

Porenwasser-Spannungen beim Bau von Erddämmen

Autor(en): **Bjerrum, Laurits**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **71 (1953)**

Heft 8: **Sonderheft zum Geburtstag von Prof. Dr. E. Meyer-Peter. 1. Teil**

PDF erstellt am: **17.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-60502>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

längere Zeit als Volontär tätig sind. Als Folge dieser Lehrtätigkeit dürfen wir bei den schweizerischen Fachkreisen und Behörden ein besseres Verständnis für Fragen der Erdbaumechanik feststellen, verbunden mit der Einsicht in die Notwendigkeit von Baugrunduntersuchungen. Nach und nach sind auf diesem Gebiete eine Reihe von Spezialfirmen entstanden, und die bestehenden Sondierfirmen haben sich weitgehend den neuen Methoden und Erkenntnissen angepasst.

Dokumentation und Erfahrungsaustausch

Als Informationsquelle für Fragen der Erdbaumechanik und Baugrundgeologie verfügt das Laboratorium über eine Bibliothek. Es unterhält ferner ein jedem Interessenten zugängliches Baugrundarchiv der Stadt Zürich, in welchem die erreichbaren und ihm auf freiwilliger Basis zur Verfügung gestellten Bohrresultate, Rammogramme, Grundwasserstände, Baugrubenaufschlüsse gesammelt werden.

Um die Entwicklung auf dem speziellen Fachgebiet im In- und Ausland verfolgen zu können, ist neben dem Studium der Literatur auch ein Kontakt mit den Fachleuten des In- und Auslandes notwendig. Eine einmalige Gelegenheit für diesen Kontakt bietet der III. Internationale Kongress für Erdbaumechanik und Fundamentstechnik, der im August 1953 in der Schweiz durchgeführt und mit Unterstützung der Privatindustrie, der Städte, Kantone und des Bundes von den Laboratorien Zürich und Lausanne organisiert wird.

Räume und Personal

Zur Durchführung der erwähnten Aufgaben verfügt die Erdbauabteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH seit Ende 1951 im Ergänzungsbau über zwei gut ausgebaute Stockwerke und ein Untergeschoss mit total 4600 m³ umbautem Raum (Bilder 3. u. 4). Das obere Stockwerk enthält neben acht Bureauräumen die Bibliothek und ein Sitzungszimmer. Im unteren Stockwerk (Erdgeschoss) ist das grosse Hauptlaboratorium (2) mit verschiedenen Nebenräumen, sowie ein allen drei Abteilungen der VAWE gemeinsamer Vorlesungssaal untergebracht. Im Untergeschoss (3) sind zwei Kühlräume (4) für Bodenfrost- und Eisversuche, ein thermostatischer Raum insbesondere für Kriechversuche, eine kleine Werkstatt, ein Laboratorium, ein Photoraum, eine Dunkelkammer und ein grosser Versuchsstand für Ramm- und Belastungsversuche installiert (5 und 6).

Zur Zeit setzt sich das Personal der Erdbauabteilung neben dem Abteilungsleiter zusammen aus: 5 Bauingenieuren, 1 Geologen, 1 Maschineningenieur, 2 Technikern, 2 Laboranten, 1 Sekretärin und 1 Zeichner, d. h. total 14 Angestellten, gegenüber 3 im Gründungsjahr 1935.

3. Ausblick

Nach der stürmischen Entwicklung der Erdbaumechanik der letzten 25 Jahre sind die Grundlagen für eine ruhigere Weiterentwicklung gegeben; diese Erscheinung gilt auch für unsere Erdbauabteilung. In wissenschaftlicher Hinsicht wird sie sich hauptsächlich jenen Fragen zuwenden, die für unser Land wesentlich sind und hier besonders gut verfolgt werden können. Dazu gehören vor allem jene Probleme, die durch den alpinen Charakter der Schweiz bedingt sind, wie z. B. Fragen betreffend die Kriech-, Rutsch- und Frosterscheinungen, Fragen des Dammbaus oder der zur Abtastung heterogener Untergründe geeigneten Sondiermethoden. Während die enge Verbindung mit der Schnee-, Eis- und Gletscherforschung weiterhin anzustreben ist, bietet die Koordination mit der hydraulischen Abteilung der VAWE die Möglichkeit, Strömungsvorgänge in Lockergestein auf Grund von Modellversuchen zu studieren.

Um die bestehende Zusammenarbeit mit der Praxis möglichst fruchtbar zu gestalten, ist eine Intensivierung der Beobachtung und Messung am entstehenden und fertigen Bauwerk erwünscht, damit die theoretischen Grundlagen kontrolliert und weiter entwickelt werden können. Ein freundschaftliches Hand-in-Hand-Arbeiten mit der EMPA bleibt dabei Voraussetzung, bilden doch die Prüfungen des Untergrundes, der Baumaterialien und die Messungen am werdenden wie am vollendeten Objekt eine untrennbare Einheit.

Da inzwischen auch private Bureaux auf dem Gebiete der Erdbaumechanik und Baugrundgeologie entstanden sind, wird sich voraussichtlich unsere beratende Tätigkeit in Zukunft mehr auf besondere Fälle erstrecken. Dadurch werden Kräfte für die Grundlagenforschung frei und wird eine Konkurrenzierung der Privatwirtschaft vermieden.

In Anbetracht der Nachfrage des In- und Auslandes ergibt sich ferner die Notwendigkeit einer vermehrten Ausbildung von Erdbaumechanikern, die wegen der Verbindung von naturwissenschaftlichen und technischen Kenntnissen im allgemeinen mehrere Jahre benötigt. Bei der Einführung der Studenten gilt es vor allem, das Interesse für das neue Gebiet und die Achtung vor der Natur zu wecken, wozu Besuche von Baustellen besonders geeignet sind. Endlich sollte im Rahmen des Möglichen in nationalen und internationalen Kommissionen mitgearbeitet werden, um die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen gegenseitig auszutauschen und die Früchte der in den verschiedenen Ländern durchgeführten Forschungen in den Dienst der Praxis zu stellen.

Porenwasser-Spannungen beim Bau von Erddämmen

Von Dipl. Ing. LAURITS BJERRUM, Direktor des Geotechnischen Instituts von Norwegen, Blindern, Oslo

DK 624.131.536 : 624.136.2

Einleitung

Noch vor 25 Jahren war der Bau eines grossen Erddammes mit einem bedeutenden Risiko verbunden, und die Anzahl der Rutschungen, Unterspülungen und anderen Schäden, die beim Bau grösserer Dämme entstanden sind, war gross. Heute ist man dank der Fortschritte der Erdbaumechanik im Stande, mit vorausberechneter Sicherheit Erddämme zu bauen, die sogar Höhen über 100 m aufweisen. Eine der Ursachen dieser Entwicklung ist die Erkenntnis der Faktoren, die die Stabilität eines Erddammes beeinflussen. Für die zwei stabilitätsmässig gefährlichsten Zustände eines Erddammes, die Bauzustände und die Absenkung des Stauspiegels, kann Terzaghis Untersuchung der Bedeutung von Porenwasserspannungen besonders hervorgehoben werden.

Die nachfolgende Arbeit behandelt die Abschätzung der Porenwasserspannungen, die beim Bau eines Erddammes entstehen. Vor gut zwei Jahren wurde dieses Thema in Verbindung mit dem Bau einiger grösserer Erddämme an der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH in Zürich in Angriff genommen. Dank der Unterstützung und dem Verständnis des Direktors, Prof. Dr. h. c. E. Meyer-Peter, und des Leiters der Erdbauabteilung, Prof. Dr. R. Haefeli, konnten diese Untersuchungen auf wissenschaftlicher Grundlage erfolgreich durchgeführt werden. Es wurde eine Methode zur Berechnung der Stabilität der Bauzustände eines Erddammes aufgestellt und in der Praxis ausprobiert. An dem neugegründeten Norwegischen Geotechnischen Institut wurden diese Untersuchungen seit Herbst 1952 weitergeführt, und der

Einfluss verschiedener Faktoren wurde genauer abgeklärt. Die Hauptergebnisse dieser Untersuchungen werden nachfolgend kurz zusammengestellt.

1. Porenwasserspannungen und Stabilität

Die Stabilität eines Erddammes ist in erster Linie von der Scherfestigkeit der verwendeten Materialien abhängig. Im Gegensatz zu den gewöhnlichen Baumaterialien kann die Scherfestigkeit eines Bodens nicht als eine konstante Grösse betrachtet werden. Sie ist abhängig von verschiedenen Faktoren, vor allem von der effektiven Spannung zwischen den Mineralkörnern. In stark durchlässigen Materialien lassen sich diese Spannungen direkt aus dem Gewicht der über dem betrachteten Punkt gelegenen Dammauffüllung berechnen; in undurchlässigen Materialien dagegen wird z. B. bei einer verhältnismässig raschen Erhöhung des Dammes im Bauzustand ein Teil des Ueberlagerungsdruckes von einem Ueberdruck im Porenwasser getragen. Dabei werden die Spannungen, die zwischen den Mineralteilchen wirksam und demzufolge für die Scherfestigkeit massgebend sind, herabgesetzt.

Mit dem Hochführen eines Erddammes wachsen bekanntlich die Scherbeanspruchungen des Erdkörpers. Steigt die Scherfestigkeit wegen Entstehung von Porenwasserspannungen nicht gleichzeitig an, so werden die Stabilitätsverhältnisse verschlechtert. Die Erfahrungen zeigen, dass der Bauzustand einen der stabilitätsmässig gefährlichsten Zustände eines Erddammes darstellt. Für die Berechnung der Stabilität eines Erddammes ist es folglich von grösster Bedeutung, die

beim Bau zu erwartenden Porenwasserspannungen abschätzen zu können.

Die in ausgeführten Dämmen direkt gemessenen Porenwasserspannungen der Bauzustände zeigen, dass diese sehr stark von den Einbaubedingungen und der Verdichtung des Erdmaterials abhängig sind. Vor allem nehmen die Porenwasserspannungen mit dem Einbauwassergehalt so schnell zu, dass es in lehmigen Materialien notwendig wird, eine obere Grenze des Einbauwassergehaltes vorzuschreiben. Die Projektierung eines Erddammes und die Beurteilung der Anwendbarkeit der verfügbaren Materialvorkommen fordert deshalb eine Vorausbestimmung der zulässigen Grenzen des Einbauwassergehaltes. Nachfolgend ist eine Methode beschrieben, die die Beschaffung der notwendigen Grundlagen zur Berechnung der Stabilität der Bauzustände eines Erddammes und zur Festlegung der oberen Grenze des Einbauwassergehaltes ermöglicht. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Füllmaterialien so undurchlässig sind oder die Bauzeit so kurz ist, dass während des Baues keine Entwässerung stattfindet.

2. Versuchsmässige Ermittlung der Porenwasserspannungen

Vom Anfangsvolumen der in den Poren eines Bodens enthaltenen Luft ausgehend, ermöglicht das Gesetz von Boyle-Mariotte über die Kompressibilität der Luft und das Gesetz von Henry über die Lösbarkeit der Luft im Wasser die Berechnung der in einem geschlossenen System bei einer Belastung entstehenden Porenwasserspannungen. Dabei muss die Kompressibilität des Materials z. B. an Hand eines Oedometerversuches bestimmt werden. Diese Methode wird im Allgemeinen von den amerikanischen Erdbau-Laboratorien verwendet (Bureau of Reclamation).

Eine andere Methode zur Abschätzung der Porenwasserspannungen besteht darin, unter ständiger Messung der Volumenänderungen zwei identische Proben zu belasten: die eine undrainiert, ohne Luft- oder Wasserabgabe, die andere drainiert, so dass keine Porenwasserspannungen entstehen.

Infolge des Gesetzes

$$\bar{\sigma} = \sigma - u$$

kann die Porenwasserspannung (u) als Differenz zwischen den beiden Spannungen σ und $\bar{\sigma}$, die unter undrainierter bzw. drainierter Bedingung zur gleichen Volumenänderung führen, bestimmt werden. Diese Methode wurde an der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau benützt; Bild 1 zeigt als Beispiel die Resultate eines Versuches. Im betrachteten Fall wurden die Proben¹⁾ mit einer Gummimembran geschützt und mit einem allseitigen Wasserdruck belastet (isotrope Belastung). Bild 1 stellt die Volumenänderung dar, die im geschlossenen und offenen System gefunden wurden, und zeigt, wie man die im geschlossenen System entstandenen Poren-

1) Das Material war eine Moräne, die beim günstigsten Einbauwassergehalt von 10,4 % (Sättigung 89 %) verdichtet wurde.

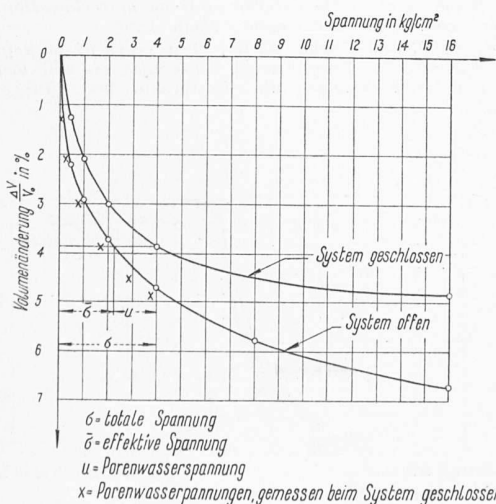


Bild 1. Volumenänderung zweier identischer, nicht gesättigter Proben bei hydrostatischer Belastung im offenen bzw. geschlossenen System

wasserspannungen bestimmen kann. In Bild 1 sind überdies die Ergebnisse der direkt gemessenen Porenwasserspannungen eingetragen. Die totalen Spannungen, mit denen das geschlossene System belastet wurde, sind mit Kreuzen in effektive Spannungen und Porenwasserspannungen aufgeteilt. Man sieht, dass die Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Porenwasserspannungen befriedigend ist²⁾. Die Versuche zeigen übrigens den charakteristischen Verlauf der Porenwasserspannungen bei wachsender Belastung. Für kleine Ueberlagerungsdrücke steigen sie nur langsam. Wenn sie aber eine solche Höhe erreicht haben, dass die Luft in den Poren ganz aufgelöst bzw. auf ein ganz kleines Volumen zusammengedrückt ist, steigen sie um den selben Betrag wie die Erhöhung des Ueberlagerungsdruckes. Dies heisst, dass von einer gewissen Ueberlagerung an die Porenwasserspannungen 100 % der Belastungserhöhung ausmachen und die effektiven Spannungen unverändert bleiben.

Die zuverlässigste Methode zur Bestimmung der Porenwasserspannungen ist aber, sie direkt zu messen. Nach der neuesten Entwicklung der Laboratoriumstechnik für Messung von Porenwasserspannungen ist diese Methode durchaus verwendbar. Das Grundprinzip besteht darin, eine Probe mit gleichem Wassergehalt und Trockenraumgewicht wie im Damm unter undrainierten Versuchsbedingungen in eine Triaxialzelle einzubauen (Bild 2). Damit mit Sicherheit kein Wasser und keine Luft abgegeben werden können, umgibt man die Probe mit einer Gummimembran und versiegelt diese oben und unten an Metallendplatten. Die Porenwasserspannung wird an der unteren Endfläche der Probe gemessen. Wie in Bild 2 angedeutet, wird ein poröser Stein durch ein mit Wasser gefülltes Kupferrohr mit einem Kapillarrohr verbunden. Wird der Luftdruck in der oberen Hälfte des Kapillarrohrs so eingestellt, dass der Meniskus ständig auf gleicher Höhe bleibt, kann die Spannung im Porenwasser gleich dem Luftdruck angenommen werden. Die in Bild 1 aufgetragenen Porenwasserspannungen wurden auf diese Weise gemessen, wobei man die Probe allseitig mit Flüssigkeitsdruck belastete.

Nun zeigen sowohl Versuche wie Theorie, dass die Porenwasserspannungen, die im Laboratorium durch hydrostatische Belastung einer Probe ermittelt wurden, grösser sind als die am Damm beobachteten (Bishop 1952), weil die Vertikalspannungen in Wirklichkeit bedeutend grösser sind als die Horizontalspannungen. Der Spannungszustand im Damm ist somit anisotrop.

Auch der Einfluss der Anisotropie kann nach der oben beschriebenen Methode in Rechnung gezogen werden. Wird die Probe in einer Triaxialzelle belastet, kann sie ausser mit dem allseitigen Flüssigkeitsdruck mit einem zusätzlichen Vertikaldruck belastet werden, wie Bild 2 zeigt. Auf diese

2) Die Abweichungen können wahrscheinlich dadurch erklärt werden, dass selbst unter drainierten Verhältnissen und nach beendeter Konsolidation Kapillarspannungen in den Poren gewisse Ueberdrücke in der Porenluft verursachen können.

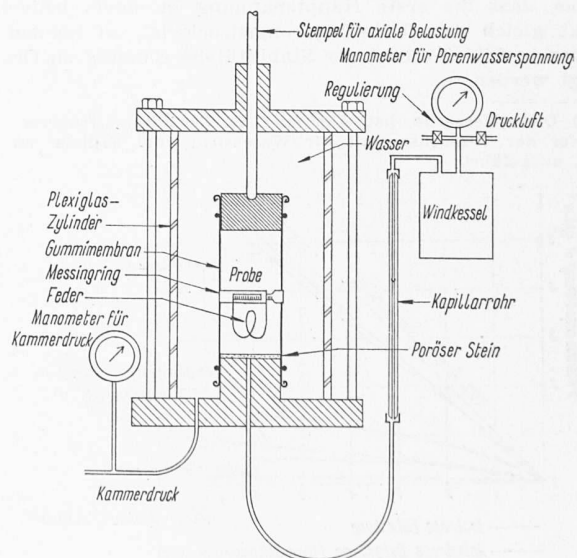


Bild 2. Schematische Darstellung der Versuchsaufstellung bei Messung der Porenwasserspannungen im geschlossenen System

Weise kann die Probe einem beliebigen axialsymmetrischen Spannungszustand unterworfen werden. Für die versuchsmässige Ermittlung der in einem Erddamm zu erwartenden Porenwasserspannungen kann zum Beispiel die Probe so belastet werden, dass das Verhältnis der effektiven Hauptspannungen konstant bleibt — entsprechend einem bestimmten Wert des Sicherheitsfaktors (Bishop 1952). Eine andere Möglichkeit, die annähernd der Wirklichkeit entspricht, besteht darin, die Probe so zu belasten, dass keine seitlichen Ausdehnungen vorkommen. Für die in dieser Arbeit behandelten Versuche entspricht diese Belastungsmethode z. B. einem Sicherheitsfaktor von etwa 1,5.

Um den Einfluss der Anisotropie zu untersuchen, hat man am Geotechnischen Institut Norwegens Vergleichsversuche durchgeführt³⁾. Eine Anzahl identischer, künstlich verdichteter Proben sind im geschlossenen System, auf ständiger Messung der Porenwasserspannungen, auf verschiedene Weise belastet worden. In einer ersten Reihe hat man die Proben hydrostatisch mit einem Flüssigkeitsdruck belastet, wie es in den Dammbaulaboratorien im allgemeinen gemacht wird. In einer zweiten Reihe wurde während der Belastungserhöhung die zusätzliche Vertikalspannung so reguliert, dass der Durchmesser der Probe, gemessen mit einem flexiblen Ring (Bild 2), während des Versuches unverändert blieb. Das Material, das man für die Versuche benützte, ist ein lehmiger Sand mit einem günstigsten Einbauwassergehalt von 8 % (s. Bild 4). Der Einbauwassergehalt der bei den Versuchen verwendeten Proben betrug:

$W = 7\%$	$\gamma_{tr} = 2,11 \text{ t/m}^3$	Sättigung = 68 %
$W = 8\%$	$\gamma_{tr} = 2,13 \text{ t/m}^3$	Sättigung = 81 %
$W = 9\%$	$\gamma_{tr} = 2,10 \text{ t/m}^3$	Sättigung = 86 %

Die Ergebnisse dieser Versuche sind auf den Bildern 3 und 4 dargestellt. Bild 3 zeigt die gemessenen Porenwasserspannungen in Funktion der Belastungserhöhung, wobei zwischen isotroper und anisotroper Belastung getrennt wird. Für die anisotrope Belastung sind die Porenwasserspannungen in Funktion der ersten Hauptspannung aufgetragen. Bild 4 stellt die Porenwasserspannung in Prozenten der Belastungserhöhung als Funktion der Wassergehalte dar. Vergleichshalber ist auch die Verdichtungskurve (Proktorkurve) aufgezeichnet.

3. Hauptergebnisse der Versuche

Die ausgeführten Versuche zeigen, dass es möglich ist, die Porenwasserspannungen versuchsmässig zu ermitteln, die in einem Dammkörper entstehen, wenn während der Bauzeit keine nennenswerte Konsolidation stattfindet. Die in Bild 3 aufgetragenen Kurven zeigen einerseits die Porenwasserspannungen in verschiedenen Tiefen des Dammes gleich nach der Vollendung der Auffüllung, andererseits geben sie auch an, wie die Porenwasserspannung in einem beliebigen Punkt ansteigen wird, wenn die Ueberdeckung bzw. der Ueberlagerungsdruck bei der Hochführung des Dammes wächst. Setzt man voraus, dass die erste Hauptspannung in einem beliebigen Punkt gleich dem Ueberlagerungsdruck ist, so können die Kurven in Bild 3 direkt der Stabilitätsberechnung zu Grunde gelegt werden.

³⁾ Diese Versuche hat Dipl.-Ing. R. Sevaldson, früherer Mitarbeiter der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH, ausgeführt.

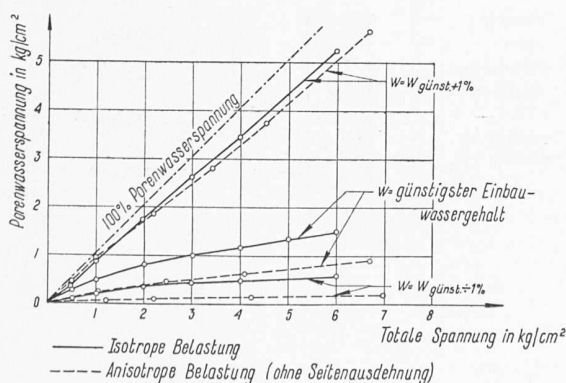


Bild 3. Vergleich der direkt gemessenen Porenwasserspannungen bei isotroper und anisotroper Belastung identischer Proben

Ein Vergleich der bei isotropen und anisotropen Belastungen bestimmten Porenwasserspannungen zeigt, dass die isotrope Belastung zu wesentlich grösseren Werten führt als die eher der Wirklichkeit entsprechende anisotrope Belastung. Der Unterschied ist besonders für relativ trockene Proben so gross, dass dieser Einfluss bei der Stabilitätsberechnung berücksichtigt werden muss. Eine Anwendung der bei isotroper Belastung gemessenen Porenwasserspannungen führt stabilitätsmässig sehr weit auf die sichere Seite, indem sich dabei zu hohe Porenwasserspannungen ergeben. Bild 3 zeigt überdies, dass der Unterschied der beiden Belastungsmethoden bei trockenen Proben am grössten ist. Für den Einbauwassergehalt 9 %, d. h. 1 % höher als der günstigste, fallen die beiden Kurven zusammen. Dies entspricht der Erfahrung, dass der Einfluss der Anisotropie für weiche Böden wie z. B. normal belastete Lehme sehr gering ist.

Die Versuche zeigen endlich, wie empfindlich die Porenwasserspannungen auf den Einbauwassergehalt reagieren. Aus Bild 4 ist z. B. folgendes ersichtlich: Wird das Material beim günstigsten Einbauwassergehalt von 8 % oder etwas trockener im Damm verdichtet, so betragen die Porenwasserspannungen weniger als 30 % der Ueberlagerungsdrücke. Ist der Einbauwassergehalt nur 1 % höher als der günstigste, d. h. 9 %, so muss man mit Porenwasserspannungen von mehr als 90 % rechnen. Hieraus zeigt sich, wie bedeutungsvoll es ist, eine obere Grenze des Einbauwassergehaltes einzuhalten, damit die Entstehung von grösseren stabilitätsgefährdenden Porenwasserspannungen vermieden wird. Diese obere Grenze, die im betrachteten Fall ein wenig höher als der günstigste Einbauwassergehalt liegt, kann direkt aus Bild 4 abgelesen werden.

Die grosse Empfindlichkeit des Materials in bezug auf den Einbauwassergehalt rührt hauptsächlich davon her, dass der Sättigungsgrad mit wachsendem Einbauwassergehalt sehr schnell zunimmt. Je grösser der Sättigungsgrad beim Einbau des Materials, desto grösser werden die Porenwasserspannungen. Demzufolge wird der Prozentsatz des Ueberlagerungsdruckes, der als effektive Spannung von der Festsubstanz unmittelbar aufgenommen wird, entsprechend kleiner, und die Stabilität wird gefährdet. Die Forderung, dass der Einbauwassergehalt eine gewisse Grenze nicht überschreiten darf, entspricht deshalb der Bedingung, dass der Sättigungsgrad unterhalb einem gewissen kritischen Wert liegen soll — eine Feststellung, die bei der Feldkontrolle der Verdichtung beachtet werden muss. Dieser kritische Sättigungsgrad liegt bei sandigen Materialien und Moränen im Bereich von 80 bis 90 %.

Literaturverzeichnis

- [1] Bishop A. W., The stability of earth dams. Thesis London University, London 1952.
- [2] Bjerrum L., Künstliche Verdichtung der Böden. «Strasse und Verkehr», 1952, Nr. 2 bis 5, Zürich.
- [3] Daehn W. W. and Hilf J. W., Implication of pore pressures in design and construction of rolled earth dams. 4. Congrès des grands barrages, New Dehli 1951, Question No. 13, R. 100.
- [4] Hilf J. W., Estimating construction pore pressures in rolled earth dams. 2. International conference on soil mechanics and foundation engineering, Rotterdam 1948, Proceedings, vol. 3.
- [5] U. S. Department of the interior. Bureau of reclamation. Treatise on dams. VIII. Earth dams, Wash. D. C.
- [6] Walker F. C. and Daehn W. W., Ten years of pore pressure measurements. 2. International conference on soil mechanics and foundation engineering, Rotterdam 1948, Proceedings, vol. 3.

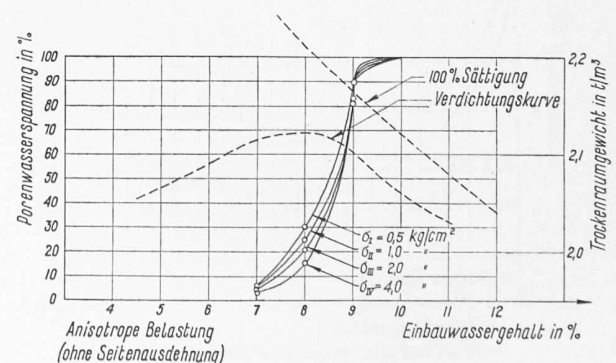


Bild 4. Abhängigkeit der bei anisotroper Belastung gemessenen Porenwasserspannungen vom Einbauwassergehalt der Proben