

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 123/124 (1944)
Heft: 5

Artikel: Erdbaumechanische Probleme im Lichte der Schneeforschung
Autor: Haefeli, Rob.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-53880>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

INHALT: Erdbaumechanische Probleme im Lichte der Schneeforschung. — Das Wärmeppump-Ergänzungswerk des Fernheizkraftwerk (FHK) der E.T.H. — Zum Ausbau unserer Wasserkräfte. — Wettbewerb für ein Kirchgemeindehaus in Wallisellen (Zürich). — Das Elektrifizierungsprojekt der Linie Paris-Lyon der S.N.C.F. — Mitteilungen: Das Weibel'sche Schweißverfahren im Flugzeugbau. Die industrielle Gas-

verwendung. Eine Schiffahrt-Signalstation im Basler Rheinhafen. Trolleybus- und Omnibus-Anhänger mit Vierradlenkung. Persönliches. — Nekrologie: Walter Mertens. Maurice Fatio. Max Scherrer. — Wettbewerbe: Verbindung der Rhoneschiffahrt aus der Stauhaltung Verbois mit dem Genfersee. — Literatur.

Vortrags-Kalender.

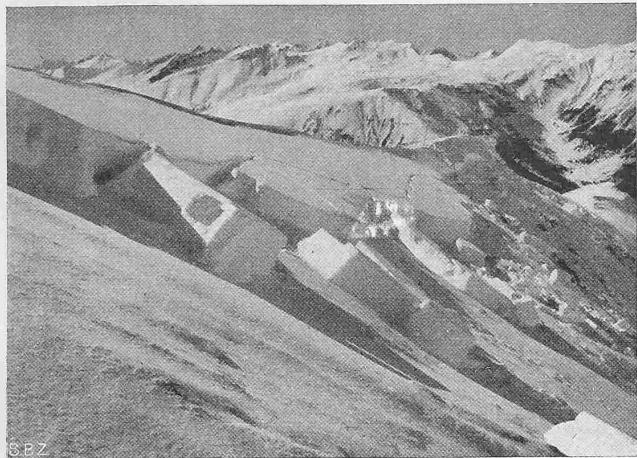


Abb. 15. Anbruch einer Schneebrett-Lawine. Phot. Meerkämper, Davos Bew. 6057

Erdbaumechanische Probleme im Lichte der Schneeforschung

Von P.-D. Ing. Dr. ROB. HAEFELI, Chef der Erdbauabteilung der
Versuchsanstalt für Wasserbau an der E. T. H. Zürich (Schluss von S. 44)

4. DIE ZERREISSFESTIGKEIT, KOHÄSION UND SCHERFESTIGKEIT VON LOCKERGESTEINEN IM ZUSAMMENHANG MIT PRAKTIKISCHEN AUFGABEN

Die Zerreissfestigkeit kann physikalisch als Mass der Kohäsion betrachtet werden. Die *Kohäsion*, bedingt durch Kapillar- und Haftkräfte, ist eine jener grundlegenden Eigenschaften, die das gesamte Verhalten der Lockergesteine in ausschlaggebender Weise beeinflussen. Man denke nur an die ganz verschiedenen Böschungsnieigungen des natürlichen Geländes, die in erster Linie von der Kohäsion des Materials abhängen.

Beim Schnee führt eine zunehmende Durchfeuchtung im Frühling zur Abnahme der Kohäsion und Zerreissfestigkeit gewisser Schichten und damit zur Bildung von späten Schneebrettlawinen (Abb. 15). Anderseits hat das Austrocknen von Gehängelehm im Sommer Schwindrisse zur Folge, in die die ersten schweren Herbststregen eindringen und durch ihre festigkeitsvermindernde Wirkung Erdschlitze veranlassen [12]. Im kontinentalen Klima besteht die Gefahr der Staubbildung und Windverfrachtung von Lockergesteinen infolge Kohäsionsverlust. Die einseitige Mechanisierung der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitungsmethoden bewirkte z. B. in den Vereinigten Staaten von Nordamerika eine vermehrte Austrocknung der Ackerkrume, wodurch ein grosser Teil des zur Verfügung stehenden Kulturlandes der Versteppung anheimfiel.

Die Kohäsion wird erdbaumechanisch definiert als die bei fehlendem Normaldruck vorhandene Scherfestigkeit c (Abb. 16). Bei Lockergesteinen unterscheidet man zwischen der «echten» Kohäsion, die unter Wasser erhalten bleibt, und der «unechten», die unter Wasser verloren geht, weil sie nur durch die Kapillarspannungen bedingt ist. Um den bedeutenden Einfluss der Kohäsion auf den Winkel der inneren Reibung im Bereich kleiner Drücke zu illustrieren, ist in Abb. 16 durch die Linie 1 die Ab-

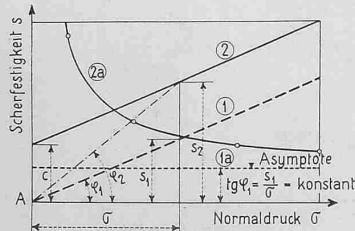


Abb. 16. Scherfestigkeit u. inn. Reibung in Funktion des Druckes, 1 ohne Kohäsion, 2 mit konst. Kohäsion

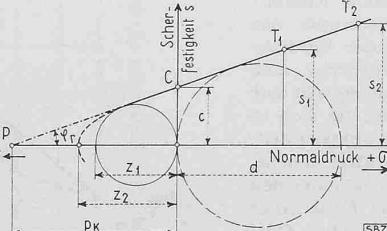


Abb. 17. Schema zur Bestimmung d. Kohäsion c
2 mit konst. Kohäsion

hängigkeit der Scherfestigkeit vom Normaldruck bei fehlender Kohäsion, durch Linie 2 dagegen für eine konstante Kohäsion c dargestellt. Im ersten Fall wird die innere Reibung durch eine Horizontale 1a ($\tan \varphi_1 = \frac{s_1}{\sigma} = \text{konstant}$), im zweiten Fall durch die Hyperbel 2a veranschaulicht. Diese beiden Linien, von denen die erste als Asymptote der zweiten erscheint, divergieren um so stärker, je mehr man sich dem Ursprung A nähert, bzw. je kleiner der vorhandene Normaldruck σ ist. Dadurch erklärt sich z. B., weshalb eine scheinbar unbedeutende Änderung der Kohäsion eine relativ grosse Änderung des «Winkels der natürlichen Böschung» zur Folge hat, wie man dies bei Sanden und Schneeböschungen von verschiedener Feuchtigkeit oder Packung beobachten kann.

Aus obigen Ueberlegungen folgt, dass die quantitative Abklärung der Kohäsionsverhältnisse die unentbehrliche Voraussetzung zur Lösung zahlreicher erdbaumechanischer Probleme bildet. Leider stösst jedoch die direkte Messung der Kohäsion auf fast unüberwindliche Schwierigkeiten. Man sieht sich deshalb gezwungen, indirekte Methoden zu benutzen, für die sich nach den in Abb. 17 dargestellten Bruchzuständen verschiedene Möglichkeiten bieten [13]. Die eine besteht darin, dass man durch zwei Scherversuche T_1 und T_2 die Schergerade für konstanten Wassergehalt ermittelt, deren Ordinate c die gesuchte Kohäsion bedeutet. Dass an Stelle von Scherversuchen auch Druckversuche mit Seitendruck, die in sog. Triaxialapparaten ausgeführt werden, treten können und gewisse Vorteile bieten, sei hier nur nebenbei bemerkt. Eine andere Methode beruht auf der Bestimmung der Zug- und Druckfestigkeit z_1 bzw. d , wobei die Tangente an die entsprechenden Mohr'schen Kreise den gesuchten Schnittpunkt C mit der Abszissenaxe liefert [14]. Bei derartigen Versuchen hat man jedoch mit der unangenehmen Erscheinung zu rechnen, dass die Bruchgrenze für plastische Materialien sehr unscharf ausfällt und daher schwer zu bestimmen ist, während der Zerreissversuch eindeutigere Werte liefert. Die Ermittlung der Zug- oder Zerreissfestigkeit bildet deshalb ein wertvolles Element zur Kohäsionsuntersuchung, umso mehr, da, wie bereits erwähnt wurde, diese Festigkeitseigenschaft dem Kohäsionsbegriff im Sinne der reinen Physik am besten entspricht. Zieht man schliesslich von einem bekannten Punkte T_1 der Schergeraden die Tangente an den durch die Zugfestigkeit z_1 definierten Spannungskreis, so stellt der Ordinatenabschnitt c dieser mit der Umhüllungslinie der Bruchzustände zu identifizierenden Geraden die Kohäsion c im Sinne der Erdbaumechanik dar. Auf Grund dieser Ueberlegungen wurde versucht, die Methodik der Zerreissversuche weiter zu entwickeln.

Zu diesem Zwecke wurde das bei der Bestimmung der Zugfestigkeit des Schnees mit Erfolg verwendete Prinzip, den Bruch durch Fliehkräfte herbeizuführen, auf den Erdbau angewandt [6]. Es bietet den wesentlichen Vorteil, dass die Schwierigkeit der Einspannung der plastischen lockeren Probekörper zwecks Uebertragung der erforderlichen Zugkräfte vollständig wegfällt, indem diese Zugkräfte bei der Rotation durch die Massenkräfte des Probekörpers selbst erzeugt werden, wobei ein ziemlich homogener Spannungszustand entstehen dürfte. Abb. 18 (S. 50) zeigt verschiedene Anordnungen des Zerreissversuchs am rotierenden Probekörper. Die Zugfestigkeit z_1 ist proportional einem Formfaktor λ , dem Quadrat der beim Bruch des Körpers vorhandenen Drehzahl n und dem Raumgewicht γ des Materials. Es werden verschieden geformte Probekörper verwendet. Beim

Schnee wurden bisher zylindrische, in einem Metallrohr befindliche Körper in horizontaler Lage um eine vertikale Axe rotiert, wobei die maximale Beanspruchung im mittleren Querschnitt entsteht (Anordnung a). Im Erdbau laboratorium werden die im Oedometer verdichteten oder ungestört ausgestochenen zylindrischen Probekörper um ihre vertikale Zylinderaxe rotiert, wobei entweder die Möglichkeit besteht, die einaxiale Zugfestigkeit z_1 am Achter-Körper (Anordnung b) oder die zweiaxiale Zugfestigkeit z_2 an der Vollscheibe zu bestimmen (Anordnung c). Die letzte, die die Ermittlung des Schnitt-

punktes der Mohr'schen Umhüllungskurve der Bruchzustände mit der Abszissenaxe ermöglicht (vergl. Abb. 17 und 20), kann auf Grund der Spannungsverteilung der rotierenden elastischen Vollscheibe für die Poissonzahl $m = 2$ (volumenkonstanter Körper) angenähert berechnet werden (Abb. 18). Die homogene zweiaxiale Zugbeanspruchung lässt sich auf anderem, d. h. auf statischem Wege, nur am gezogenen Hohlzylinder mit Innen- druck realisieren.

Bei dem in Abb. 19 dargestellten, unter Mitwirkung von Ing. Ch. Schaeerer konstruierten *Schleuder- oder Rotations-Zerreissapparat* arbeiten der Motor und das den Probekörper enthaltende, aus Leichtmetall bestehende rotierende Gehäuse auf einer gemeinsamen vertikalen Welle, an die unten mittels einer elastischen Kupplung der Drehzahlzähler angeschlossen ist. Durch ein in das Gehäuse eingebautes zweiteiliges Messer kann aus der auf die Rotationsscheibe aufgesetzten zylindrischen Probe ein Achterkörper ausgeschnitten werden, wobei dieses Messer gleichzeitig als seitliche Führung der Probe während der Rotation dient. Je nachdem, ob man den Einfluss der Kapillarspannungen zu lassen oder ausschalten will, wird der Versuch entweder über oder unter Wasser, d. h. im trockenen oder im wassergefüllten Gehäuse durchgeführt. Durch langsames Regulieren des Vorschaltwiderstandes wird die Drehzahl kontinuierlich gesteigert, bis der durch eine Öffnung sichtbare und meistens auch deutlich hörbare Bruch erfolgt.

Die bisher durchgeföhrten Zerreissversuche mit Lehmen und Tonen, die durch entsprechende Scherversuche ergänzt wurden, lassen grundsätzlich folgende, für die Abklärung des *Scherdiagramms* der Lockergesteine bedeutungsvolle Zusammenhänge erkennen (Abb. 20):

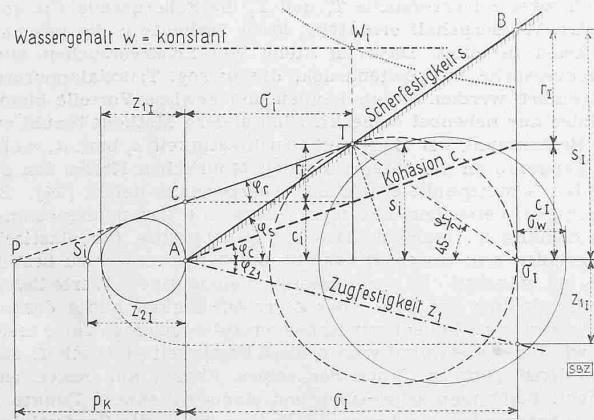


Abb. 20. Vollständiges Scherdiagramm kohärenter Lockergesteine

Innerhalb eines gewissen Druckbereiches nimmt bei langsam durchgeführten Scherversuchen mit veränderlichem Wasser-gehalt (entspanntes Porenwasser) die Scherfestigkeit s_i proportional mit der Vor- oder Verdichtungsspannung σ_i zu, welch letztgenannte während der Abscherung als konstante Normalspannung wirksam ist. Dabei handelte es sich um eine Summenwirkung, indem die Scherfestigkeit s_i in zwei grund-verschiedene Anteile zerlegt werden kann, nämlich die Kohäsion c_i und die Reibung r_i . Da einerseits die Scherfestigkeit s_i proportional mit σ_i zunimmt und dasselbe anderseits für den Reibungsanteil r_i , d. h. den einen der beiden Summanden, angenommen werden darf, so sollte sich auch der andere Summand, nämlich die Kohäsion c_i , als lineare Funktion des Ver-dichtungsdruckes erweisen. Ist dies der Fall, so muss schliess-lich Proportionalität zwischen σ_i und der Zerreissfestigkeit z_i , die ja als Mass der Kohäsion erscheint, bestehen. Nach den in Abb. 21 dargestellten Ergebnissen ist dies unter den nachstehen-den Vorbehalten tatsächlich der Fall. Eine wesentliche Kompli-kation der Verhältnisse entsteht durch die Anisotropie des Materials, die darauf zurückzuführen ist, dass bei der Verdich-tung des Probekörpers unter einem gegebenen Vordruck eine Orientierung der schuppenförmigen Tonblättchen senkrecht zur Druckrichtung eintritt (Abb. 21). Diese Anisotropie, die sich in allen physikalischen Eigenschaften, wie Wasserdurchlässigkeit, elektr. Widerstand [15], Schwindmass usw. bemerkbar macht, hat zur Folge, dass die Zugfestigkeit des Materials bei einer den Schuppen parallelen Zugrichtung grösser ist als im Falle einer senkrecht zur Schichtung gerichteten Zugkraft. Die oben fest-gestellte lineare Abhängigkeit zwischen Zugfestigkeit und Ver-dichtungsdruck scheint nun nur für eine parallel zur Schichtung

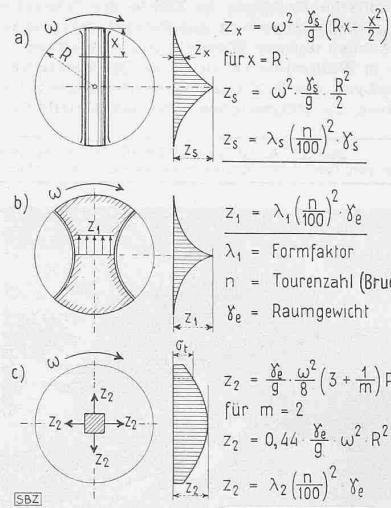


Abb. 18. Messung der Zerreissfestigkeit z_1 durch Rotation des Probekörpers (Schema)

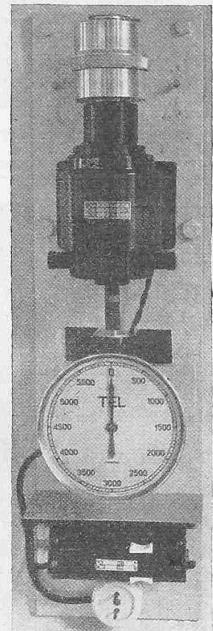


Abb. 19. Schleuder- oder Rotations-Zerreissapparat

gerichtete Zugbeanspruchung zuzutreffen (Abb. 21). Im übrigen wird vorausgesetzt, dass man bei der Vorbereitung und Verdichtung des Probekörpers stets denselben Anfangs-Wassergehalt als Ausgangspunkt benützt (z. B. die Fliessgrenze nach Atterberg), weil nur unter dieser Bedingung ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Verdichtungsdruck und Verdichtung bzw. Zerreissfestigkeit vorhanden ist.

Um die Bedeutung der festgestellten ungefähren Proportionalität, die — abgesehen vom Einfluss einer event. vorhandenen Anisotropie — innerhalb eines gewissen Bereiches zwischen Verdichtungsdruck und Zerreißfestigkeit von kohärenten, wasser gesättigten Lockergesteinen besteht, für die Abklärung der *Reibungs- und Scherfestigkeitsverhältnisse* zu erkennen, muss das in Abb. 20 dargestellte Scherdiagramm etwas näher betrachtet werden. Ist die während der Verdichtung der Probe wirksame Vorspannung σ_1 identisch mit dem während des Abscherens herrschenden Normaldruck auf die Scherfläche (Scherdruck), so erhält man bei langsamem Abscheren den Punkt *B* der Scherlinie *A-B* mit natürlichem, d. h. entspanntem Porenwasser [10]. Diese Linie schliesst mit der Abszissenaxe den Winkel φ_s der *scheinbaren inneren Reibung* ein. Entlastet man eine unter σ_1 verdichtete Probe vor dem Scherversuch um einen relativ kleinen Betrag, so bleibt zunächst, d. h. bis zum Punkte *T*, die Linie *A-B* massgebend, da die während der langsamem Abscherung auftretende grösste Hauptspannung den Vordruck übersteigt und damit den Wassergehalt und die Kohäsion der Probe im Zeitpunkt der Gleitflächenbildung bestimmt. Erst wenn man bei fortschreitender Entlastung des Scherdruckes σ gegenüber dem Vordruck σ_1 schliesslich zu einem Punkt *T* der Scherlinie gelangt, für den die erste Hauptspannung während der Abscherung mit σ_1 identisch wird, findet keine Wassergehalts-, bzw. Kohäsionsänderung der Probe während des Scherversuches statt.

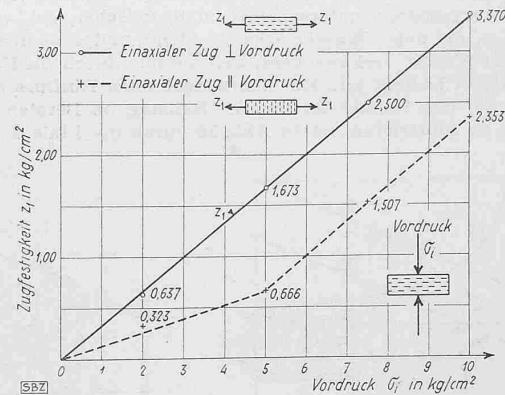


Abb. 21. Diagramm der axialen Zerreissfestigkeit z_1 eines Gehängetons in Funktion des Verdichtungs- oder Vordruckes σ_1

Würde man bei einem nächsten Versuch die Probe vor der Abscherung noch weiter entlasten (Scherdruck $\sigma < \sigma_i$), so würde man deshalb eine Scherfestigkeit erhalten, die der Scherlinie $C-T$ für konstanten Wassergehalt w_i , bzw. konstante Kohäsion c_i entspricht. Diese Linie, deren Axenabschnitte durch c_i und p_k gegeben sind, schliesst mit der Abszissenaxe den Winkel φ_r der wahren inneren Reibung ein. Aus dieser Betrachtung folgt, dass sich jedes gesättigte Lockergestein bezüglich Scherfestigkeit, Kohäsion und innerer Reibung annähernd durch zwei Größen allgemein charakterisieren lässt: den Winkel φ_s der scheinbaren und den Winkel φ_r der wahren inneren Reibung. Während jedoch für ein gegebenes Material nur eine einzige unter dem Winkel φ_s geneigte Scherlinie mit entspanntem Porenwasser, aber veränderlichem Wassergehalt existiert, gibt es eine unendliche Schar von annähernd parallelen, unter dem Winkel φ_r gegen die Horizontale geneigten Scherlinien für konstanten Wassergehalt. Zu jedem Wassergehalt als Parameter, bzw. zu jedem Vordruck σ_i gehört eine solche Scherlinie, die im Schnittpunkt T einen Knickpunkt aufweist. Rechts von T ($\sigma > \sigma_i$) bleibt unter Wahrung des konstanten Wassergehaltes die Scherfestigkeit s_i praktisch unverändert, d. h. unabhängig vom Normaldruck, weil jede zusätzliche Normalspannung gegenüber dem durch T verlaufenden Mohrschen Grenzkreis fast vollständig von der flüssigen, d. h. reibungsfreien Phase aufgenommen wird (druckgespanntes Porenwasser). Links von T ($\sigma < \sigma_i$) schneidet diese Scherlinie die Kohäsion c_i als Ordinatenabschnitt heraus und tangiert den entsprechenden Grenzkreis der einaxialen Zugfestigkeit z_1 , deren Abhängigkeit vom Verdichtungsdruck sich annähernd durch die Gleichung: $z_1 \sim \sigma_i \operatorname{tg} \varphi_{z_1}$ angeben lässt. Kennt man somit für ein gegebenes isotropes Material außer dem Winkel φ_s den Winkel φ_{z_1} , bzw. eine zu einem gegebenen Verdichtungsdruck σ_i zugehörige Zerreissfestigkeit z_1 , so kann nach der in Abb. 20 angegebenen Konstruktion der Winkel φ_r der wahren inneren Reibung angenähert ermittelt werden.

Zusammenfassend ist hervorzuheben, dass sich die von der Theorie der inneren Reibung nach Coulomb ausgehende Bruchtheorie von Mohr auch bei ihrer Anwendung auf die Lockergesteine erneut als besonders anpassungsfähig bewährt. Einer der wesentlichen Vorteile der Mohr'schen Darstellung besteht darin, dass sie bei sinngemäßer Erweiterung die Unterscheidung der Spannungsanteile von flüssiger (σ_w) und fester Phase in anschaulicher Weise ermöglicht, wie dies aus dem Vergleich der beiden um σ_w gegeneinander verschobenen Spannungskreise der Abb. 20 (rechts) ersichtlich ist. Allerdings kann auch dieses Schema nur ein stark vereinfachtes Bild der wirklichen Verhältnisse liefern. Doch sind hier Vereinfachungen, die sich mit der angenäherten Erfassung der wesentlichen Zusammenhänge begnügen, nicht nur erlaubt, sondern sogar notwendig. Nur auf diesem Wege dürfte es möglich sein, genügend übersichtliche Grundlagen zur Lösung der praktisch wichtigen Probleme zu gewinnen.

Um abschliessend die Bedeutung der Kohäsionsverhältnisse und deren Messung zu illustrieren, greifen wir drei typische erdbauliche Fragestellungen heraus (Abb. 22). Im ersten Fall sei für ein Material mit konstanter Kohäsion die maximal mögliche Höhe h_0 der freistehenden Wand zu bestimmen, die sich nach

Abb. 221 als proportional der Kohäsion c erweist. Im zweiten Fall wird nach der «natürlichen Böschung» eines kohärenten Materials gefragt, dessen Oberfläche ursprünglich horizontal, dessen Kohäsion in allen Punkten der anfänglichen Ueberlagerung proportional und dessen Winkel der scheinbaren inneren Reibung gegeben sei (z.B. $\varphi_s = 30^\circ$). Man denke sich nun, dass auf beiden Seiten einer senkrecht zur Bildebene stehenden Geraden in A das Material abgegraben werde, bis die «natürliche Böschung» ψ erreicht wird. Auf

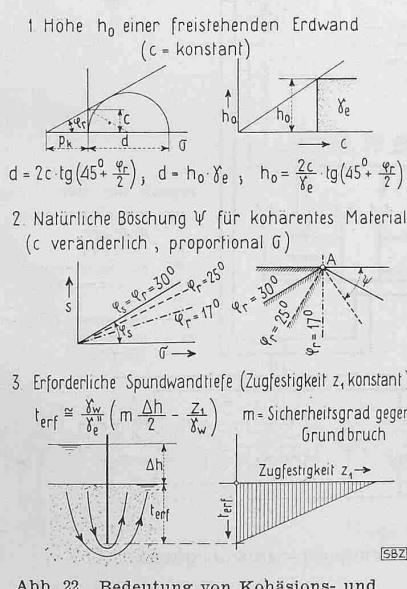


Abb. 22. Bedeutung von Kohäsions- und Zerreissfestigkeit an drei prakt. Beispielen

Grund gewisser Annahmen lässt sich unter Vernachlässigung allfälliger Strömungsdrücke rechnerisch zeigen, dass ψ in erster Linie vom Winkel φ_r der wahren Winkel der inneren Reibung abhängt. Ist $\varphi_r = \varphi_s$, so ist das Material kohäsionslos und $\psi = \varphi_s = 30^\circ$. Je kleiner φ_r , bezw. je grösser die Differenz $\varphi_s - \varphi_r$, umso kohärenter ist das Material und umso grösser wird der Winkel ψ der natürlichen Böschung, bis schliesslich für $\varphi_r \cong 17^\circ$ eine freie vertikale Wand denkbar wäre (Abb. 222).

Als drittes Beispiel werde für den einfachen Fall der Abb. 223 nach der Spundwandtiefe t_{erf} gefragt, die bei gegebener Zugfestigkeit z_1 eines homogenen Materials erforderlich ist, um eine m -fache Sicherheit gegen Grundbruch zu erzielen. Der Grundbruch entsteht bekanntlich dann, wenn die auf der Innenseite der Spundwand annähernd vertikal nach oben gerichteten Strömungsdrücke so gross werden, dass sie das Gewicht der überlagernden Erdmassen und eine allfällig vorhandene Zugfestigkeit des Materials überwinden und zur Rissbildung, bzw. zur Auflockerung des Materials führen [16]. Damit nun eine m -fache Sicherheit gegen Grundbruch vorhanden ist, darf das hydraulische Gefälle in keinem Punkte den m -ten Teil des kritischen Gefälles J_k für Grundbruch überschreiten. Rechnet man dabei näherungsweise mit dem mittleren Gefälle J_m , so folgt:

$$J_m \sim \frac{\Delta h}{2 t_{\text{erf}}} = \frac{J_k}{m} \quad \dots \quad (10)$$

Bei gegebenem Raumgewicht γ_e'' des Materials unter Wasser und konstanter Zugfestigkeit z_1 berechnet sich anderseits für die vertikal nach oben gerichtete Parallelströmung das kritische Gefälle J_k in einem Punkte von der Tiefe t unter dem abgesenkten Grundwasserspiegel nach der Gleichung:

$$J_k = \frac{\gamma_e''}{\gamma_w} + \frac{z_1}{\gamma_w t} \quad \dots \quad (11)$$

[16] worin γ_w das Raumgewicht des Wassers bedeutet.

Der kritische Punkt liegt somit am unteren Ende der Spundwand, weil J_k umso kleiner wird, je grösser t ist. Setzt man in Gleichung 11 für $t = t_{\text{max}} = t_{\text{erf}}$ und für J_k den sich aus Gleichung 10 ergebenden Wert, so erhält man für die gesuchte Spundwandtiefe folgende einfache Näherungslösung:

$$t_{\text{erf}} \cong \frac{\gamma_w}{\gamma_e''} \left\{ \frac{\Delta h}{2} m - \frac{z_1}{\gamma_w} \right\} \quad \dots \quad (12)$$

Für $z_1 = 0$ ergibt Gleichung 12 den üblichen Näherungswert für Spundwandberechnungen bei kohäsionslosem Material. Mit einer Zunahme der Zugfestigkeit z_1 nimmt die erforderliche Spundwandlänge linear ab, bis schliesslich diejenige Festigkeit erreicht wird, für die theoretisch selbst dann keine Grundbruchgefahr besteht, wenn die Spundwand nur bis zum abgesenkten Grundwasserspiegel hinabreicht. Mit diesem Grenzfall verliert jedoch gleichzeitig die ganze Betrachtungsweise ihre Gültigkeit, weil die Voraussetzung der vertikalen Parallelströmung nicht mehr erfüllt ist. Im übrigen wird durch Gleichung 12 die bekannte Erfahrung bestätigt, nach der schon eine relativ geringe echte Kohäsion des Materials genügt, um die Grundbruchgefahr stark herabzusetzen oder sogar auszuschliessen.

Die oben besprochenen drei Fälle, die die ausschlaggebende Bedeutung der Kohäsionsverhältnisse beleuchten, liessen sich, sinnlich im Zusammenhang mit den sogenannten Fließerscheinungen und der damit verbundenen Frage nach der Grenzbelastung des Baugrundes, durch zahlreiche weitere Problemstellungen ergänzen [19].

5. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Die in der vorliegenden Studie behandelten Beispiele mögen die anregende Wirkung erkennen lassen, die von der synthetischen Behandlung verwandter Grenzgebiete ausgeht. Auch hier gilt es deshalb, die bestehenden Brücken zwischen den verschiedenen Fachrichtungen und Instituten durch persönlichen Kontakt und das Suchen nach gemeinsamen Grundlagen zu verstärken und auszubauen, um den mit dem Spezialistentum verbundenen tragischen Verlust an jenem universellen Wissen, das die älteren Naturforscher und Techniker auszeichnet, nach Möglichkeit auszugleichen. Geht man den tieferen Ursachen nach, die die relativ rasche Entwicklung der Schneekunde gefördert haben, so stösst man in erster Linie auf ein ideelles Moment, nämlich den gewaltigen Antrieb, den das Schöne auf den menschlichen Erkenntnisdrang ausübt. Gehört doch zum Schönsten, was die Natur uns bietet, das Wunder von Schnee, Firn und Gletscher. Dieses Motiv mag auch wesentlich zu jener grosszügigen finanziellen Unterstützung beigetragen haben, die es den Mitarbeitern der Schweiz. Schnee- und Lawinenforschungskommission ermöglichte, sich der Abklärung der Grundlagen zu widmen, ohne vorzeitig durch praktische Aufgaben abgelenkt zu werden [17, 18].

Auf der andern Seite bedingt die ausserordentliche Mannigfaltigkeit in den geologischen Verhältnissen unseres Landes eine ungewöhnliche Fülle und Variationsbreite erdbaumechanischer Probleme, von denen wir nur einen sehr kleinen Ausschnitt beleuchtet haben. Gleichzeitig begegnet man diesen Problemen auf fast allen Gebieten des Ingenieurwesens. Nicht nur von Bau- und Kulturtechnik werden erbauliche Fragen gestellt, die sich auf Fundationen, Dämme, Stollen, Strassen, Flugplatzpisten, Meliorationen oder Rutschungen beziehen, sondern auch von der Industrie, wie z. B. von der Keramik, den Giessereien und der Ziegelei-Industrie. In Anbetracht der volkswirtschaftlichen Bedeutung aller dieser Probleme ist es auch hier geboten, der *Grundlagenforschung* grösste Beachtung zu schenken. Oft nimmt die zweck- und terminbedingte Aufgabenstellung der Praxis die Arbeitskräfte der wissenschaftlichen Institute derart in Anspruch, dass ihre Hauptaufgabe, die in der Schaffung allgemeiner Grundlagen besteht, zu kurz kommt. Die an sich so notwendige und anregende Wechselwirkung zwischen Praxis und Forschung wird erst richtig fruchtbare, wenn die Möglichkeit besteht, irgend ein Problem nicht allein vom engen Gesichtspunkt eines Spezialfalles, sondern allgemein und tiefshürfend zu lösen. Um das eine zu tun und das andere nicht zu lassen, wäre eine Gliederung, bzw. Zweiteilung der wissenschaftlichen Institute in dem Sinne anzustreben, dass neben der Befriedigung der unmittelbaren Bedürfnisse der Praxis die Kontinuität der Forschung in erster Linie gewahrt bleibt. Nur im Geiste einer auf weite Sicht gestellten Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Praxis, die sich von dem Ideal leiten lässt, das Bundesrat Etter anlässlich der Einweihung des neuen Instituts auf dem Weissfluhjoch⁵⁾ als die «in königlicher Freiheit» tätige Forschung formuliert hat, können Früchte von bleibendem Wert heranreifen.

⁵⁾ Am 15. April 1943, vgl. Band 121, Seite 229.

Literatur-Verzeichnis

- [1] Bader, Haefeli, Bucher, Neher, Eckel, Thams: Der Schnee und seine Metamorphose, mit einer Einleitung von Prof. Dr. P. Niggli. Beiträge z. Geologie d. Schweiz. Geotechn. Serie, Hydrologie. Bern 1939.
- [2] Niggli, P.: Schnee und Firn. Rektoratsrede an der 107. Stiftungsfeier der Universität Zürich, 1940. Orell Füll, Zürich.
- [3] Ritter M.: Klassische Erdrucktheorie. Institut für Baustatik E. T. H. Erdbaukurs, Zürich, 1938.
- [4] Fröhlich O. K.: Druckverteilung im Baugrund. Wien 1934.
- [5] Haefeli R.: Schneemechanik, mit Hinweisen auf die Erdbau- mechanik. Sonderdruck aus [1] (Diss.).
- [6] Haefeli R.: Spannungs- und Plastizitätserscheinungen der Schneedecke. «Schweiz. Archiv.» H. 9 bis 12, 1942.
- [7] von Moos A.: Die Geologie der Schweiz und deren Beziehung zur Bautechnik. Separatdruck aus «Hoch- und Tiefbau» 1941/42.
- [8] Niculescu Js.: Untersuchungen über die Energieübertragung und Stossdauer beim geraden zentralen Stoss zylindrischer Stäbe. Freiberg i. Sa. 1932 (Diss.).
- [9] Stern O.: Das Problem der Pfahlbelastung. Berlin 1908.
- [10] Haefeli R.: Die mechanischen Eigenschaften der Locker- gesteine. SBZ Bd. 111, No. 24 und 25 (1938).
- [11] Meyer-Peter E.: Pfahlgründungen. «H. u. T.» 1938. No. 35/36.
- [12] L. Benda und R. Ruckli: Die Erdrutsche von Emmenegg und Dallenwil. «Strasse und Verkehr», No. 16 und 17, 1937.
- [13] Ros M. und Eichinger A.: Versuche zur Klärung der Bruch- gefahr. II. Nichtmetallische Stoffe. Diskussionsbericht No. 28 der Eidg. Materialprüfunganstalt an der E. T. H., Zürich.
- [14] Tiedemann B.: Ueber Bodenuntersuchungen bei Entwurf und Ausführung von Ingenieurbauten. Berlin 1942.
- [15] Gruner-Haefeli: Beitrag zur Untersuchung des physikalischen und statischen Verhaltens kohärenter Bodenarten. «Schweiz. Bauzeitung», Bd. 103, No. 15 und 16, 1934.
- [16] Haefeli R. und von Moos A.: Drei Lockergesteine und ihre technischen Probleme. «Schweiz. Bauzeitung», Bd. 112, No. 11, 1938.
- [17] Niggli P.: Die Schnee-, Lawinen- und Gletscherkunde in der Schweiz. Zur Eröffnung des Eidg. Institutes für Schnee- und Lawinenforschung. 15. April 1943.
- [18] Haefeli R.: Neues Forschungsinstitut auf dem Weissfluhjoch der Schweiz. Schnee- und Lawinenforschungskommission. «Schweiz. Bauzeitung», Bd. 119, No. 26, 1942.
- [19] Maag E.: Grenzbelastung des Baugrundes. «Strasse und Verkehr», 1938.
- [20] Redlich-Terzaghi-Kampe: Ingenieurgeologie. Berlin-Wien 1929.
- [21] Bucher E.: Die Lawinen des Winters 1941/42. «Die Alpen», 1942, H. 12.
- [22] Grevy A.: Compléments de Géométrie. 2ème éd. Paris 1909.
- [23] Grossmann M.: Darstellende Geometrie. 1932.
- [24] Singer M.: Der Baugrund. Wien 1932.
- [25] Huizinga T. K.: Grondonderzoek vor de Brug over de oude Maas bij Dordrecht. Sonderdruck aus «Openbare Werken», 1936.
- [26] Thams Ch.: Eine Sonde zur Messung der Temperatur in der Schneedecke. Jahresbericht der Naturforschenden Gesellschaft Graubündens, Band LXXIX 1943.



Abb. 1. Uebersicht der vom FHK der E. T. H. versorgten Gebäude (vgl. Bd. 106, S. 141)
1 Fernheizkraftwerk, 15 Kasper Escher Haus, an dessen linker Ecke das Wärmepump-Ergänzungswerk

Das Wärmepump-Ergänzungswerk des Fernheizkraftwerkes (FHK) der E. T. H.

I. Maschineller Teil

Nach einem Referat von Prof. Dr. B. BAUER, E. T. H. Zürich

Als Ergänzung zum FHK¹⁾ der E. T. H. steht eine Wärmepumpen-Anlage in Bauvollendung, die bei voller Belastung später jährlich 20 000 Mio kcal leisten soll, wovon etwa 13 000 Mio dem Limmatwasser, der Rest elektrischer Energie entstammen. Der Zweck der Anlage ist im Protokoll der Sitzung des Bundesrates vom 12. Mai 1942, das im Auszug folgt, klar umrissen.

«Die durch die Errichtung der Wärmepumpen-Ergänzungsanlage zu erreichenden Vorteile können kurz wie folgt zusammengefasst werden:

¹⁾ Ausführlich beschrieben SBZ Bd. 106, S. 111*, 28. Sept. 1935.

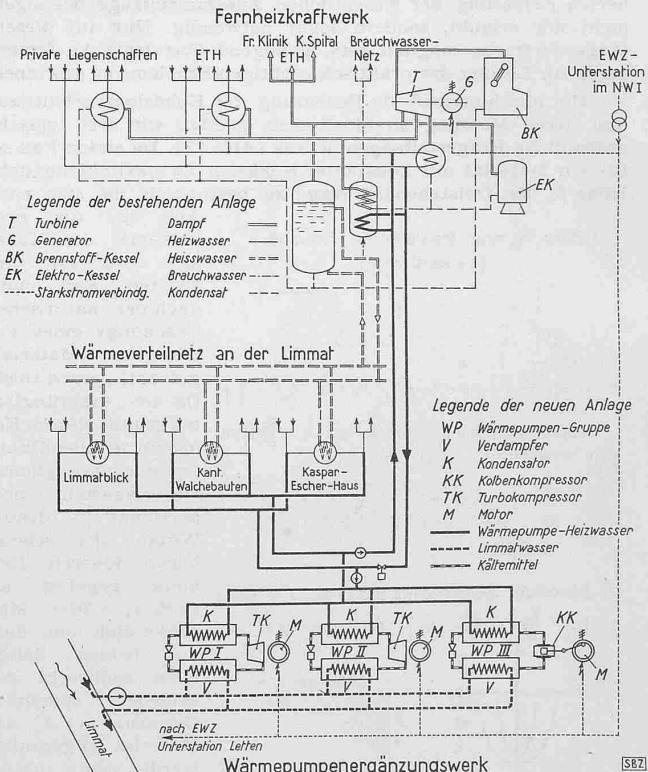


Abb. 1. Schema der Kupplung von FHK und Ergänzungswerk