Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht

Band: 2 (1936)

Artikel: Experimentelle Bestimmungen des Durchlässigkeits-Koeffizienten

Autor: Buisson, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-2886

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: 04.12.2025

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

VIII 7

Experimentelle Bestimmungen des Durchlässigkeits-Koeffizienten.

Détermination expérimentale du coefficient de perméabilité.

Experimental Determination of the Coefficient of Permeability.

M. Buisson,
Chef du Service de Contrôle des Constructions immobilières au Bureau Veritas, Paris.

Die Kenntnis des Durchlässigkeitskoeffizienten ist erforderlich für alle Rechnungen bezüglich der Setzungsgeschwindigkeit, des Durchflusses durch die Fundationen der Staudämme und Staumauern usw.

Für Tonboden wird der Durchlässigkeitskoeffizient gewöhnlich nach den folgenden beiden Methoden von *Terzaghi* bestimmt; erstens die direkte Methode, für welche eine Sondermontage des Oedometers angewendet wird, und zweitens die indirekte Methode, so benannt, weil der Koeffizient K aus den Beobachtungen der Setzungskurven, die ebenfalls mit Hilfe des Oedometers zu bestimmen sind, abgeleitet wird.

Die direkte Methode besteht darin, den Boden nach seiner Verfestigung einem Wasserdruck, hervorgerufen durch eine Wassersäule (Höhe ungefähr 50 cm, Querschnitt s) zu unterwerfen. Bedeutet H_1 die ursprüngliche Höhe der Wassersäule und H_2 die Höhe zur Zeit t, bedeutet ferner 2h die Höhe der Probe im Oedometer und S den Querschnitt des Oedometers, so ist der Durchlässigkeitskoeffizient K_1 gegeben durch die Formel:

$$K_1 = \frac{2\,sh}{S} \cdot \frac{1}{t} \cdot Pn \frac{H_1}{H_2} \qquad (1)$$

Mit Hilfe einer Temperaturkorrektur kann der Koeffizient für 10^0 Celsius berechnet werden.

Die indirekte Methode besteht darin, die Verfestigungskurve zu beobachten und auf dieser Kurve den parabolischen Teil in der Nähe des Ursprungs abzugrenzen. Bedeutet $\Delta\varepsilon$ die Variation der Porenziffer, Δz die während der Zeit t beobachtete Setzung, Δp die Druckzunahme, angewendet nach einer Verfestigung unter dem Druck p_o, $a = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta p}$ die Bettungsziffer, so ist der Koeffizient K_2 bestimmt durch die Gleichung

$$K_2 = \frac{\Delta z^2}{4 \cdot \Delta p^2 \cdot at} = \frac{\Delta z^2}{4 \cdot \Delta p \cdot \Delta\varepsilon \cdot t} \qquad (2)$$

In der indirekten Methode begegnet man gewissen Schwierigkeiten, von denen indessen einige leicht überwunden werden können. Beispielsweise können augenblickliche Setzungen endlichen Wertes auftreten; die Setzungskurve nimmt alsdann parabolischen Charakter an. Mit Hilfe der klassischen Methode ist es leicht, den Scheitel der Parabel zu bestimmen. Wählt man für die Ordinaten das Quadrat der Setzungen und als Abszissen die Zeit, so erhält man eine Gerade mit einer bestimmten Neigung. In gewissen Fällen hingegen ist die Kurve weder eine Parabel noch eine Gerade, je nach dem Maßstab der Ordinaten und die Methode bietet nur dann eine gewisse Annäherung, wenn t klein genug ist; die Methode ist aber in diesem Falle zu ungenau.

Der Vergleich der beiden Formeln (1) und (2) läßt sehr bedeutende Unterschiede zwischen K_1 und K_2 in Erscheinung treten, wenn, und dies ist oft der Fall, H_2 nur nach einer gewissen Zeit abgelesen wird. Diese Zeit ist bestimmt durch die Möglichkeit der Durchführung einer genauen Ablesung.

Ursachen der beobachteten Unterschiede.

Diese Ursachen ergeben sich aus zwei Tatsachen: 1. Die Formel (1) ist auf dem Gesetz von Darcy aufgebaut, das für die ganze Bodenstärke einen Dauerzustand voraussetzt. Im allgemeinen wird H_2 schon abgelesen, bevor der Dauerzustand erreicht ist. Die plötzliche Drucksteigerung von 0 bis H_1 wirkt gänzlich auf das Wasser der Proben. Da aber an der Oberfläche der Druck nur 0 sein kann, folgt, daß nach sehr kurzer Zeit der hydraulische Gradient zwischen dem Wasser des Tones (Druck H_1) und dem äußeren Wasser (Druck 0) sehr groß ist. In der Folge hat das hydraulische Gefälle die Tendenz, langsam abzunehmen, entsprechend dem in Fig. 1 dargestellten Vorgang.

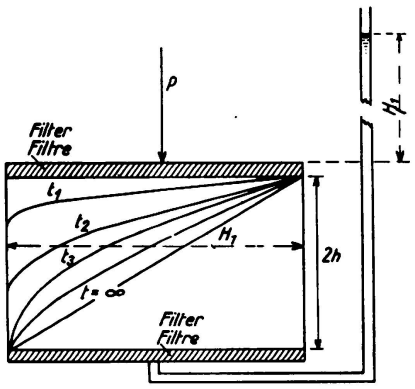


Fig. 1.
Verteilung des Wasserdruckes im Innern einer Tonschicht für $t = 0$ bis $t = \infty$.

Zu Beginn des Versuches ist also die Geschwindigkeit des Wassers größer als am Ende und die scheinbare Durchlässigkeit somit ebenfalls größer.

Es bedeutet q die Wassermenge, die in der Zeit t die Oberfläche des Tones durchdrungen hat (diese Wassermenge ist die gleiche für die untere wie für die obere Fläche; es wird übrigens keinerlei Quellen beobachtet).

Es sei ε die Porenziffer; H_1 der während des Versuches als konstant betrachtete Druck, γ das spezifische Gewicht des Wassers, K der Durchlässigkeitskoeffizient, $c = \frac{K}{\gamma a (1 + \varepsilon)}$ der Verfestigungskoeffizient, $a = \frac{d\varepsilon}{dp}$ die Bettungsziffer, 2h die Höhe der Probe.

Die Durchflußgeschwindigkeit $\frac{dq}{dt}$ ist durch die folgende Fourier'sche Reihe gegeben

$$\frac{dq}{dt} = \frac{K}{\gamma} \cdot \frac{H_1}{h} \left(\frac{1}{2} + \sum_1^{\infty} e^{-\frac{\pi^2 c n^2 t}{4 h^2}} \right).$$

Diese Geschwindigkeit strebt dem Grenzwert des Dauerzustandes $\frac{K}{\gamma} \cdot \frac{H_1}{2h}$, die aus dem Gesetz von Darcy für t unendlich folgt, zu.

Für den Fall des Tones, dessen Verfestigungskoeffizient c oft von der Größenordnung 10^{-3}, ist es leicht zu ersehen, daß der Dauerzustand praktisch erst nach ungefähr 24 Stunden erreicht ist. Wenn bei der Messung auf diese Tatsache keine Rücksicht genommen wird, treten Fehler auf, die umso größer sind, je größer der Wasserdruck ist, denn die nach der Formel (1) ermittelten Werte nehmen mit H_1 stark zu. Das oben Besprochene rechtfertigt bis zu einem gewissen Grade die ursprünglich von *Terzaghi* angegebene Methode. Der Wasserdruck betrug 50 gr/cm²; für einen veränderlichen Wert t traten infolgedessen zwischen den erhaltenen Koeffizienten keine wesentlichen Unterschiede auf. Um eine genügend genaue Ablesung zu erhalten, muß mit Rücksicht auf die geringe Wassermenge, die in den Boden dringt, genügend lang gewartet werden, so daß zur Zeit der Ablesung der Dauerzustand annähernd erreicht ist. Im Gegensatz dazu wird der Fehler sehr groß, wenn der Wasserdruck gesteigert wird, was von gewissen Forschern angeordnet wurde, um die Versuchsdauer abzukürzen. Die Figuren 2 und 3 geben die Veränderlichkeit des Wertes K, gerechnet nach der Formel (1) in Funktion der Zeit und des Wasserdruckes H_1. Sie zeigen, daß die Zeit, die zur Herstellung des Dauerzustandes erforderlich, mehr oder weniger die gleiche ist, welches auch der Wasserdruck sei.

Will man den Versuch rascher durchführen, was einen höheren Wasserdruck bedingt, kann das Integral von *Cauchy* benützt werden, um eine genaue Ablösung zu erhalten; solange $\frac{c\pi^2 t}{4h^2} < \frac{1}{10}$ ist, gibt es ein praktisch genaues Resultat. Mit $c = 10^{-3}$ muß t kleiner sein als 40 Minuten. Von diesem Integral ausgehend, kann man zeigen, daß die durch den Boden hindurchgedrungene Wassermenge gegeben ist durch die Formel $q = \frac{2 S K_3 H_1 \sqrt{t}}{\gamma \sqrt{\pi c}}$

$$\text{woraus } K_3 = \frac{\pi q^2 \gamma}{4 a S^2 H^2_1 t (1+\varepsilon)} \quad \text{weil } c = \frac{K_3}{\gamma a (1+\varepsilon)} \text{ ist.} \tag{3}$$

Diese Formel enthält den Wert 2h nicht mehr, da man mit dem Integral von *Cauchy* die Bedingungen so ausdrückt, daß die Dicke der Probe nicht mehr in Erscheinung tritt. Da $q = s \cdot (H_1 - H_2)$ ist, ergibt sich daraus

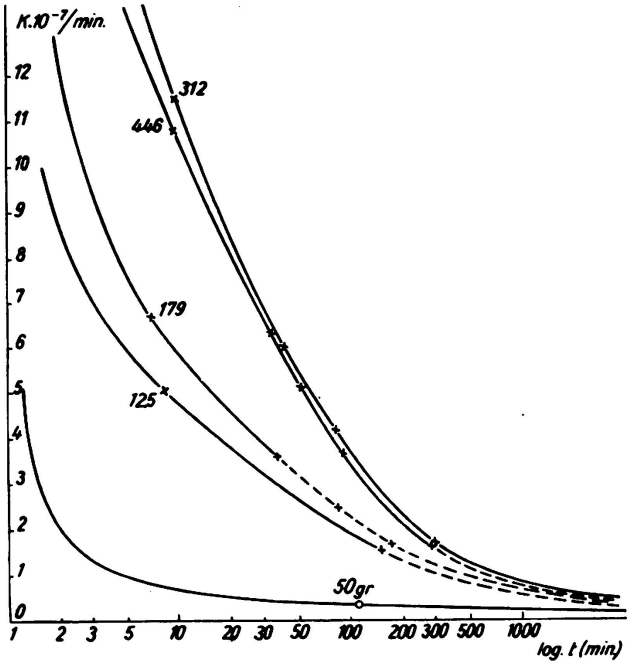
$$K_3 = \frac{\pi s^2 (H_1 - H_2)^2 \gamma}{4 a S^2 H^2_1 (1+\varepsilon) t}.$$

Indessen sind wohl noch andere Erscheinungen von Einfluß, doch haben wir noch zu wenig Vergleiche anstellen können, um diese Formeln jetzt schon empfehlen zu dürfen.

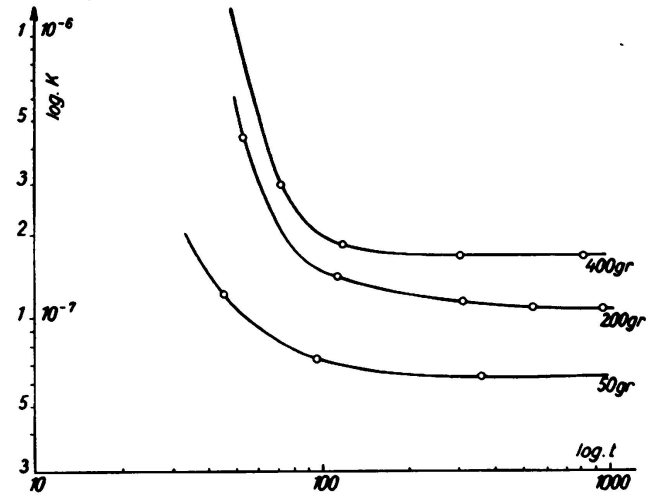
Mehrere Tatsachen scheinen aber doch festgelegt zu sein. Die praktisch erforderliche Zeitdauer zur Herstellung des Dauerzustandes ist umso größer, je kleiner der Durchlässigkeitskoeffizient ist. (Diese Dauer ist praktisch 1—2 Stunden, wenn K in der Größenordnung von 10^{-6} cm/min und 1 Tag, wenn K in Größenordnung von 10^{-7} cm/min ist). Der zu Beginn des Versuches bestimmte Durchlässigkeitskoeffizient ist oft um mehr als 10 mal größer als der am Ende

bestimmte Koeffizient, was aus dem oben Gesagten als selbstverständlich erscheint. Verschiedene Forscher führen diese Erscheinung auf die Selbstdichtung zurück.

Wir sind nicht dieser Meinung. Reduziert man nämlich den Druck auf 0 und wartet man, bis sich die inneren Wasserdrücke ausgeglichen haben, so findet man wieder die gleichen Werte, falls der Versuch wiederholt wird. Es ist unwahrscheinlich, daß die Erscheinung der Dichtung nicht eine dauernde wäre.



Boden, für den das Gesetz von Darcy gilt.



Boden, für den das Gesetz von Darcy nicht gilt.

Fig. 2 und 3.

Werte des Durchlässigkeits-Koeffizienten in Funktion der Zeit unter verschiedenen Wasserdrücken. Der aufgebrachte Druck ist konstant.

2. Die zweite Ursache für die Verschiedenheit zwischen den Ergebnissen der direkten und indirekten Methode ergibt sich aus der Tatsache, daß der Endwert des Durchlässigkeitskoeffizienten für den gleichen Wert des Verfestigungsdruckes oft in sehr empfindlicher Weise mit dem Wasserdruck variiert.

Ganz allgemein wächst der Durchlässigkeitskoeffizient mit dem Wasserdruck, besonders bei schwachen Wasserdrücken. Abweichungen sind festgestellt, doch ist der Grund für diese Erscheinung noch nicht geklärt. Bei den Oedometerversuchen werden die Verfestigungskurven, die zur indirekten Bestimmung von K dienen, durch Überdrücke erhalten. Diese Überdrücke sind für Auflasten von weniger als 3 kg/cm² gleich den ursprünglichen Auflasten und bei größeren Auflasten halb so groß wie die ursprünglichen Auflasten. Daraus folgt, daß der hydrodynamische Druck den Wert von 50 gr/cm², der gewöhnlich für die direkte Bestimmung von K verwendet wird, um ein bedeutendes übersteigt. Es ergibt sich hieraus, daß in gewissen Fällen der nach der direkten Methode bestimmte Durchlässigkeitskoeffizient zu klein ermittelt wird. Da der direkt bestimmte Wert des Koeffizienten ohne das Entstehen des Dauerzustandes abzuwarten, zu groß ist, können sich beide Fehler ausgleichen und es kommt tatsächlich häufig

vor, daß die beiden bestimmten Koeffizienten für viele Laboratoriumsversuche übereinstimmen. Die bis heute erzielten Ergebnisse sind sehr ermutigend. Gewisse Unterschiede scheinen jedoch vorhanden zu sein. Indessen sind die festgestellten Fehlergrenzen in vielen Fällen schon erheblich verkleinert worden. Die zwischen den rasch und nach Erreichung des Dauerzustandes bestimmten Koeffizienten bestehenden Unterschiede gestatten das bessere Verständnis des Vorganges der

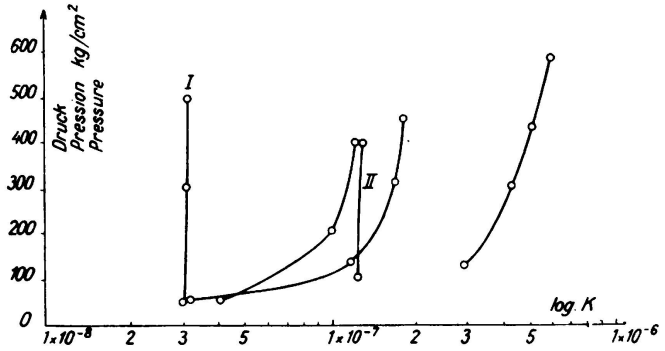


Fig. 4.

Werte der wirklichen Durchlässigkeits-Koeffizienten (für den Dauerzustand) in Abhängigkeit des Wasserdruckes, wobei der aufgebrachte Wasserdruck für jeden Fall konstant bleibt. Für die Böden No. I und II gilt das Gesetz von Darcy, für die andern nicht.

Nebenerscheinung der Verfestigung. Im Druckversuch mit Hilfe des Oedometers trägt alles zur Verminderung des Durchlässigkeitskoeffizienten bei. Nach Maßgabe der Verfestigung vermindert sich das Druckgefälle in sehr starkem Maße, so daß der Durchlässigkeitskoeffizient abnimmt.

Die Tatsache, daß wenigstens zu Beginn der Verfestigung, die Verfestigungskurve durch eine Parabel dargestellt werden kann, zeigt, daß während wenigstens dieser Periode der Durchlässigkeitskoeffizient mehr oder weniger konstant bleibt. Der Durchlässigkeitskoeffizient wächst nicht stetig mit dem Wasserdruck, sondern er strebt einer Konstanten zu. Dies haben wir wenigstens für eine gewisse Anzahl Fälle beobachten können. Die Frage bezüglich der Durchlässigkeit sollte den Gegenstand von ergänzenden Untersuchungen bilden. Dies versuchen wir zu tun.

Schlußfolgerungen.

Der Durchlässigkeitskoeffizient kann nur dann mit Sicherheit bestimmt werden, wenn der Dauerzustand erreicht ist. Bis dieser Zustand erreicht ist, dauert es umso länger, je kleiner der Durchlässigkeitskoeffizient ist. In gewissen Fällen nimmt der Durchlässigkeitskoeffizient mit dem Wasserdruck zu.