

Erddrucktheorien

Von

Dr.-techn. Árpád Kézdi

Professor an der Technischen Universität
Budapest

Mit 275 Abbildungen



Springer-Verlag

Berlin/Göttingen/Heidelberg

1962

ISBN-13:978-3-642-92839-0 e-ISBN-13:978-3-642-92838-3

DOI: 10.1007/978-3-642-92838-3

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten

Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet,
dieses Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege

(Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

© by Springer-Verlag OHG., Berlin/Göttingen/Heidelberg 1962

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1962

Meiner Frau gewidmet

Vorwort

Die Bedeutung der Erddrucktheorie, die vor zwei Jahrhunderten aus der Kriegswissenschaft des Festungsbaues herauswuchs, wurde im Laufe der technischen Entwicklung immer größer. Es stellte sich heraus, daß sie, weit über die Bemessung der Stützmauer, beim Entwurf jeder Tiefbaukonstruktion, bei jeder Gründung, bei jedem Tragfähigkeitsproblem usw. eine wesentliche und wichtige Rolle spielt. Das brachte mit sich, daß diese Theorien sich bedeutend entwickelten und verzweigten. Auf der heutigen Stufe der Wissenschaft erwies es sich daher als wünschenswert, die Theorien, welchen der Ingenieur heute begegnet, kritisch zusammenzufassen und ihre theoretischen Grundlagen darzulegen.

Bei der Abfassung dieses Buches habe ich dieses Ziel vor Augen gehalten. Aus der außerordentlich reichen Literatur der Erddrucktheorien konnten aber selbstredend nur jene Ergebnisse behandelt werden, die sowohl in theoretischer wie auch praktischer Hinsicht gleichfalls hervorzuheben sind. Vollständigkeit habe ich nicht angestrebt — ich wollte dies auch nicht tun. Das Problem des Erddruckes auf biegsame Spundwände habe ich zum Beispiel nicht erwähnt, zumal die neueste deutsche Fachliteratur auf diesem Gebiet besonders reichhaltig ist. Der Leser wird im Buch alte und neue Erddrucktheorien und -methoden vorfinden, die ich mit fachlicher Hingabe, mit viel Kopfzerbrechen, aber auch mit wahrer Freude beschrieben habe; ich trachtete danach, die Ansätze, die theoretischen Grundlagen in einfacher und übersichtlicher Form zu bringen und den Anwendungsbereich überall klar abzugrenzen. An einigen Stellen wurde bisher unveröffentlichtes Material wiedergegeben, In vielen Fällen beabsichtigte ich auch, die praktische Arbeit mit Hilfe von Tabellen und Diagrammen zu erleichtern.

Es ist mir ein besonderes Bedürfnis, an dieser Stelle den Herren Professoren Dr. E. SCHULTZE, Aachen, und Dr. R. JELINEK, München, aufrichtig zu danken. Sie haben die Thematik mit Kritik durchgesehen und mich zur Abfassung des Manuskriptes ermutigt. Herr Professor SCHULTZE hat meine Arbeit mit Ratschlägen tatkräftig gefördert, einen Teil des Manuskriptes selbst durchgesehen und auch bei der Beschaffung einiger Literaturquellen wertvolle Hilfe gegeben. Herr Professor JELINEK hat mir seine Dissertation liebenswürdigerweise zur Verfügung gestellt. Mein besonderer Dank gebührt dem Herrn Kollegen Dr. STEINFELD, Hamburg, der mir mit Rat und Tat zur Seite stand.

Schließlich möchte ich meinen Dank dem Springer-Verlag für den ehrenenden Auftrag und für die Mühe und Sorgfalt aussprechen, die er auf die Herausgabe des Buches und insbesondere auf die Überbrückung der sprachlichen Schwierigkeiten verwandt hat.

Budapest, im Herbst 1961

Árpád Kézdi

Inhaltsverzeichnis

	Seite
0. Einführung	1
0.1 Besondere Merkmale des Erddruckproblems	1
0.2 Klassifizierung der Erddruckprobleme	7
0.3 Methoden zur Bestimmung des Erddruckes	10
Literatur	12
1. Spannungszustand im Boden.	12
1.1 Wirksame und neutrale Spannungen	12
1.2 Berechnung des Spannungszustandes	19
Literatur	24
2. Der Ruhedruck. Spannungszustand im Halbraum	24
2.1 Vertikale Spannungen im Halbraum	24
2.2 Waagerechte Spannungen im Ruhezustand	29
Literatur	38
3. Die Scherfestigkeit von Böden	38
3.1 Bruchbedingungen	38
3.2 Die Gesetzmäßigkeiten der Scherfestigkeit von Böden	43
3.21 Allgemeine Bemerkungen	43
3.22 Scherfestigkeit im geschlossenen System	46
3.23 Scherfestigkeit im offenen System	48
3.3 Scherfestigkeit von Sanden	49
3.4 Scherfestigkeit von bindigen Böden	54
3.41 Kohäsion der Tonböden	54
3.42 Scherfestigkeit der Tonböden	55
3.5 Praktische Hinweise zur Bestimmung des maßgebenden Scherwiderstandes	58
3.6 Scherdeformationen; Rolle des Zeitfaktors	60
3.7 Das Raumbgewicht der Böden	63
Literatur	65
4. Die allgemeinen Gleichungen des Grenzgleichgewichtes	66
4.1 Gleitflächen und Gleitflächenscharen	66
4.2 Die statische Untersuchung der Gleitflächen	68
4.3 Die KÖRTERSchen Gleichungen	75
4.4 Randbedingungen	81
4.5 Lösungen der KÖRTERSchen Gleichung	84
4.6 Unstetigkeitslinie der Spannungen	86
4.7 Wandbewegung, Gleitflächenausbildung und Erddruck	91
Literatur	97

5. Grenzgleichgewicht des schwerelosen Körpers	97
5.1 Gesetz der Scherspannung auf der Gleitfläche	97
5.2 Schneidefestigkeit des halbplastischen Körpers	101
Literatur	112
6. Grenzgleichgewicht des vollplastischen (reibungsfreien) Körpers	113
6.1 Anwendungsbereich der $\rho = 0$ -Analyse	113
6.2 Theoretische Grundlagen	114
6.3 Bestimmung des Erddruckes und des Erdwiderstandes	122
6.4 Grenzhöhe einer freien Böschung	129
6.5 Tunnel im vollplastischen Halbraum	130
Literatur	132
7. Plastische Grenzzustände des unendlichen Halbraumes	132
7.1 Gleichgewicht nichtbindiger Böden. Theorie von RANKINE	132
7.2 Untersuchung des Halbraumes bei Annahme ebener Gleitflächen	146
7.3 Gleichgewicht eines Erdkeiles im Ruhezustand	148
7.4 Der COULOMBSche Halbraum. Lösung von JELINEK	151
7.5 Gleitflächennetz im COULOMBSchen Halbraum	160
7.6 Grenzgleichgewicht von körnigen Massen, begrenzt durch gebrochene Ebenen	162
Literatur	169
8. Bestimmung der Grenzwerte des Erddruckes und des Erd- widerstandes (Extremalmethoden)	170
8.1 Einleitung. Anwendungsbereich der Grenzwertmethoden	170
8.2 Die COULOMBSche Erddrucktheorie	173
8.3 Bestimmung des COULOMBSchen Extremwertes bei belasteter Erd- oberfläche	198
8.4 Erddruck bei Kohäsionsböden mit ebener Gleitfläche	202
8.5 Die Methode von FELLENIUS zur Untersuchung von Linienbrüchen	205
8.6 Die Methode von RENDULIČ	208
Literatur	214
9. Allgemeine Lösungen auf Grund der Plastizitätstheorie	215
9.1 Theorie von BOUSSINESQ-RÉSAL-CAQUOT	215
9.2 Theorie von SOKOLOWSKI	233
Literatur	243
10. Gleichgewichtsmethoden	243
10.1 Einführung	243
10.2 Randbedingungen	248
10.3 Spannungen an einer Kreisgleitfläche; Hilfsgrößen der Erddruck- berechnung	251
10.4 Untersuchung eines Linienbruches	263
10.5 Untersuchung eines Flächenbruches	264
10.6 Bestimmung des Erddruckes bei beliebigem Drehmittelpunkt	269
Literatur	273

11. Einige Sonderfälle des Erddruckes	274
11.1 Erddruck auf parallele lotrechte Wände	274
11.2 Erddruck auf Rohrleitungen	282
11.3 Silo-Aufgaben	287
11.4 Erddruck und Erdwiderstand auf eine kreiszylindrische Fläche	291
11.5 Verankerungen	307
Literatur	312
Referenzen	313
Namenverzeichnis	318

0. Einführung

0.1 Besondere Merkmale des Erddruckproblems

Als *Erddruck* — im weitesten Sinne des Wortes — werden Kräfte und Spannungen bezeichnet, die entweder in der Grenzfläche zwischen Boden und Baukonstruktion oder aber im Innern der körnigen Masse infolge des Eigengewichtes und der äußeren Belastung auftreten. Seine Größe wird durch die physikalischen Eigenschaften des Bodens, durch die physikalischen Wechselwirkungen in der Grenzfläche, durch die Größe und den Charakter der entstehenden absoluten und relativen Verschiebungen, beziehungsweise Verformungen bestimmt. Sein Wert ist, infolge physikalischer und chemischer Einflüsse, zeitlichen Veränderungen unterworfen.

Auf Grund der obigen, ganz allgemein gehaltenen Definition, ist das Erddruckproblem als eines der grundlegenden und zentralen Probleme der Tiefbaustatik zu betrachten. Die Bemessungen der *Stützmauern*, der *Baugrubenaussteifungen*, der *Spundwände*, die Bestimmung der *Bruchbelastung* des Bodens unter Gründungskörpern der Flach- und Tiefgründung, der Bodendruck und Seitendruck in *Silos*, die Berechnung des *Gebirgsdruckes*, ja gewissermaßen jede Stabilitätsuntersuchung von gestützten oder ungestützten Erdmassen, fordern die Lösung einer bestimmten Erddruckaufgabe. In den verschiedensten Fällen der Erddruckerscheinungen ist die verlässliche Kenntnis der Größe, der Verteilung und der Änderungen des Erddruckes eine wichtige Vorbedingung der wirtschaftlichen Bemessung und Planung.

Das Erddruckproblem nimmt im System der Ingenieurwissenschaften eine eigentümliche Stellung ein. Seit Jahrhunderten beschäftigt es die Forscher. Hervorragende Geister der theoretischen Physik und Mechanik werden davon gefesselt; seine streng theoretische Untersuchung geht beispielsweise der Gestaltung des Bemessungsverfahrens von auf Biegung beanspruchten Trägern beträchtlich voran und hat immer eine Anziehungskraft auf Mathematiker und Physiker ausgeübt. Auch heute noch vergeht selten ein Jahr ohne die Veröffentlichung einer neuen Erddruckberechnung. Die Lösungsmethoden, die Art und Weise der Annäherung des Erddruckproblems waren wohl im Laufe der Zeit beträchtlichen Wandlungen unterworfen, die grundlegende Frage ist aber heute wie früher dieselbe: *Welcher Zusammenhang besteht zwischen den Bewegungen einer teilweisen oder völlig eingebetteten Konstruktion und den dadurch in den Grenzflächen hervorgerufenen Kräften und Spannungen?* Dieses große Interesse ist durch die zentrale Stellung des Erddruckproblems im Tiefbau völlig begründet.

Ein weiterer Grund, der die theoretische Behandlung der Erddruckfrage immer wieder veranlaßt, besteht gewiß darin, daß die *experimentelle Untersuchung* des Erddruckes auf recht erhebliche, in gewissem Sinne sogar auf grundsätzliche *Schwierigkeiten* stößt. Die grundsätzliche Schwierigkeit — genau wie in der modernen Atomphysik (s. z. B. HEISENBERG, 1955)¹ — liegt darin, daß *die Messung selbst die zu bestimmende Größe beeinträchtigt*: die Messung selbst ist ein Eingriff in die Spannungsverhältnisse, so daß diese gänzlich verändert werden. Bei der Mehrzahl der üblichen Apparate, die zur Bestimmung von Kräften und Spannungen besonders in der letzten Zeit konstruiert wurden, ist Voraussetzung der Messung, daß gewisse Verschiebungen oder Verformungen in der Konstruktion und im Boden auftreten, die aber dann das gewünschte Spannungsbild verfälschen. Diese Schwierigkeiten haben sicherlich dazu beigetragen, daß die Theorie auf dem Gebiete des Erddruckes sich mehr oder weniger frei entfalten konnte und die unbarmherzig zwingende Kraft der Versuchsergebnisse die freie Entwicklung von Theorien nicht beschränkte.

Die Erddrucktheorien setzen größtenteils auch heute noch ein weitgehend *idealisiertes Medium* voraus; ein große Anzahl der Forscher fixiert nur einige grundlegende bodenphysikalische Kennwerte — und diese werden als echte Konstanten angenommen — und beschäftigt sich nicht mit vielen tatsächlichen, die Größe des Erddruckes bestimmenden Eigenschaften des Bodens. Dieser Mangel wurde erst durch die Entwicklung der Bodenmechanik in den letzten Jahrzehnten beseitigt; es besteht aber leider auch heute noch eine ziemlich breite „klaffende Fuge“ zwischen den Ergebnissen der bodenphysikalischen Forschung und deren Nutzbarmachung auf dem Gebiete der Erddrucktheorien. Der Grund dafür ist wahrscheinlich, daß die allgemein gültigen Gesetze zwischen Spannungen und Verformungen, also die Spannungsdehnungsgesetze der Böden, noch unbekannt sind. Zwar ist der Fall bei den anderen Baumaterialien ähnlich, doch konnten Hypothesen aufgestellt werden, die innerhalb eines gewissen Geltungsbereiches verläßliche und als genau anzusehende Ergebnisse liefern.

Eine weitere Eigenart der Erddrucktheorien besteht darin, daß sie schon von altersher die Untersuchung und zahlenmäßige Behandlung des *Grenzgleichgewichtes* bezweckten. Dadurch gingen sie einigermaßen der Lösung der verschiedensten statischen und Festigkeitsfragen voran: auf dem Gebiete der Stahl- und Stahlbetonkonstruktionen beispielsweise wurden Bemessungsmethoden auf Grund der Bestimmung der Grenztrag-

¹ Im Text des Buches werden die Quellen der Literatur nur durch den Namen des Verfassers und das Erscheinungsjahr des zitierten Werkes angegeben. Ausführliche bibliographische Angaben sind im Literaturverzeichnis (S. 313 ff.) zu finden.

fähigkeit erst in der letzten Zeit entwickelt. Das soll aber keineswegs heißen, daß die Erddrucktheorien den anderen Theorien der angewandten Mechanik überlegen sind; vielmehr ist diese Tatsache eine Folge des fehlenden allgemeinen Festigkeits- und Verformungsgesetzes. Unter diesen Umständen läßt sich der Grenzzustand relativ einfacher definieren und die Frage versuchstechnisch leichter behandeln; auf Grund des Bruchzustandes wurden daher die verschiedenen Theorien aufgebaut.

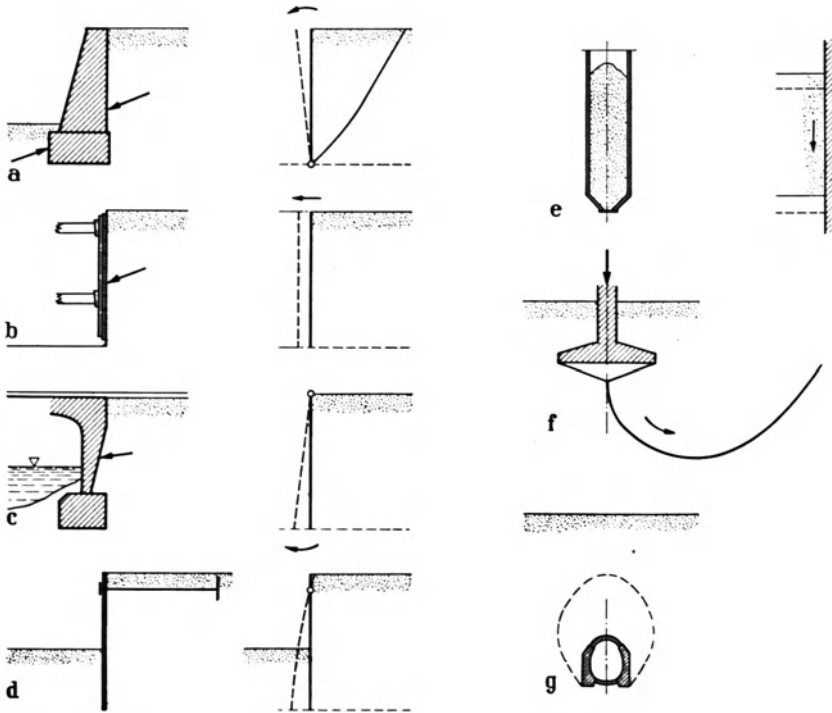


Abb. 0.1 a—g. Die Ausbildung des Erddruckes als Funktion der Wandbewegung

a) Stützmauer; Drehung um den unteren Eckpunkt; b) Baugrubenaussteifung; die Streben drücken sich zusammen; waagerechte Verschiebung; c) Widerlager einer Rahmenbrücke; Drehung um den oberen Eckpunkt; d) Verankerte Spundwand; Durchbiegung; e) Silo; senkrechte Verschiebung; f) Streifenfundament; Grundbruch, Ausbildung einer Gleitfläche; g) Tunnel; Auflockerung der umgebenden Erdmasse

Die verschiedenen Fälle des Erddruckes im Zusammenhang mit den Ingenieurkonstruktionen werden in Abb. 0.1 a—g durch einige Beispiele veranschaulicht. Der entscheidende Unterschied zwischen diesen Fällen läßt sich dadurch kennzeichnen, daß *die absoluten und relativen Bewegungen* des Bodens und der stützenden bzw. gestützten Konstruktion, und folglich die Ausbildung der Erddruckspannungen, immer anders ausfallen. Das stützende Element, eine vertikale Wand, kann beispiels-

weise in den einfachsten Fällen eine *Drehung* um den unteren oder oberen Endpunkt ausführen oder sie erleidet eine horizontale *Verschiebung*, bleibt also immer parallel mit sich selbst. Weiter kann eine relative *vertikale Bewegung* zwischen Wand und Boden stattfinden — beispielsweise eine Stützmauer setzt sich gleichmäßig oder die untere Öffnung eines Silos wird freigemacht. Der Erddruck auf *sich durchbiegende*, relativ biegsame Spundwände ist eine Funktion der Art und Weise der Ausführung; unter belasteten Grundbauwerken treten auf gewissen Flächen im Erdinnern infolge der allmählichen Einsenkung *Erddrücke* auf. Oder wenn wir in einem rolligen Boden einen Stollen bauen, lockert sich ein Teil des umgebenden Bodens auf und die provisorisch oder endgültig eingebauten Elemente der Sicherung erhalten einen *First- und Ulmen-Druck*. All diese Kraftwirkungen und Verformungen werden vorwiegend durch das *Eigengewicht* des Bodens hervorgerufen. Da die Art und Abstützung der Konstruktion einen gewissen *Zwang* schafft, ist der Erddruck das Ergebnis der Wechselwirkung dieser beiden Faktoren. Der Umstand, daß die wichtigsten auftretenden Kräfte *Massenkräfte* sind, macht die Gleichungen des Gleichgewichtes *inhomogen* und dadurch schwer lösbar.

Infolgedessen ist das Problem des Erddruckes *statisch vielfach unbestimmt*; das Spannungsbild wird durch den *Charakter und die Größe der Verformungen und Verschiebungen* bestimmt. Als Folge der anwachsenden äußeren Kräfte bzw. Verschiebungen tritt schließlich ein *Bruchzustand*, also ein *Grenzzustand des Gleichgewichtes* auf. Wie erwähnt, wird die Größe des Erddruckes bei den meisten Theorien unter Voraussetzung dieses Grenzzustandes untersucht.

Die statische Unbestimmtheit besteht aber auch in einem anderen Sinn. Der Druck wird durch ein *körniges Material* erzeugt, und die Kräfte, die *zwischen den Einzelkörnern* auftreten, können nicht bestimmt werden, sie bleiben immer unbekannt. Und hier können wir wieder eine Ähnlichkeit mit der modernen Physik entdecken. So wie die Grundgesetze der Atomphysik — obwohl sie sich in mathematische Form kleiden lassen —, im wesentlichen statistische, stochastische Gesetze sind, welche die im kleinen unregelmäßigen und völlig zufälligen Bewegungen der Bausteine der Atome und die sich auch in unvorstellbar kleinen Bruchteilen einer Sekunde verändernden Kraftwirkungen in Formeln mit statistischer Gültigkeit ausdrücken, so sind die Makro-Gesetzmäßigkeiten des Spannungsbildes, die durch die Kraftwirkungen zwischen den individuellen Teilchen entstehen, feststellbar; die Aufgabe läßt sich, wenigstens den Ansprüchen des Ingenieurbauwes entsprechend, brauchbar lösen.

Diese Eigenart der Erddruckprobleme zeigt Abb. 0.2a u. b. Die üblichen Baumaterialien können, wenn wir die molekulare Struktur außer acht lassen, vom Standpunkt der makroskopischen Festigkeitsunter-

suchung als homogen angesehen werden, der Begriff des differentialen Elementes läßt sich in der üblichen Weise anwenden.

Die Böden sind dagegen *disperse Systeme*. Kraftwirkungen können nur in den Berührungspunkten der Körner auftreten. Wird also ein beliebiger Schnitt gelegt, so wird die Spannungsverteilung nie stetig. In den Berührungspunkten treten große Spannungen auf; den Poren sind sie dagegen Null (Abb. 0.2a). Die Kraftübertragung folgt in Sanden und Kiesen sogar gewissen Linien: die sich berührenden Körner in diesen Linien erhalten große Spannungen, die Körner außerhalb dieser Linien

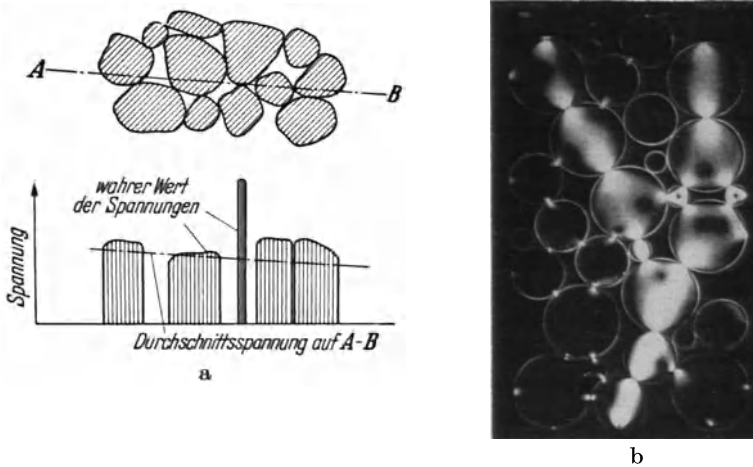


Abb. 0.2a u. b

a) Spannungen im Innern körniger Massen; b) Kraftübertragungslinien, sichtbar gemacht durch kreispolarisiertes Licht (Laboratorium voor Grondmechanica, Delft, 1960)

bleiben dagegen spannungsfrei. Die Kraftübertragungslinien — eigentlich die Richtungen der Hauptspannungen — konnten durch eine geschickte Versuchstechnik sichtbar gemacht werden (Abb. 0.2b; LMG, Mededelingen, 1960).

In Anbetracht dieser Spannungsverteilung dürfen wir also im Boden nur in einer hinreichend großen Schnittfläche einen *Mittelwert* der Spannungen berechnen, der diese Spannungsspitzen ausgleicht und sich zur Untersuchung des Körnerhaufens eignet. Sprechen wir daher von Spannungen im Boden, dann verstehen wir darunter den statistischen Mittelwert von Spannungen über eine gewisse Entfernung auch in dem Falle, wenn wir zu ihrer Berechnung die Infinitesimalrechnung heranziehen.

Die Porenräume zwischen den Einzelkörnern sind im allgemeinen mit *Wasser* und *Gas* gefüllt. Wollen wir also den Begriff der Spannung auf den Boden anwenden, dann müssen wir zwischen zwei Arten von

Spannungen scharf unterscheiden: es können Spannungen zwischen den Körnern und Spannungen im Medium, welches die Poren ausfüllt, auftreten. Befindet sich das Wasser in den Poren in *Ruhe*, dann lassen sich die Probleme des Gleichgewichtes und der Verformungen auf Grund der obigen Erwägungen mit den üblichen Methoden der Mechanik der festen Körper lösen. Ist dagegen das Wasser in den Poren *in Bewegung*, dann müssen wir vorerst dessen Spannungszustand kennen, der unter Anwendung der Gesetze der *Hydraulik* untersucht werden kann. Auch die im allgemeinen nicht überschaubare Rolle der *Zeit* wird in den Erddruckproblemen durch die Wechselwirkungen der verschiedenen Phasen einen wichtigen Platz einnehmen. Die Änderungen in den die festen Körner umgebenden Adsorptionshüllen, die Spannungen im Porenwasser, die Bewegung des Wassers usw. verursachen, daß der Spannungszustand auch bei gleichbleibender äußerer Belastung *eine Funktion der Zeit* ist. Dadurch treten manchmal *kritische Zeitpunkte* ein, in denen sich die Konstruktion besonders gefährdet ist. Auch die Faktoren, die die Festigkeit des Bodens beeinflussen, sind meistens zeitbedingt.

Zu den Schwierigkeiten der Erddruckfrage zählt noch der Umstand, daß die Charakterisierung der physikalischen Beschaffenheit der Böden eine große Anzahl von *Kennziffern* erfordert. Wollten wir die Lösung der verschiedenen Probleme der Stabilität und Deformation mit Berücksichtigung all dieser Kennzahlen auf Grund der wahren Bodeneigenschaften angeben, dann würden wir sehr verwickelte und schwierige Verfahren festlegen und anwenden müssen; der benötigte Arbeitsaufwand stünde aber nicht im Einklang mit der erreichten Genauigkeit. Der Boden ist ja *inhomogen* und *anisotrop*, und die durch Versuche bestimmten bodenphysikalische Kennziffern sind nur *statistische Mittelwerte*; dabei sind die *Modellgesetze* der bodenmechanischen Laborversuche nur teilweise bekannt.

Einer der wichtigsten Grundsätze der Bodenmechanik und der Erdbaustatik ist daher die *Klarheit* und *Einfachheit* der theoretischen Methoden geworden. Die verwickelten Vorgänge der Natur können nur mit Hilfe mechanischer Modelle unter vereinfachenden Annahmen behandelt werden; so sind die Theorien der Bodenmechanik vom Gesichtspunkt der Praxis von demselben beschränkten Wert wie die Arbeitshypothesen in den anderen Zweigen der Ingenieurwissenschaften: sie sind *Hilfsmittel* beim Planen und *Wegweiser* bei der Beobachtung der in Bau stehenden oder fertigen Bauwerke und bei der Deutung und Auswertung der Erfahrungen. Die Richtigkeit dieser Arbeitshypothesen soll laufend durch Messungen und Beobachtungen im Felde kontrolliert werden, man muß die Ansätze und Annahmen nötigenfalls *unterwegs* modifizieren. Die Theorien aber, die auf richtigen und den Umständen des untersuchten Falles entsprechenden Annahmen beruhen, sind in ihren

Ergebnissen nicht blind als bare Münze zu nehmen; sie müssen vielmehr kontrolliert und dem Urteil des gesunden Menschenverstandes unterworfen werden. Daneben erweitern die durch Versuche bestätigten und die Erfahrungen berücksichtigenden Theorien den Kreis unserer Kenntnisse, sie weisen auf Zusammenhänge, innere Gesetzmäßigkeiten oder Widersprüche hin, die der unmittelbaren Erfahrung unzugänglich sind und durch Versuche nur sehr kostspielig oder sogar irreführend untersucht werden können. Die Theorien erleichtern die Untersuchung und den Überblick über die Einflüsse der bodenphysikalischen Konstanten und die Veränderungen derselben. Auch die Weiterentwicklung der Bodenmechanik ist ohne die Anwendung der Theorien unvorstellbar: die verlässlichen Theorien können nur im Probefeuher der Praxis, der Erfahrungen ausgewählt werden; nur so können wir die Ausarbeitung besserer Näherungen vorbereiten.

0.2 Klassifizierung der Erddruckprobleme

Die Erddruckprobleme werden in *drei Hauptgruppen* eingeteilt.

In die *erste Gruppe* reiht man die Fälle ein, wo sich die Erdmasse, deren Eigengewicht die Drücke hervorruft, im *Ruhezustand* befindet; es treten weder Verschiebungen noch Verformungen auf, die zur Mobilisierung der Scherspannungen führen würden. Diese Bedingung ist streng genommen nur im unendlichen, bewegungslosen Halbraum erfüllt; die grundlegende Aufgabe ist also die Untersuchung dieses Spannungszustandes (Abb. 0.3). Diese Frage ist vornehmlich von theoretischem Interesse und bildet einen *Ausgangspunkt* zur Lösung der weiteren, mit Verformungen verknüpften Probleme. In einigen Fällen sind aber auch praktische Anwendungen möglich.

Bei den Fällen der *zweiten Gruppe* ist die *waagerechte Kraftwirkung* in der Erdmasse vorwiegend und wesentlich. Hierher zählen wir die Erddrücke auf Stützmauern, Spundwände, Baugrubenaussteifungen, Silos usw. Die stützende Konstruktion führt in diesen Fällen immer *Bewegungen* aus; infolge dieser Bewegungen treten im allgemeinen *Volumenänderungen* im Boden auf. Je nachdem, ob diese Volumenänderungen eine *Expansion* oder aber eine *Kompression* verursachen, bezeichnen wir die Kraftwirkung als *Erddruck* bzw. als *Erdwiderstand*. Das bekannteste Beispiel für beide Fälle bildet die sich um ihren unteren Eckpunkt drehende starre Stütz wand. Solange die Wand sich im

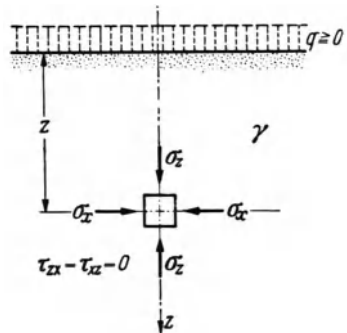


Abb. 0.3. Spannungszustand im unendlichen Halbraum; der Boden befindet sich im Ruhezustand

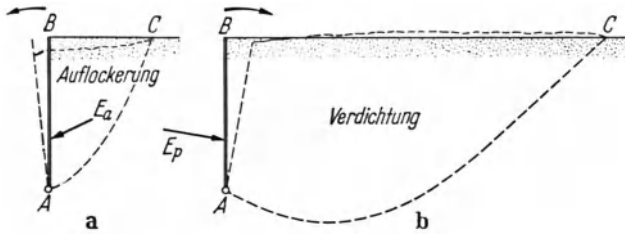


Abb. 0.4 a u. b. Beispiel für die Ausbildung des Erddruckes und des Erdwiderstandes
 a) die Stützmauer kippt nach außen, der Boden lockert sich auf und die Mauer erhält einen Erddruck;
 b) die Stützmauer wird gegen den Boden gedrückt; dieser wird verdichtet und übt einen Erdwiderstand aus

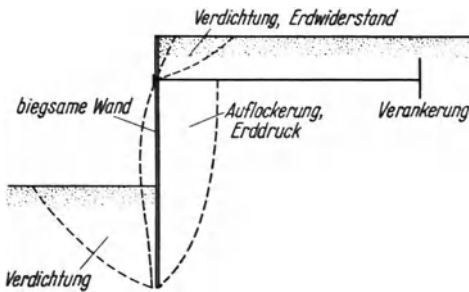


Abb. 0.5. Zusammengesetztes Erddruckproblem. Der gestützte Boden erfährt teils eine Auflockerung, teils eine Verdichtung; an der einen Stelle tritt Erddruck, an der anderen Erdwiderstand auf

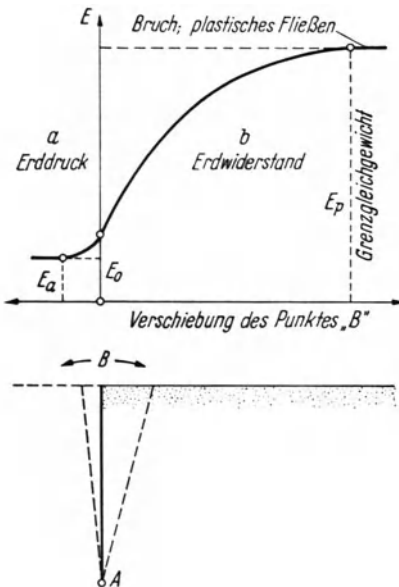


Abb. 0.6. Zusammenhang zwischen Wandverschiebung und Erddruck

Ruhezustand befindet, haben wir den Fall des Ruhedruckes; bei einer Drehung um den Punkt A (Abb. 0.4 a u. b) tritt im Boden eine Verformung auf. Kippt die Wand nach außen, dann entsteht in der gestützten Erdmasse eine *Auflockerung*, auf die Wand wirkt der *Erddruck*. Wird dagegen die Wand durch eine äußere Kraft gegen den Boden gedrückt, dann wird der Boden zusammengedrückt, und es entsteht ein *Erdwiderstand* (*passiver Erddruck*).

Es gibt Fälle, wo eine *Expansion* in einem Teil des Bodens auftritt und gleichzeitig eine *Zusammendrückung* an anderen Stellen erfolgt. Die wirkende Kraft ist also teils ein Erddruck, teils ein Erdwiderstand. Es handelt sich hier um einen zusammengesetzten Fall. Ein Beispiel dafür ist in Abb. 0.5 dargestellt: der untere Teil einer verankerten Spundwand bewegt sich infolge der ungenügenden Einspannung

nach außen, hier tritt also Expansion und dadurch Erddruck auf. Ist die Verankerung vollkommen fest, so muß sich der obere Teil der Wand wegen seiner Biogsamkeit gegen den Boden bewegen. Dort tritt also eine Verdichtung auf, und auf die entsprechende Länge der Wand wirkt ein Erdwiderstand. Die Größe der Kraft ist in jedem Falle bis zum Erreichen eines Grenzzustandes die Funktion der erfolgten Verschiebung. Nach dem Eintritt dieses Grenzzustandes erfolgt ein *Bruch*, ein *plastischer Grenzzustand*. Der Zusammenhang zwischen der Größe der Verschiebung und der Resultierenden der entstehenden Kräfte ist für die Beispiele der Abb. 0.4a u. b in Abb. 0.6 dargestellt. Es ist also wichtig, festzuhalten, daß *infolge einer Auflockerung ein Erddruck, infolge einer Verdichtung ein Erdwiderstand entsteht*.

In die *dritte Gruppe* der Erddruckprobleme gehören die Fälle mit überwiegend senkrechter Kraftwirkung: hierher gehören die Probleme der *Gründung*, die Untersuchung der Spannungen, Verformungen, des Grenzgleichgewichtes und der Bruchbelastung des Bodens, der auf einer waagerechten Fläche durch senkrechte Kräfte beansprucht wird. Weitere Probleme dieser Gruppe sind der Bodendruck in *Silos*, die Bestimmung der Kräfte auf einer sich bewegenden Bodenplatte und die Untersuchung der Kräfte, die auf *eingebettete Bauwerke* wirken. Auch in dieser Gruppe können wir den aktiven und den passiven Fall unterscheiden, je nachdem, ob eine Auflockerung oder eine Zusammendrückung des Bodens auftritt; es kann aber auch der zusammengesetzte Fall vorkommen. Auf die Größe, Richtung und Verteilung des Erddruckes übt selbstverständlich die Größe und der Charakter der Belastung auf der freien Oberfläche des Bodens einen Einfluß aus. Diese Belastung kann die Ausbildung der Auflockerung, wie auch die der Zusammendrückung, begünstigen.

Neben dem Eigengewicht des Bodens kann sich als weitere Massenkraft in jedem Falle der *Strömungsdruck* des sich bewegenden *Grundwassers* superponieren. Er kann die Richtung der Massenkraft ablenken. Die Wasserströmung kann im Boden ohne Volumenänderung erfolgen, so daß wir es auf Grund der üblichen Annahmen mit einer *Potentialströmung* zu tun haben; diese Wasserbewegung kann aber auch von einer Auflockerung oder Zusammendrückung begleitet sein oder tritt gerade infolge einer solchen Volumenänderung auf.

Die Spannungen, die durch diese Wasserbewegung hervorgerufen werden, müssen wir in jedem Falle gesondert berücksichtigen und ihre Wechselwirkung mit dem Erddruck untersuchen.

Wir unterscheiden endlich *ein-, zwei- und dreidimensionale Erddruckprobleme*. Ist der Spannungszustand in parallelen Linien gleich, dann haben wir ein eindimensionales Problem; zweidimensional ist das Problem, wenn diese Gleichheit in parallelen Ebenen besteht. In einem

dreidimensionalen Problem gibt es keine bevorzugte Richtung. Einen besonderen Platz in der letzten Gruppe nehmen die *achsensymmetrischen Probleme* ein.

0.3 Methoden zur Bestimmung des Erddruckes

Im Laufe der geschichtlichen Entwicklung versuchte die Forschung von vielen Seiten und mit verschiedenen Methoden der Lösung des Erd-druckproblems näherzukommen. Abgesehen von den Verfahren, die nicht weiterentwickelt wurden, können wir heute die üblichen theoretischen Methoden in *vier Gruppen* einteilen.

1. Der Idealfall wäre ein Verfahren, wodurch die Spannungen, Verformungen und Verschiebungen in sämtlichen Punkten des Bodens auf Grund eines allgemein gültigen Spannungsdehnungsgesetzes und unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen bestimmt werden könnten. Da aber ein solches Gesetz, wie oben erwähnt, noch unbekannt ist, verfügen wir über ein solches Verfahren nicht. Jedoch müssen wir die Verfahren der *Elastizitätslehre* hier einordnen, da sie grundsätzlich auf die obigen Fragen eine eindeutige Antwort geben. Die beiden Gleichgewichtsbedingungen des Volumenelementes im Falle des ebenen Problems und die *Verträglichkeitsbedingung* — die die Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes voraussetzt — genügen zur Bestimmung der drei unbekanntenen Spannungskomponenten und der Verschiebungen. Dieses Verfahren ist im Prinzip vollkommen einwandfrei. Da aber der Boden besonders in der Nähe des plastischen Zustandes dem Hooke'schen Gesetz nicht einmal annähernd folgt, ist die Anwendung dieser im allgemeinen sehr verwickelten und exakt nur für wenige spezielle Fälle ausgearbeiteten Verfahren auch vom theoretischen Standpunkt aus nicht begründet. Die Lösung wird meistens durch willkürliche Ansätze und radikale Vereinfachungen ermöglicht. Ein weiterer Nachteil dieses Verfahrens ist, daß die Lösung keine Angabe über die Sicherheit gegen Bruch enthält.

2. Die Theorien der *Plastizitätslehre* bestimmen die Spannungen im Innern des Bodens auf Grund des Ansatzes, daß *die Bedingung des plastischen Bruches* entweder im ganzen Boden oder innerhalb eines gewissen Bereiches in sämtlichen Punkten erfüllt ist. Innerhalb dieser Bereiche herrscht also ein *Bruchzustand*. Zur Bestimmung der drei Spannungskomponenten des ebenen Spannungszustandes verfügen wir auch hier über drei unabhängige Gleichungen, nämlich die beiden Gleichgewichtsgleichungen und die Bruchbedingung. Dieses System von Differentialgleichungen läßt sich auf eine einzige Differentialgleichung reduzieren, deren Charakteristiken stetige und differenzierbare Kurvenscharen, die sog. *Gleitflächen*, sind. Diese Methode dient auch zur Unter-