Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 107/108 (1936)
Heft: 4

Artikel: Beitrag zur Berechnung der Standsicherheit von Erddämmen
Autor: Meyer-Peter, E.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-48335

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: 09.08.2025

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

INHALT: Beitrag zur Berechnung der Standsicherheit von Erddämmen. — Erweiterungsbau Hotel Acker in Wildhaus. — Zwei Pfarrhäuser im Kanton St. Gallen. — Raumakustische Probleme. — Metalldampf-Lampen und ihre Anwendungen. — Zürcher Strassenbeleuchtungsanlagen mit Gasentladungslampen. — Mitteilungen: Entwicklung des Sulzer-Dieselmotors in den letzten Jahren. Leichte Fahrbahndecken auf stählernen Strassenbrücken. Internat. Konferenz über Bodenmechanik und Fundationsprobleme. Zellwolle. Ausbildung von Flugzeug-Technikern am Technikum Burgdorf. Indirekte Beleuchtung eines Platzes mit Kreiselverkehr. Der Bau der Berliner Nord-Süd-S-Bahn. Subventionen an Hochbau-Renovationsarbeiten. Direktor des E. W. St. Gallen. Direktor der Trambahn St. Gallen. — Wettbewerbe: Kirchliche Gebäudegruppe in Winterthur. Erweiterung des Kantonsspitals in St. Gallen. — Mitteilungen der Vereine.

Band 108 Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet. Nr. 4

Beitrag zur Berechnung der Standsicherheit von Erddämmen.

Von Prof. Dr. E. MEYER-PETER, Dr. HENRY FAVRE und Dipl. Ing. R. MÜLLER.

Die üblichen Methoden der Berechnung der Standsicherheit von Erddämmen und Uferböschungen beruhen darauf, dass die Sicherheit gegen das Gleiten der Erdmassen nach kreiszylinderförmigen Gleitflächen untersucht wird. Der hierbei in Betracht kommende Spannungszustand kann als zweidimensional aufgefasst werden. Falls im Boden keine Grundwasserströmung auftritt, wirken auf die Einzelelemente des betrachteten Erdsegmentes nur die Erdschwere und der hydrostatische Auftrieb (von den Kapillarkräften wird hier abgesehen). Bei einem Staudamm, der mit einem praktisch dichten Kern versehen ist, während die Dammasse auf der Wasserseite und der Luftseite aus einem stark durchlässigen Material besteht, kann mit für das praktische Endresultat genügender Genauigkeit angenommen werden, dass der durch den Stau erzeugte hydrostatische Wasserdruck an der wasserseitigen Begrenzung des Kerns konzentriert wirke.

Die Lösung der Aufgabe ist aber nicht so einfach, wenn der Dammquerschnitt kein absolut dichtes Diaphragma enthält, weil dann der ganze Querschnitt von Sickerwasser durchströmt wird. Die Angriffspunkte der Wasserdrücke sind nicht mehr ohne weiteres anzugeben, vielmehr muss berücksichtigt werden, dass zufolge dieser Sickerströmung Reibungskräfte auf das Dammaterial im ganzen Bereich des Strömungsfeldes auftreten. Es wird sich auch zeigen, dass der Auftrieb, den der Boden erleidet, nicht mehr senkrecht steht.

Noch verwickelter werden die Verhältnisse, wenn die Standsicherheit der wasserseitigen Dammböschung für den Fall einer raschen Absenkung des Stauspiegels untersucht werden soll, weil sich in diesem Falle eine ganz andere Sickerströmung im Damm-Innern einstellt, die — streng genommen — nicht einmal mehr stationär ist. Zwar kann in vielen Fällen, bei rascher Absenkung und wenig durchlässigem Material, die entstehende Strömung als quasi-stationär aufgefasst werden, wodurch sich eine Vereinfachung ergibt. Immerhin bedarf auch in diesem Falle die Konstruktion des Strömungsbildes einer besonderen Ueberlegung.

Der Zweck dieses Aufsatzes besteht in einer Zusammenfassung der in der Literatur zerstreut vorliegenden Grundlagen des Problems der Dammberechnung unter besonderer Berücksichtigung der bis anhin wenig behandelten Aufgabe der Untersuchung des Einflusses von Wasserspiegelabsenkungen.

I. Sickerströmung.

1. *Damm mit homogenem Querschnitt.*

Unter der Voraussetzung einer laminaren Sickerströmung, oder, was gleichbedeutend ist, im Falle der Gültigkeit des Darcy'schen Sickergesetzes, die bei den verwendeten Dammaterialien zutreffen dürfte, kann zur Konstruktion des Strömungsbildes die Theorie der Potentialströmung herangezogen werden (siehe z. B. Forchheimer, Hydraulik, 1914/30). Im Prinzip kann diese als bekannt vorausgesetzt werden, sodass es hier nur nötig ist, die grundlegenden Gleichungen anzuführen und die sich daraus ergebenden Berechnungsmethoden zu skizzieren.

Da die Strömung nach Voraussetzung ein Potential besitzt, das wir mit Φ bezeichnen, so ergibt sich die Geschwindigkeit bei ebener Strömung zu

$$v_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad v_z = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

oder in vektorieller Darstellung

$$\mathfrak{v} = \text{grad}\, \Phi \quad . \quad . \quad (1a)$$

Ferner gilt die Laplace'sche Gleichung:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad . \quad (2)$$

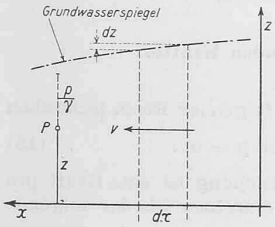

Abbildung 1.

Das Geschwindigkeitspotential Φ kann aus dem Gesetz von Darcy abgeleitet werden. Dieses lautet bekanntlich für den einfachen Fall, dass die Strömung praktisch horizontal ist

$$\left.\begin{aligned} v_x &= k\,J = -\,k\,\frac{dz}{dx} \\ v_z &\cong 0 \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Hierin bedeutet gemäss Abb. 1:

v_x und v_z die Komponente der Geschwindigkeit in Richtung der Koordinatenaxen;

$J = -\dfrac{dz}{dx}$ das relative Grundwasserspiegelgefälle;

k den Durchlässigkeitskoeffizienten.

Allgemein sagt das Darcy'sche Gesetz aus, dass die Geschwindigkeit proportional ist zum relativen Piezometerstandgefälle. Ist für den Punkt P (Abb. 1) die geodätische Höhe gleich z, die hydraulische Druckhöhe gleich $\dfrac{p}{\gamma}$, so ist das in Frage kommende Piezometergefälle ausgedrückt durch $J = -\dfrac{\partial}{\partial s}\left(z + \dfrac{p}{\gamma}\right)$

∂s ist in der Strömungsrichtung zu messen. Damit wird

$$|\,\mathfrak{v}\,| = -\,k\,\frac{\partial}{\partial s}\left(z + \frac{p}{\gamma}\right) \quad \text{oder}$$

$$\mathfrak{v} = -\,k\,\text{grad}\left(z + \frac{p}{\gamma}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Durch Gleichsetzung der Werte von $\mathfrak{v}$ aus den Gleichungen (1a) und (4) ergibt sich das Geschwindigkeitspotential zu

$$\Phi = -\,k\left(z + \frac{p}{\gamma}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Für die Konstruktion des Strömungsbildes wird die von F. Prasil[1]) gegebene Näherungsmethode angewendet. Es handelt sich um die Aufzeichnung der Aequipotentiallinien $\Phi =$ konst. und der Stromlinien $\psi =$ konst., welch letztere orthogonale Trajektorien der ersteren darstellen. Jede feste undurchlässige Begrenzung des Strömungsfeldes ist eine Stromlinie. In Abb. 2 kommt als solche die undurchlässige Bodenschicht in Betracht.

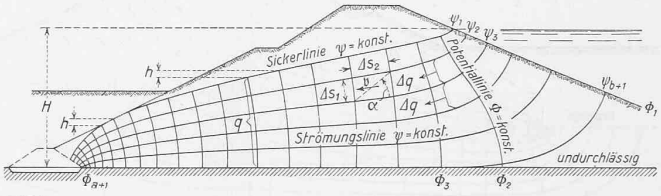

Abbildung 2.

Die wasserseitige, durchlässige Dammböschung ist eine Aequipotentiallinie, ebenso die innere Begrenzung des als Drainage wirkenden luftseitigen Dammfusses. Man sucht nun ein Netz von orthogonalen Trajektorien einzuzeichnen, welches diesen Grenzbedingungen genügt.

Dabei ist noch folgendes zu beachten:

Die totale zur Verfügung stehende Potentialdifferenz ist $+\,k\,H$. Man wählt nun die Aequipotentiallinien so, dass

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \Phi_2 - \Phi_3 = \Delta\Phi = k\,\frac{H}{a} = k\,h \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

wobei $a + 1$ die Anzahl der Potentiallinien ist. Ferner sollen die Stromlinien so gelegt werden, dass in den durch sie begrenzten Stromfäden eine konstante Wassermenge

$$\Delta q = \frac{q}{b} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

fliesst. Darin bedeutet

q die totale Sickermenge pro m Dammlänge ($m^2 sec^{-1}$);

$b + 1$ die Anzahl Stromlinien;

Δq die pro Stromfaden und m Dammlänge durchsickernde Wassermenge ($m^2 sec^{-1}$).

Nun ergibt sich aus Gleichung (1a) und mit Berücksichtigung von Abb. 2:

$$v = \frac{\Delta\Phi}{\Delta s_2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

ferner

$$\Delta q = v\,\Delta s_1 = \Delta\Phi\,\frac{\Delta s_1}{\Delta s_2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

[1]) *F. Prasil*, Technische Hydromechanik, 1926; siehe auch *Ph. Forchheimer*, Hydraulik, 1914 und 1930, sowie *René Koechlin*, Mécanisme de l'eau, Tome 2, 1926, und *Paul Neményi*, Wasserbauliche Strömungslehre, 1933.

Wenn nun Δq nach obiger Voraussetzung konstant sein soll, so muss auch $\frac{\Delta s_1}{\Delta s_2} = \operatorname{tg}\alpha =$ konst. werden, d. h. das zu konstruierende Strömungsnetz muss aus lauter ähnlichen Rechtecken gebildet werden.

Da ferner die Theorie der Potentialströmung lehrt, dass

$$v = \frac{\Delta\psi}{\Delta s_1} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (10)$$

oder

$$\Delta q = v\,\Delta s_1 = \Delta\psi$$

so ergibt sich weiter

$$\Delta\Phi\,\frac{\Delta s_1}{\Delta s_2} = \Delta\psi \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (11)$$

Unter Umständen ist es von Nutzen, $\Delta\Phi = \Delta\psi$ zu wählen, weil dann $\frac{\Delta s_1}{\Delta s_2} = \operatorname{tg}\alpha = 1$ wird, wodurch das Rechtecksnetz zu einem quadratischen wird.

Praktisch geht man am besten so vor, dass man das Verhältnis $\frac{\Delta s_1}{\Delta s_2}$ und die Anzahl der Potentiallinien $a + 1$, oder, was dasselbe ist, die Potentialdifferenz $\Delta\Phi$ frei wählt und unter Berücksichtigung einer gegebenen Stromlinie (hier undurchlässige Schicht) das Netz aufzeichnet. Werden dadurch die übrigen Grenzbedingungen nicht erfüllt, so muss die Konstruktion nach Aenderung von $\frac{\Delta s_1}{\Delta s_2}$ neu begonnen werden.

Die totale Sickermenge, die pro Meter Dammlänge zu erwarten ist, beträgt

$$q = b\,\Delta q = b\,\Delta\Phi\,\frac{\Delta s_1}{\Delta s_2} = k\,H\,\frac{b}{a}\operatorname{tg}\alpha \quad . \; . \; . \quad (12)$$

Bei gegebener Dammform und gegebenem Wert H ist $\frac{b}{a}\operatorname{tg}\alpha$ ein Ausdruck des Strömungsbildes, das unabhängig ist vom Durchlässigkeitskoeffizienten k. Die Sickermenge ist also proportional k.

2. Damm mit inhomogenem Querschnitt.

Ein solcher ist in Abb. 3 dargestellt. Der Damm besteht aus einem relativ dichten Kern und einer beidseitig angeschütteten

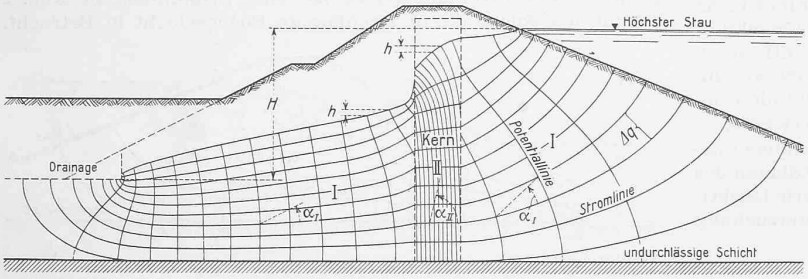

Abbildung 3.

durchlässigeren Hauptmasse. Zur Aufzeichnung des Strömungsbildes ist das Verhältnis der beiden Durchlässigkeiten, also $\frac{k_I}{k_{II}}$ erforderlich. Man wird selbstverständlich in beiden Materialien die gleiche Anzahl Stromlinien und dieselbe Potentialdifferenz $\Delta\Phi$ wählen, dann gilt für den konstanten Durchfluss zwischen je zwei solcher Linien

$$\Delta q = k_I\,\frac{H}{a}\operatorname{tg}\alpha_I = k_{II}\,\frac{H}{a}\operatorname{tg}\alpha_{II}$$

woraus:

$$\frac{\operatorname{tg}\alpha_{II}}{\operatorname{tg}\alpha_I} = \frac{k_I}{k_{II}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (13)$$

Im übrigen bedarf die Konstruktion keiner weiteren Erläuterung, es ist aber leicht zu überblicken, dass ihre Durchführung wesentlich zeitraubender wird, als bei homogenem Querschnitt.

3. Damm mit praktisch undurchlässigem Kern bei rascher Absenkung des gestauten Wasserspiegels.

In Abb. 4 ist angenommen, der Damm bestehe aus einem absolut dichten Kern, einer relativ durchlässigen Hauptmasse auf der Wasserseite und einem stark durchlässigen Kiesmantel. Nachdem der Stau längere Zeit auf konstantem Niveau gehalten wurde, sodass sich im Dammaterial bis zum Kern ein horizontaler Grundwasserspiegel eingestellt hat, werde nun der Stauspiegel rasch um einen gewissen Betrag abgesenkt. Der Kiesmantel werde gleichzeitig mit der Absenkung des äussern Wasserspiegels entleert. In der Hauptmasse des Dammes entsteht dann eine nicht stationäre Sickerströmung; je weniger durchlässig aber diese Hauptmasse ist, umso geringer wird die bei rascher

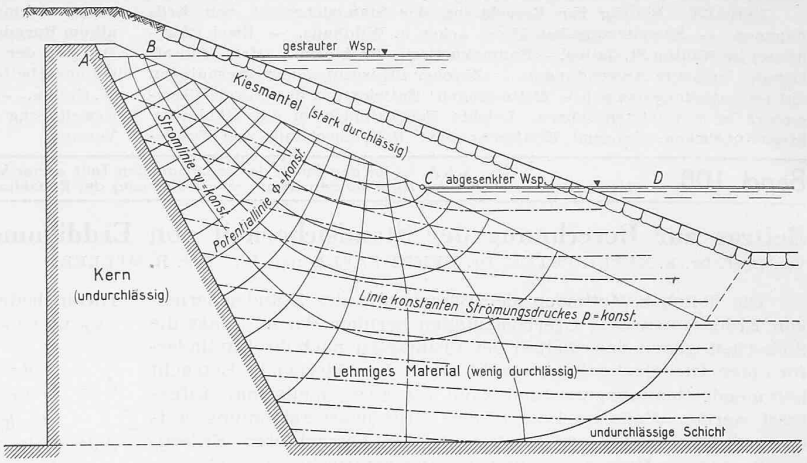

Abbildung 4.

Spiegelabsenkung mögliche Absenkung des Grundwassers sein. Als Extremfall, der auch für die später zu besprechende statische Untersuchung die ungünstigsten Voraussetzungen liefern wird, soll nun ein Zustand untersucht werden, bei dem noch gar keine Absenkung des Grundwassers eingetreten ist, sodass im Damminnern der Grundwasserspiegel noch auf der ursprünglichen Höhe liegt, während die Absenkung aussen bereits vollzogen ist. Bei wenig durchlässigem Material lässt sich der Nachweis dafür liefern, dass dieser Extremfall tatsächlich der Wahrheit nahe kommt. Die Bewegung wird als quasi-stationär behandelt, weil alle partiellen Ableitungen nach der Zeit verschwindend klein sind.

Zur Konstruktion des Strömungsbildes zeigt es sich hier als vorteilhaft, neben den Aequipotential- und Stromlinien noch eine dritte Kurvenschar, die Linien gleichen Strömungsdruckes, einzuzeichnen. Eine solche ist als Grenzbedingung gegeben: nämlich die Horizontale A—B des ursprünglichen Grundwasserspiegels im Damminnern und dann die Begrenzung B—C zwischen Dammaterial und Kiesbelag. Ferner bildet der abgesenkte Wasserspiegel C—D die Fortsetzung dieser Linie gleichen Druckes $p =$ konst. $= p_0$ (atm. Druck).

Es ist nun möglich, einen gesetzmässigen Zusammenhang zwischen den Stromlinien $\psi =$ konst. und den Linien gleichen Druckes $p =$ konst. anzugeben.

In Abb. 5 sind alle drei Kurvenscharen schematisch dargestellt. Für den Punkt M auf der Potentiallinie Φ_1 und der Ordinate z_1 ist nämlich nach Gl. (5)

$$\Phi_1 = -\,k\left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma}\right)$$

oder

$$\frac{p_1}{\gamma} = -\,\frac{\Phi_1}{k} - z_1$$

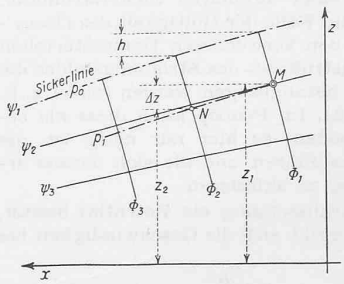

Abbildung 5.

Für einen gesuchten Punkt N auf der Potentiallinie Φ_2, für welchen die hydraulische Druckhöhe gleich gross wie für M sein soll, gilt daher auch:

$$\frac{p_2}{\gamma} = \frac{p_1}{\gamma} = -\,\frac{\Phi_2}{k} - z_2$$

Hieraus ergibt sich:

$$z_1 - z_2 = \Delta z = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{k}$$

$$= \frac{\Delta\Phi}{k} = \frac{H}{a} = h \quad (14)$$

Bei bekannten Stromlinien und Aequipotentiallinien lassen sich darnach die Linien gleicher hydraulischer Druckhöhe leicht konstruieren und umgekehrt kann diese Beziehung bei bekannten Linien gleicher Druckhöhe zur Bestimmung der Stromlinien benützt werden.

II. Die im Innern des Dammes wirkenden Kräfte.

1. Kräfte, die auf das Wasser wirken.

Gleichung (4) lässt sich auch in folgender Form schreiben

$$\frac{\gamma\,\mathfrak{v}}{k} + \gamma\,\operatorname{grad} z + \operatorname{grad} p = 0 \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (15)$$

Die Dimension jedes Gliedes dieser Gleichung ist eine Kraft pro Volumeneinheit und zwar haben die einzelnen Glieder folgende Bedeutung:

$\mathfrak{G} = -\gamma \text{ grad } z$ ist das Gewicht . . . (16)

$\mathfrak{P} = - \text{ grad } p$ ist der Auftrieb . . . (17)

$\mathfrak{R} = -\dfrac{\gamma \mathfrak{v}}{k}$ ist die Reibungskraft . (18)

Gleichung (15) bringt also den Gleichgewichtszustand dieser drei Kräfte zum Ausdruck (siehe Abb. 6). Die Trägheitskräfte sind hier wegen der sehr kleinen Geschwindigkeiten zu vernachlässigen. Während nun beim ruhenden Wasser nur die Kräfte $\mathfrak{G}$ und $\mathfrak{P}$ wirken und infolgedessen beide senkrecht gerichtet sind (das Wasserteilchen «schwimmt» in seiner Umgebung), tritt im bewegten Zustand die Reibungskraft hinzu, die nach Gl. (18) parallel zum Geschwindigkeitsvektor verläuft, aber entgegengesetzt gerichtet ist. Die Gleichgewichtsbedingung (15) sagt also aus, dass der Auftrieb nicht mehr senkrecht steht.

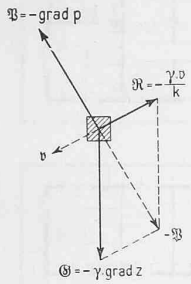

Abbildung 6.

Da nach Gleichung (18) $\mathfrak{R} = -\dfrac{\gamma \mathfrak{v}}{k}$ und nach Gl. (4)

$\mathfrak{v} = -k \text{ grad} \left(z + \dfrac{p}{\gamma}\right)$ so ergibt sich, dass

$$\mathfrak{R} = \text{grad } (\gamma z + p)$$

also unabhängig vom Durchlässigkeitskoeffizienten k ist, weil ja auch p davon unabhängig ist. Bei homogenen Dämmen erübrigt sich also die Kenntnis von k für den Ansatz der Massenkräfte. Sie ist dagegen für die Beurteilung der Durchsickerungen erforderlich.

2. Kräfte, die auf die Bodenteilchen wirken.

Die auf die Einzelkörner des Dammaterials wirkenden Kräfte können im Rahmen des Dammprofils als Massenkräfte aufgefasst werden. Es kommen folgende Kräfte in Frage:

a) Das Eigengewicht des Bodens ist für die Volumeneinheit bei einem spezifischen Gewicht γ_s und einem Porenvolumen n bekanntlich gleich

$$|\mathfrak{G}'| = (1 - n)\, \gamma_s \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (19)$$

b) Die Reibungskraft der Strömung ist nach dem Gesetz von actio und reactio gleich, aber entgegengesetzt der auf das Wasser wirkenden Reibung. Da nun in der Volumeneinheit Boden n Volumenteile Wasser enthalten sind, muss also die pro Volumeneinheit Boden wirkende Reibungskraft den Wert:

$$\mathfrak{R}' = +\frac{\gamma n}{k}\, \mathfrak{v} \text{ haben.} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (20)$$

c) Der Auftrieb kann auf zwei verschiedene Arten berechnet werden:

Erstens kann der auf die Volumeneinheit Wasser wirkende Auftrieb $\mathfrak{P}$ herangezogen werden. Dieser wird gemäss Abb. 6 und Gl. (15) aus den beiden Kräften $\mathfrak{G}$ (Gl. 16) und $\mathfrak{R}$ (Gl. 18) bestimmt, vorausgesetzt, dass das unter I behandelte Strömungsbild bekannt ist. Nachdem nämlich $\mathfrak{P}$ bestimmt ist, ermittelt sich der auf die Volumeneinheit Boden wirkende Auftrieb ohne weiteres aus

$$\mathfrak{P}' = (1 - n)\, \mathfrak{P}\,, \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (21)$$

da ja einerseits das in dieser Volumeneinheit enthaltene Volumen der festen Körper $1 - n$ beträgt und anderseits $\mathfrak{P}'$ parallel und gleichgerichtet mit $\mathfrak{P}$ verläuft.

Zweitens können auch die unter I,3 behandelten Kurven $p =$ konst. benützt werden. Sind dieselben aufgezeichnet, so ist für jeden Punkt des Strömungsfeldes grad p bekannt und es ergibt sich nach Gl. (21) und (17)

$$\mathfrak{P}' = -(1 - n) \text{ grad } p \quad (22)$$

Damit sind nun (ausser der hier vernachlässigten Kapillarkraft) alle auf die Volumeneinheit Boden wirkenden Kräfte bestimmt. Die Resultierende derselben, die in Abb. 7 graphisch bestimmt ist,

$$\mathfrak{A} = \mathfrak{G}' + \mathfrak{R}' + \mathfrak{P}' \quad . \; . \quad (23)$$

ist die gesuchte Massenkraft, die in die statische Berechnung einzusetzen ist.

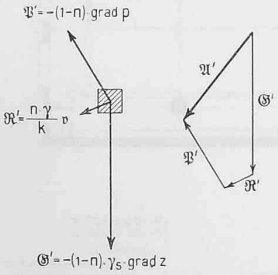

Abbildung 7.

III. Standsicherheit des Dammes.

Die Untersuchung der Gleitsicherheit der Erdmassen kann nunmehr nach irgend einer Methode zur Prüfung der Stabilität, z. B. nach der bekannten Methode der kreisförmig gekrümmten Gleitlinien erfolgen, indem man den über einer angenommenen Gleitlinie ABD (Abb. 8) liegenden Erdkörper in Lamellen einteilt.

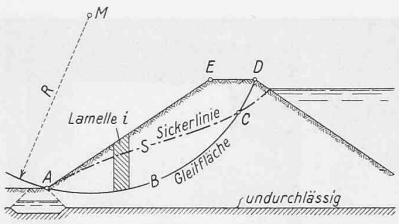

Abbildung 8.

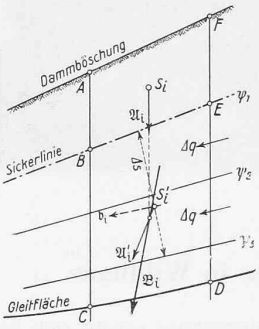

Abbildung 9.

Für jede dieser Lamellen sind die aus dem Eigengewicht und der Sickerströmung sich ergebenden Massenkräfte einzuführen. Betrachtet man eine beliebige Lamelle i des Segmentes $ABDEA$, so liegt ein Teil derselben oberhalb, ein anderer Teil unterhalb der Sättigungs- oder Sickerlinie. In Abb. 9 ist eine solche Lamelle hervorgehoben. Der obere Teil $A\,B\,E\,F$ liefert nur Vertikalkräfte. Bezeichnet man mit $\gamma_e{}^*$ das Raumgewicht des über der Sickerlinie liegenden, mehr oder weniger feuchten Bodens und mit V_i das Volumen des Segmentteils $A\,B\,E\,F$, so wird die genannte Kraft:

$$|\mathfrak{A}_i| = V_i \gamma_e{}^*$$

Der untere Segmentteil $B\,C\,D\,E$ wird von einer Anzahl r Stromfäden durchzogen. Der Einfachheit halber wird man den Näherungsweg beschreiten, der darin besteht, dass man die Richtung und Grösse von $\mathfrak{v}$ aus diesen r Stromfäden mittelt; dieser Mittelwert sei $\mathfrak{v}_i$. Es sei $V_i{}'$ das Volumen des Segmentes. Dann beträgt dessen Gewicht nach Gl. (19):

$$|\mathfrak{G}_i'| = \gamma_s\, (1 - n)\, V_i' \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (19a)$$

ferner die Reibungskraft nach Gl. (20)

$$\mathfrak{R}_i' = +\frac{\gamma n}{k}\, \mathfrak{v}_i V_i' \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (20a)$$

und endlich der Auftrieb nach Gl. (21) bezw. nach (17):

$$\mathfrak{P}_i' = (1 - n) \text{ grad } p\, V_i' \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (21a)$$

Die Resultierende dieser Kräfte ist

$$\mathfrak{A}_i' = \mathfrak{G}_i' + \mathfrak{R}_i' + \mathfrak{P}_i'$$

und schliesslich erhält man die totale auf die Lamelle i wirkende Massenkraft aus

$$\mathfrak{B}_i = \mathfrak{A}_i + \mathfrak{A}_i'$$

Die Weiterverfolgung der Aufgabe unterscheidet sich nun nicht mehr von den bisherigen Methoden. Diejenige von Möller[2]), bezw. der schwedischen Ingenieure Sven Hultin und Knut Petterson besteht darin, die auf jede Lamelle wirkenden Massenkräfte mit der um den Winkel der innern Reibung des Bodens gegen die Gleitfläche abgedrehten Reaktion in der Gleitfläche, zu einer Resultierenden zusammenzusetzen, die dann in der Trennfläche auf die folgende Lamelle übertragen wird. Der obere steilere Teil des Segmentes, in dem der Grenzwert der innern Reibung kleiner ist, als die Summe aller abwärts schiebenden Kräfte, übt dann auf den unteren flacheren Teil, in welchem die Reibungskräfte überwiegen, einen Schub aus. Das Verhältnis zwischen dem «passiven» Widerstand des untern Segmentteils zum «aktiven» Schub des obern Teils wird als Sicherheit gegen Abgleiten bezeichnet.

Krey[3]) führt als Sicherheit das Verhältnis zwischen dem Tangens des für den Grenzzustand des Abgleitens erforderlichen Winkels und dem Tangens des vorhandenen Winkels der innern Reibung ein. Die beiden Definitionen geben verschiedene Sicherheiten und sind nur für den Grenzzustand gleich. Bei Gleitflächen, die verschiedene Bodenarten durchschneiden, ist die Anwendung der Möller'schen Methode übersichtlicher.

Die Durchführung der Berechnung erfordert die mehrmalige Aenderung der zuerst angenommenen Gleitlinie, da es nicht möglich ist, die ungünstigste Gleitfläche a priori anzugeben. Die für die Rechnung benötigten Grundlagen, nämlich das spezifische Gewicht der Bodenkörner, das Porenvolumen, das Raumgewicht des nicht durchströmten Bodens und der Winkel der innern Reibung sind durch Laboratoriumsversuche zu bestimmen. Für den durchströmten Teil ist die Reibung bei «natürlichem Porenwasser» einzusetzen. Im Falle der Berechnung der wasserseitigen Böschung nach erfolgter rascher Absenkung des Stauspiegels wirkt der Kiesmantel insofern günstig und ist deshalb geradezu erforderlich, weil die Reibungskraft der Strömung in diesem Teil wegfällt, die Massenkräfte also senkrecht gerichtet sind, und weil die innere Reibung des Kiesmaterials bedeutend höher ist als diejenige des in vielen Fällen zwischen Kern und Mantel verwendeten tonhaltigen Materials.

[2]) *Max Möller*, Erddrucktabellen 1 und 2, 1922.

[3]) *H. Krey*, Erddruck, Erdwiderstand und Tragfähigkeit des Baugrundes. 1926.