

**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:** 22.02.2026

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



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

Da ferner die Theorie der Potentialströmung lehrt, dass

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

oder

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

so ergibt sich weiter

$$\Delta \Phi \frac{\Delta s_1}{\Delta s_2} = \Delta \psi \quad \dots \quad (11)$$

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 Rechtecknetz 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

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

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

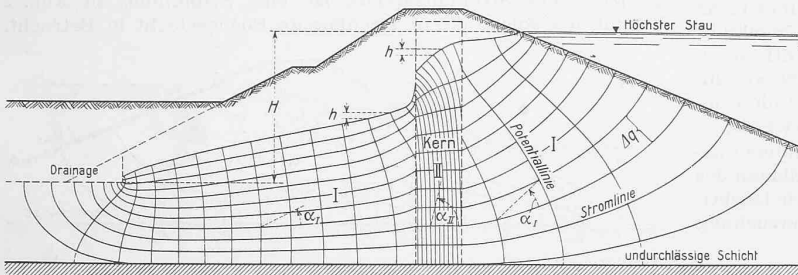


Abbildung 3.

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

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

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

woraus:

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 äusseren Wasserspiegels entleert. In der Hauptmasse des Damms entsteht dann eine nicht stationäre Sickerströmung; je weniger durchlässig aber diese Hauptmasse ist, umso geringer wird die bei rascher

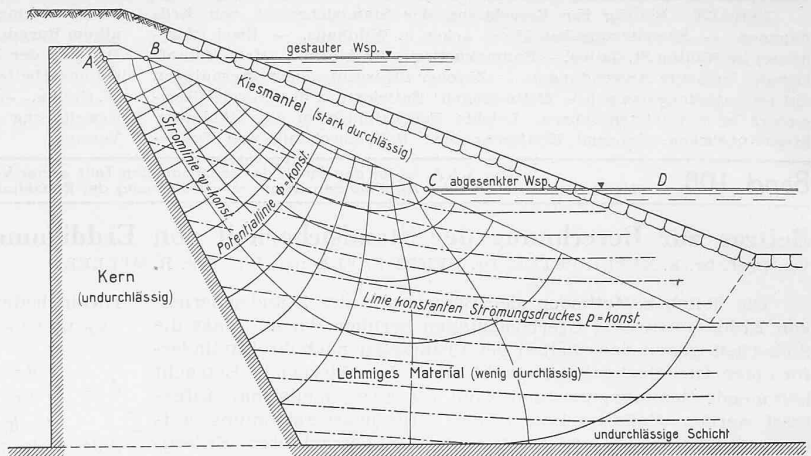


Abbildung 4.

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 Daminnern 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, einzuzichnen. Eine solche ist als Grenzbedingung gegeben: nämlich die Horizontale A—B des ursprünglichen Grundwasserspiegels im Daminnern und dann die Begrenzung B—C zwischen Dammaterial und Kiesbelag. Ferner bildet der abgesenkte Wasserspiegel C—D die Fortsetzung dieser Linie gleichen Druckes  $p = \text{konst.} = p_0$  (atm. Druck).

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

In Abb. 5 sind alle drei Kurvenscharen schematisch dargestellt. Für den Punkt M auf der Potentiallinie  $\Phi_1$  und der Ordinate  $z_1$  ist nämlich nach Gl. (5)

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

oder

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

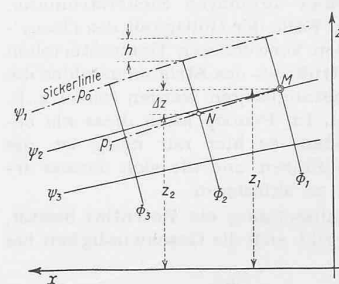


Abbildung 5.

Für einen gesuchten Punkt N auf der Potentiallinie  $\Phi_2$ , 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 benutzt werden.

## II. Die im Innern des Damms wirkenden Kräfte.

### 1. Kräfte, die auf das Wasser wirken.

Gleichung (4) lässt sich auch in folgender Form schreiben

$$\frac{\gamma v}{k} + \gamma \operatorname{grad} z + \operatorname{grad} p = 0 \quad \dots \quad (15)$$

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

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

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

$\mathcal{R} = -\frac{\gamma v}{k}$  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  $\mathcal{G}$  und  $\mathcal{P}$  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.

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

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

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

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 Massenkkräfte. Sie ist dagegen für die Beurteilung der Durchsickerungen erforderlich.

## 2. Kräfte, die auf die Bodenteilchen wirken.

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

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

$$|\mathcal{G}'| = (1-n) \gamma_s \text{ . . . . . (19)}$$

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:

$$\mathcal{R}' = + \frac{\gamma n}{k} v \text{ haben. . . . . (20)}$$

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

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

$$\mathcal{P}' = (1-n) \mathcal{P} \text{ . . . . . (21)}$$

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

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

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

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,

$\mathcal{M} = \mathcal{G}' + \mathcal{R}' + \mathcal{P}'$  . . . (23) ist die gesuchte Massenkraft, die in die statische Berechnung einzusetzen ist.

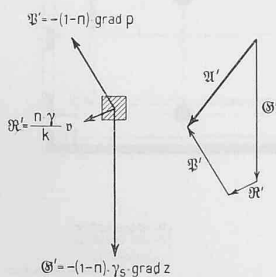


Abbildung 7.

## 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.

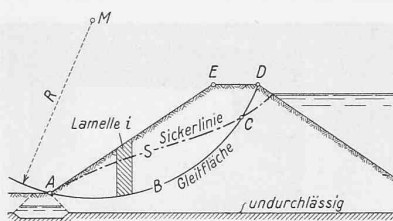


Abbildung 8.

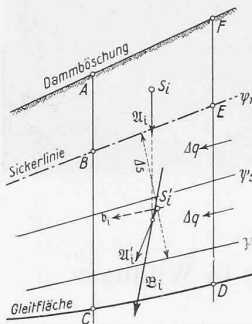


Abbildung 9.

Für jede dieser Lamellen sind die aus dem Eigengewicht und der Sickerströmung sich ergebenden Massenkkräfte 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 ABFE 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 ABFE, so wird die genannte Kraft:

$$|\mathcal{M}_i| = V_i \gamma_e^*$$

Der untere Segmentteil BCDE wird von einer Anzahl  $r$  Stromfäden durchzogen. Der Einfachheit halber wird man den Näherungsweg beschreiben, der darin besteht, dass man die Rich-

tung und Grösse von  $v$  aus diesen  $r$  Stromfäden mittelt; dieser Mittelwert sei  $v_i$ . Es sei  $V_i'$  das Volumen des Segmentes. Dann beträgt dessen Gewicht nach Gl. (19):

$$|\mathcal{G}_i'| = \gamma_s (1-n) V_i' \text{ . . . . . (19a)}$$

ferner die Reibungskraft nach Gl. (20)

$$\mathcal{R}_i' = + \frac{\gamma n}{k} v_i V_i' \text{ . . . . . (20a)}$$

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

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

Die Resultierende dieser Kräfte ist

$$\mathcal{M}_i' = \mathcal{G}_i' + \mathcal{R}_i' + \mathcal{P}_i'$$

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

$$\mathcal{M}_i = \mathcal{M}_i + \mathcal{M}_i'$$

Die Weiterverfolgung der Aufgabe unterscheidet sich nun nicht mehr von den bisherigen Methoden. Diejenige von Möller<sup>2)</sup>, bzw. der schwedischen Ingenieure Sven Hultin und Knut Pettersson besteht darin, die auf jede Lamelle wirkenden Massenkkräfte 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<sup>3)</sup> 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 Massenkkräfte 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.

<sup>2)</sup> Max Möller, Erddrucktabellen 1 und 2, 1922.

<sup>3)</sup> H. Krey, Erddruck, Erdwiderstand und Tragfähigkeit des Baugrundes. 1926.