Die Deformationen können dann eindeutig in der durch die Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$  definierten Ebene beschrieben werden. Die Hauptspannung in der 2. Richtung ist deformationsfrei. Wir bezeichnen dies als

„Ruhedruck“  $\sigma_0$ , d.h.  $\sigma_2 = \sigma_0$ . Es ist dies diejenige Druckspannung in der Hauptrichtung 2, die gerade zur Verhinderung einer Deformation in dieser Richtung notwendig ist.

### 2.2 Spannungen im elastisch-isotropen Halbraum

Vorbemerkung: In diesem Abschnitt 2.2 wird angenommen, die Porenwasserspannungen seien null, d.h., dass die totalen Spannungen  $\sigma$  hier immer gleich den effektiven Spannungen  $\sigma'$  sind.

Zur Behandlung des einfachen räumlichen Spannungszustandes wird der Boden als ein Halbraum aus elastischem und isotropem Material idealisiert. Dieser Halbraum hat eine unendlich weit ausgedehnte horizontale Oberfläche (die Bodenoberfläche). Das Raumgewicht  $\gamma$  des Materials ist konstant.

In der Tiefe  $z$  unter der Oberfläche ist die vertikale Spannung  $\sigma_z = \sigma_1$  (Bild 2.1) gleich dem Überlagerungsdruck

$$\sigma_z = \sigma_1 = \gamma z.$$

Wegen der Symmetrie gilt weiter  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_2 = \sigma_3$ . Da wegen der Voraussetzungen die Deforma-

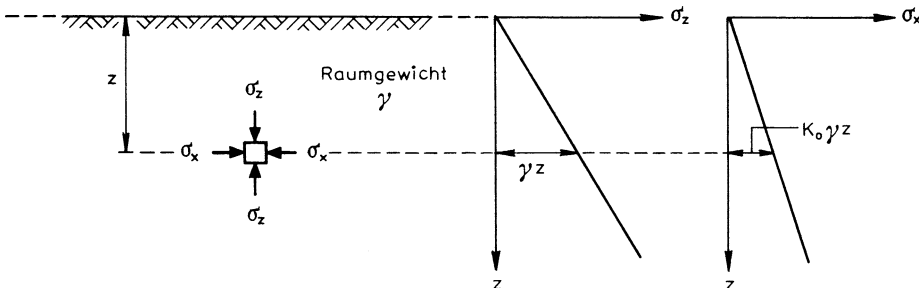


Bild 2.1. Hauptspannungszustand im elastisch-isotropen Halbraum

tionen in diesen Richtungen  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$  sind, gilt

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_0 \text{ (Ruhedruck)} .$$

Mit den in Abschnitt 5.1 gegebenen Gleichungen ergibt sich für den hier vorliegenden einaxialen Deformationszustand

$$\sigma_0 - \frac{1}{m}(\sigma_z + \sigma_0) = 0$$

und daraus

$$\sigma_0 = \frac{1}{m-1} \sigma_z .$$

Der Quotient  $\sigma_0/\sigma_z = K_0$  wird Ruhedruckkoeffizient genannt mit

$$K_0 = \frac{1}{m-1} .$$

Die horizontale Spannung ergibt sich damit zu

$$\sigma_x = \sigma_0 = K_0 \gamma z .$$

Wird die Bodenoberfläche mit einer unendlich weit ausgebreiteten, gleichmässig verteilten Auflast  $q$  belastet (Bild 2.2), so ergibt sich

$$\sigma_z = \gamma z + q , \quad \text{und}$$

$$\sigma_x = \sigma_0 = K_0(\gamma z + q) .$$

Die Spannungsverhältnisse in einem unter dem beliebigen Winkel  $\alpha$  geneigten Schnitt (Bild 2.4)

können mit Hilfe des Mohr'schen Spannungskreises ermittelt werden (Bild 2.3). Er ist der geometrische Ort der Spannungsvektoren  $\sigma_\alpha$  und  $\tau_\alpha$ , dessen konjugierte Spannungen eine Ellipse darstellen (Bild 2.3). Die maximale Grösse der möglichen Schubspannungen  $\tau_\alpha$  ist durch die Scherfestigkeit des Bodens limitiert. Die Spannungen  $\sigma_\alpha$  und  $\tau_\alpha$  in der Einheitsebene  $\alpha$  des Elementes sind aus dem Kräftegleichgewicht zu bestimmen:

$$\sigma_\alpha = \sigma_z \cos^2 \alpha + \sigma_x \sin^2 \alpha ,$$

$$\tau_\alpha = (\sigma_z - \sigma_x) \sin \alpha \cos \alpha .$$

Diese Funktionen sind im Bild 2.4 dargestellt. Es ergibt sich, dass die maximale Schubspannung  $\tau_{\max}$  unter einer Neigung von  $45^\circ$  auftritt. Sie hat die Grösse

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_z - \sigma_x}{2} .$$

Im elastisch-isotropen Halbraum ist

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}(1 - K_0)\gamma z ,$$

und unter der Voraussetzung von  $K_0 = 0,5$  ist beim vorausgesetzten Bodenmodell

$$\tau_{\max} = 0,25\gamma z .$$

Wirkt an OK Boden die Auflast  $q$  (Bild 2.2), so wird

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}(1 - K_0)(\gamma z + q) ,$$

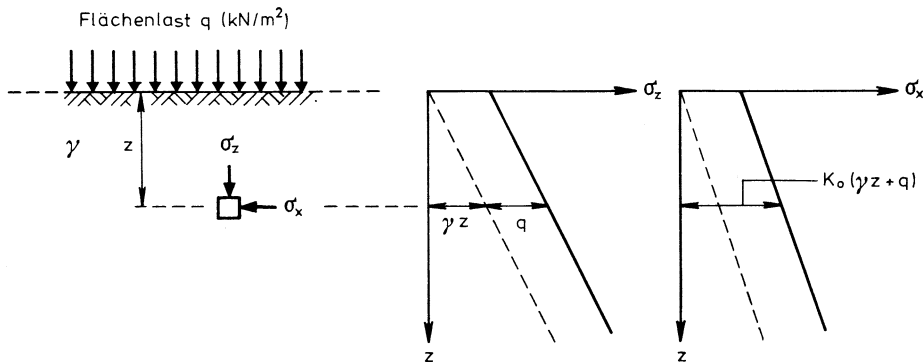


Bild 2.2. Wie Bild 2.1, aber mit unendlich weit ausgehentner Flächenlast  $q$

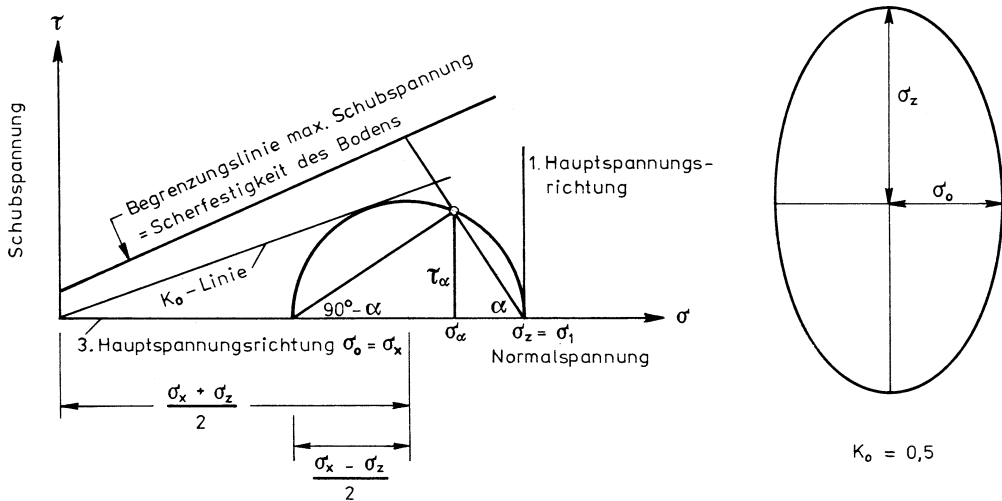
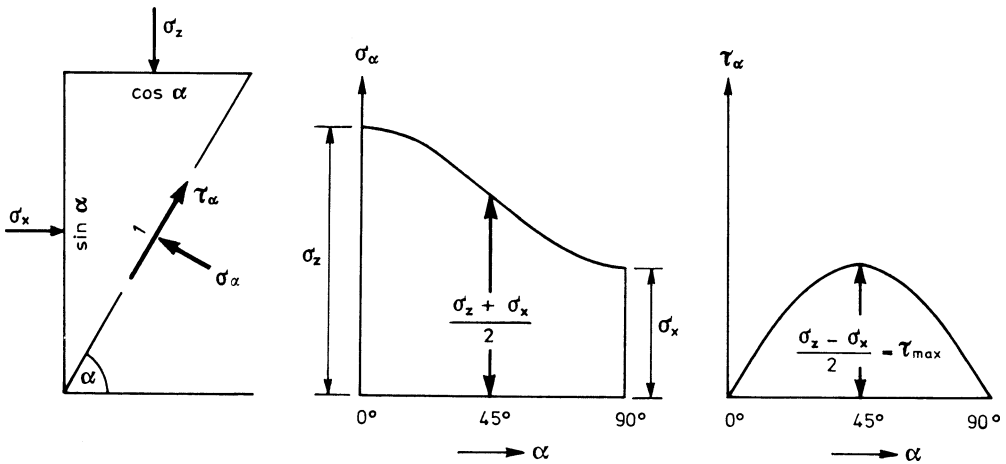


Bild 2.3. Mohr'scher Spannungskreis und Spannungsellipse

Bild 2.4. Spannungen in der unter  $\alpha$  geneigten Ebene

während sich an der Richtung von  $\tau_{\max}$  nichts ändert.

Von einem Ruhedruck-Zustand kann streng nur unter den hier angenommenen Voraussetzungen gesprochen werden. Der wirkliche Spannungszustand im Boden ist von seiner Entstehungsgeschichte her gegeben. Durch die Sedimentation eines Tones im ruhigen Wasser stellt sich bei grösserer ebener Ausdehnung der  $K_0$ -Zustand ein. Die Bestimmung von  $K_0$  im Felde ist sehr kompliziert, ja in der Regel nicht möglich.

## 2.3 Totale Spannung, Porenwasserdruck und effektive Spannung

Wenn der Boden ein Grundwasserträger ist, so sind unter dem Grundwasserspiegel die Poren des Bodens zusammenhängend mit Wasser gefüllt, welches nur der Schwere unterliegt. Der hydrostatische Druck in der Tiefe  $z$  unterhalb des Grundwasserspiegels ist  $u = z\gamma_w$ ; er wirkt

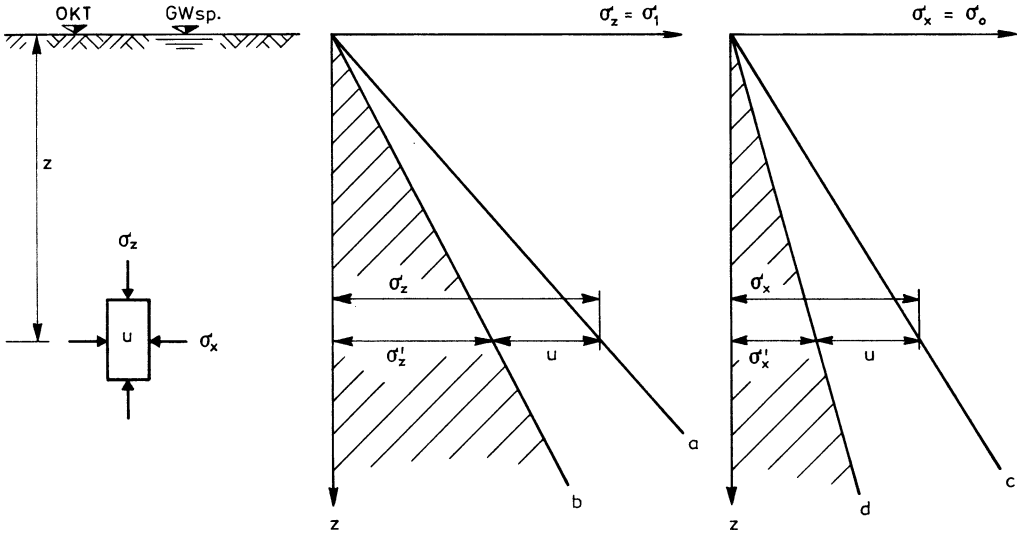


Bild 2.5. Spannungen im isotropen Halbraum, a: totale vertikale Druckspannung, b: effektive vertikale Druckspannung, c: totale horizontale Druckspannung, d: effektive horizontale Druckspannung, u: Porenwasserdruck

in allen Richtungen gleich. Sättigung kann im Boden auch über dem Grundwasserspiegel vorliegen, und zwar durch Kapillarkräfte.

In einem homogenen Boden, in welchem der Grundwasserspiegel mit OK Terrain identisch ist (Bild 2.5), beträgt der totale Überlagerungsdruck  $\sigma_z$  (d.h. das Gewicht aller Materie über dem betrachteten Schnitt) in der Tiefe  $z$

$$\sigma_z = z\gamma_g,$$

wobei  $\gamma_g$  das Raumgewicht des wassergesättigten Bodens ist.

In der gleichen Tiefe wirkt der hydrostatische Wasserdruck, Porenwasserdruck genannt,

$$u = z\gamma_w,$$

der dem totalen Überlagerungsdruck  $\sigma_z$  entgegenwirkt. Die Differenz  $\sigma'_z = \sigma_z - u$  wird als effektiver Überlagerungsdruck oder Korn-zu-Korn-Druck bezeichnet. Im hier betrachteten Fall hat er die Grösse

$$\sigma'_z = \sigma_z - u = z(\gamma_g - \gamma_w) = z\gamma'.$$

Analog ist auch die effektive horizontale Spannung im elastisch-isotropen Halbraum

$$\sigma'_x = \sigma_x - u = K_0\sigma'_z = K_0z\gamma'.$$

Im Zusammenhang mit dem Ruhedruck ist stets von effektiven Spannungen auszugehen. Im elastisch-isotropen Halbraum sind die vertikalen und horizontalen Spannungen Hauptspannungen, d.h.  $\sigma_z = \sigma_1$  und  $\sigma_x = \sigma_3$ . Die Transformation auf ein unter  $\alpha$  geneigtes Element wird wie in Abschnitt 2.2 vollzogen.

Es ist

$$\sigma_1 = \sigma'_1 + u,$$

$$\sigma_3 = \sigma'_3 + u,$$

$$\sigma_\alpha = \sigma'_\alpha + u.$$

Dagegen wird  $\tau_\alpha = \tau'_\alpha$ , da das (nicht fließende) Wasser im Vergleich zum Korngerüst des Bodens nur verschwindend kleine Schubspannungen übertragen kann. Für die Übertragung von Scherspannungen ist somit das Korngerüst allein massgebend (Bilder 2.6, 2.7). Fließendes Wasser übt auf das Korngerüst den Strömungsdruck aus (Kapitel 7).

Der Zusammenhang zwischen totalen ( $\sigma$ ), effektiven ( $\sigma'$ ) und Porenwasserspannungen ( $u$ ) wird meist in der Form

$$\sigma' = \sigma - u$$

gebraucht.