Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 55/56 (1910)
Heft: 15

Artikel: Zur Theorie des Erddruckes auf Stützmauern
Autor: Ritter, Max
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-28687

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: 03.10.2025

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

INHALT: Zur Theorie des Erddruckes auf Stützmauern. — Kolonie Bergheim in Zürich-Hirslanden. — Hölzerne Notbrücke der M. O. B. — Die elektrischen Lokomotiven der Berner Alpenbahn. — Schweizerische Landesausstellung in Bern 1914. — Miscellanea: Ein Laboratorium für Aerodynamische Untersuchungen. Rheinschiffahrt Basel-Bodensee. Schweizerischer Wasserwirtschafts-Verband. Schweizerischer Elektrotechnischer Verein. Die jüngste Entwicklung der Elektrostahlanlagen. Beeinträchtigung der Niagara-Wasserkraft durch Windwirkung. Neubau für das Bundesgerichtsgebäude in Lausanne. Kollegium Maria Hilf in Schwyz. Neue Bronzefiguren am Bundeshaus-Ostbau. Schulhaus Oberdiesbach (Bern). — Konkurrenzen: Grundplan für die Bebauung von Gross-Berlin. Krematorium in Biel. — Literatur. — Vereinsnachrichten: Schweizer. Ing.- & Arch.-Verein. Zürcher Ing.- & Arch.-Verein. G. e. P.: Stellenvermittlung.
Tafel 47 bis 50. Kolonie Bergheim in Zürich-Hirslanden.

Band 55. *Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und genauer Quellenangabe gestattet.* **Nr. 15.**

Zur Theorie des Erddruckes auf Stützmauern.

Von Dr.-Jng. *Max Ritter*, Zürich.

Wenn eine mit kohäsionsloser Erde hinterfüllte Stützmauer unter der Wirkung des Erddruckes etwas nachgibt, so gerät ein Teil des Erdkörpers in Bewegung; er fällt in sich zusammen, indem die Erdteilchen aufeinander abwärts gleiten. Dieses Gleiten erfolgt längs gewissen Flächen, den *Gleitflächen,* in denen während und nach der Bewegung der Reibungswiderstand erschöpft ist. Nachdem sich das Gleichgewicht wieder eingestellt hat, schliesst der Druck in jedem Punkte einer Gleitfläche mit der betreffenden Normalen den Reibungswinkel ϱ der Erde ein, der mit dem natürlichen Böschungswinkel identisch ist und leicht experimentell bestimmt werden kann.

Die Abbildung 1 zeigt einen Querschnitt durch die Mauer und den Erdkörper. Die Linien $A\,C$, $A_1\,C_1$ usw. stellen die Schnittlinien einiger Gleitflächen mit der Bildebene dar; ihr Verlauf ist von vorneherein natürlich nicht bekannt und in der Abbildung nur provisorisch so angegeben, wie man es zum voraus etwa erwarten könnte. Es ist wahrscheinlich, dass bei ebener Wand $A\,B$ und ebener Erdoberfläche die Gleitflächen einander annähernd ähnlich sind, weil dann ein Prisma $A_1\,B\,C_1$ unter ziemlich ähnlichen Verhältnissen abgleitet wie ein anderes $A_2\,B\,C_2$. Daher wächst auch der spezifische Druck der Erde auf die Wand nahezu proportional mit dem Abstande von der obern Kante, und die Resultierende der Drücke auf die Längeneinheit der Stützmauer, das ist der *Erddruck E,* greift im untern Dritteil der Mauerhöhe an.

Wir setzen in der Folge voraus, dass sich die Spannungen in dem Erdkörper mit dem Orte stetig ändern. Dann ist der Winkel ϱ', den die Spannung q' irgend eines Flächenelementes mit dessen Normalen bildet, eine stetige Funktion des Neigungswinkels ψ des Flächenelementes. In den Gleitflächen erreicht der Winkel ϱ' seinen Höchstwert ϱ; daher gilt für alle Elemente einer Gleitfläche

$$\frac{d\varrho'}{d\psi} = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Diese Bedingung genügt bereits, um *die Spannung q in jedem Punkte einer Gleitfläche* zu berechnen. Zu diesem Behufe betrachten wir ein unendlich kleines, auf der Bildfläche senkrecht stehendes Prisma 1-2-3 von der Länge = 1, dessen eine Fläche 1-2 = 1 . ds in der Gleitfläche liegt, mit der horizontalen Ebene den Winkel ψ und mit der Fläche 2-3 den Winkel $d\psi$ einschliesst, vergl. Abb. 2. Auf die Fläche 1-2 wirkt der Druck $q\,ds$ unter dem Reibungswinkel ϱ, auf die Fläche 2-3 der Druck $q'\,ds$ mit Rücksicht auf Gleichung 1 ebenfalls unter dem Reibungswinkel ϱ. Die Gleichgewichtsbedingung gegen Drehen um die Achse o in der Fläche 1-3 lautet

$$q\,ds\,\cos\,(\varrho - d\psi)\,.\,\frac{ds}{2} = q'\,ds\,\cos\,(\varrho + d\psi)\,.\,\frac{ds}{2},$$

woraus

$$q' = q\,\frac{\cos(\varrho - d\psi)}{\cos(\varrho + d\psi)} = q\,\frac{\cos\varrho\cos d\psi + \sin\varrho\sin d\psi}{\cos\varrho\cos d\psi - \sin\varrho\sin d\psi},$$

oder, da $\cos d\psi = 1$ und $\sin d\psi = d\psi$ ist,

$$\text{folgt}\quad q' = q\,(1 + 2\,tg\,\varrho\,.\,d\psi) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Das Eigengewicht des Prismas fällt ausser Betracht, weil es ein unendlich kleines Moment höherer Ordnung liefert. Wir fügen jetzt an die Fläche 1-3 das kongruente Prisma 1-3-4 an, vergl. Abb. 3. Die Fläche 1-4 liegt in der Gleitfläche und empfängt den Druck $(q + dq)\,ds$ unter dem Reibungswinkel ϱ, die Fläche 3-4 den Druck $q''\,ds$ ebenfalls unter dem Reibungswinkel ϱ. Das Eigengewicht des Prismas 1-2-3-4 beträgt $\gamma\,.\,ds^2\,d\psi$, wo γ das spezifische Gewicht der Erde bezeichnet. Die Gleichgewichtsbedingung gegen Verschieben in Richtung der zur Spannung q'' senkrechten, unter dem Winkel $(\psi - \varrho)$ geneigten Axe $a - a$ lautet

$$(q + dq)\,ds\,d\psi - q\,(1 + 2\,tg\varrho\,d\psi)\,ds\,d\psi = \gamma\sin(\psi - \varrho)\,ds^2\,d\psi$$

und liefert die lineare Differentialgleichung

$$\frac{dq}{ds} - 2\,q\,tg\,\varrho\,\frac{d\psi}{ds} = \gamma\sin(\psi - \varrho), \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

die sich leicht integrieren lässt. Man findet

$$q = \gamma\,e^{2\psi\,tg\varrho}\int_0^s e^{-2\psi\,tg\varrho}\,\sin(\psi - \varrho)\,ds \quad . \quad . \quad (4)$$

Indem wir von der Erdoberfläche aus integrieren, wo $q = 0$ ist, entfällt die Integrationskonstante [1]).

Mit Hilfe der Gleichung (4) lässt sich der Gesamtdruck Q pro Längeneinheit an der Gleitfläche $A\,C$ bestimmen. Setzt man ihn mit dem Gewichte $G = \gamma$. 1 . Fläche $A\,B\,C$ des Erdprismas zusammen, so findet man den Erddruck E nach Grösse und Lage; er geht, wie schon oben erwähnt, durch den untern Dritteil der Wand und schliesst mit der Normalen zu dieser einen Winkel ω ein, der jedenfalls nicht grösser als der Reibungswinkel zwischen Erde und Mauer ist.

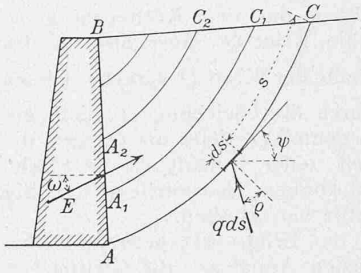

Abb. 1.

Diese Berechnung scheitert nun freilich an dem Umstand, dass die Gestalt der Gleitfläche $A\,C$ unbekannt ist; es sind offenbar unendlich viele Gleitflächen denkbar, die durch die Kante A gehen und der Bedingung genügen, dass die Mittelkraft aus Q und G durch den untern Dritteil der Mauer geht. Anders liegt jedoch die Sache, wenn wir über den Winkel ω schätzungsweise verfügen, sei es auf Grund von Versuchsergebnissen oder nach gesammelten Erfahrungen an ausgeführten Stützmauern. Dann gibt es nur *eine einzige Gleitfläche A C,* die mit den Gleichgewichtsbedingungen verträglich ist. Man erkennt die Richtigkeit dieser Behauptung, indem man beachtet, dass

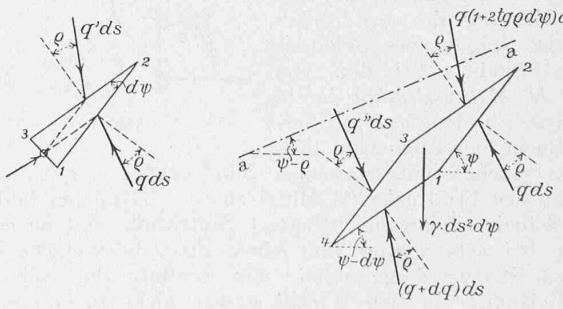

Abb. 2 und 3.

der Druck Q an einer Gleitfläche um so grösser ist, je steiler diese durchschnittlich verläuft, was sich an Hand

[1]) Die Beziehungen (3) und (4) sind zuerst von Prof. *F. Kötter* gefunden worden, jedoch auf einem wesentlich andern Wege, der eine lange Rechnung erfordert; vergl. *H. Müller-Breslau,* «Erddruck auf Stützmauern», 1906, Seite 107 ff. Eine weitere, sehr elegante Ableitung mit Zuhilfenahme des Rankine'schen Spannungskreises gab *O. Mohr* in der Zeitschrift für Architektur und Ingenieurwesen 1907.

der Gleichung (4) ohne weiteres einsehen lässt. Deshalb ist in Abbildung 4 der Druck Q an der Gleitfläche AC grösser als der Druck Q' an der Gleitfläche AC'. Wenn nun beide Gleitflächen mit den Gleichgewichtsbedingungen verträglich wären, so müssten sich Q, Q' und $G' = \gamma \cdot 1$. Fläche ACC' das Gleichgewicht halten; das ist aber, wie das Krafteck zeigt, unmöglich, solange $Q > Q'$ ist. Eine der beiden Gleitflächen steht also mit den Gleichgewichtsbedingungen in Widerspruch. Ebenso lässt sich zeigen, dass auch von zwei sich schneidenden Gleitflächen nur eine derselben mit den Gleichgewichtsbedingungen verträglich sein kann. Schneiden sich nämlich die Flächen AC und AC' derart, dass die eingeschlossenen Erdkeile

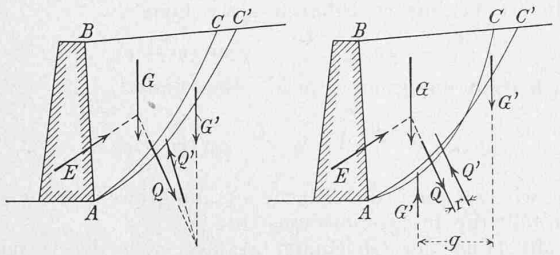

Abb. 4 und 5.

gleich gross sind, vergl. Abb. 5, so müssen die Drücke Q und Q' ein Kräftepaar bilden, das dem Kräftepaar $g \cdot G'$ das Gleichgewicht hält; die Kraft Q' muss also in der Entfernung $r = g \frac{G'}{Q}$ oberhalb der Kraft Q wirken. Dieser Bedingung wird jedoch durch die Gleichung (4) nicht genügt; nach ihr liegt im Gegenteil Q' tiefer als Q, weil die Fläche AC' im untern Teil steiler verläuft als die Fläche AC. Die beiden Flächen können also nicht gleichzeitig die Bedingungen von Gleitflächen erfüllen.

Die übliche Theorie des Erddruckes beruht nun bekanntlich auf der willkürlichen Annahme, die Gleitflächen seien Ebenen. Für den spezifischen Druck an einer ebenen Gleitfläche von der Neigung ψ liefert Gleichung (4)

$$q = \gamma s \sin (\psi - \varrho) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Der spezifische Druck wächst also linear mit der Tiefe, und die Resultierende Q aller Drücke auf die Längeneinheit greift im untern Dritteil der Gleitebene an, vergl. Abb. 6. Ist die Wand AB lotrecht, so kann Gleichgewicht nur bestehen, wenn der Erddruck E parallel der Erdoberfläche wirkt; nur dann schneiden sich G, Q und E in einem Punkte. Die experimentelle Prüfung hat indessen ergeben, dass ein derartiger Zusammenhang zwischen der Richtung des Erddruckes und der Neigung des Geländes nicht besteht. Bei den von Prof. *H. Müller-Breslau* durchgeführten, in dem bereits zitierten Buche beschriebenen Erddruckversuchen mit trockenem Sand wurde der Einfallswinkel des Erddrucks im Mittel zu $\omega = 0{,}84\,\varrho$ bei rauher (mit Schmirgelleinwand belegter) Stützwand und zu $\omega = 0{,}65\,\varrho$ bei sehr glatter (mit einer Spiegelglasscheibe belegten) Stützwand gefunden. Ein Einfluss der Neigung des Geländes auf den Winkel ω war nicht zu erkennen. Offenbar entsteht der Winkel ω zum Teil durch das sog. Setzen der Erde; darnach ist zu erwarten, dass bei den in der Praxis vorkommenden, höhern Stützwänden der Winkel ω dem Reibungswinkel ϱ nahe kommen wird. *Die Annahme ebener Gleitflächen steht also in den meisten Fällen der Praxis mit den Gleichgewichtsbedingungen in Widerspruch.* In der Literatur ist auf diesen Umstand schon mehrfach hingewiesen worden; er hat aber das Zutrauen der Praktiker zu der üblichen Berechnungsweise nicht wesentlich zu erschüttern vermocht, wohl deshalb nicht,

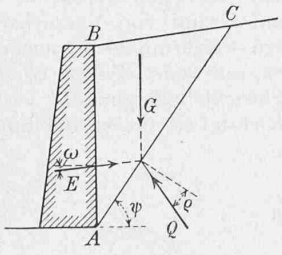

Abb. 6.

weil die Praktiker die Erddruckberechnung von jeher mehr als empirische Regel aufgefasst haben, deren Berechtigung ihnen durch die Erfahrung genügend erwiesen zu sein scheint.

Aus dem Gesagten geht hervor, dass man zur Bestimmung des Erddruckes über die Gestalt der Gleitfläche AC keine willkürlichen Annahmen machen darf, wenn man mit den Gesetzen der Statik in Einklang bleiben will. Die Gleitfläche hat vielmehr eine ganz bestimmte Form, die sich in jedem Falle eindeutig berechnen lässt. Dies letztere ist nun freilich mit sehr grossen Schwierigkeiten verknüpft; man gelangt dabei auf eine Aufgabe aus dem Gebiete der Integralgleichungen, deren Lösung dem Verfasser nicht gelungen ist. Sie kann auch entbehrt werden, denn *es gelingt gerade in einem der für die Praxis wichtigsten Fälle, nämlich bei wagrechtem Gelände, den unter dem beliebigen Einfallswinkel ω wirkenden Erddruck zu berechnen, ohne die Gestalt der Gleitfläche überhaupt bestimmen zu müssen.*

Dies wird durch eine von *Rankine* angestellte Untersuchung über den Spannungszustand in einem Punkte des Erdkörpers ermöglicht, auf die wir zunächst kurz eingehen müssen. Wir betrachten ein unendlich kleines Erdprisma von der Länge = 1, dessen Querschnitt ein rechtwinkliges Dreieck mit den Seiten ds, $ds \cos\varphi$, $ds \sin\varphi$ darstellt, vergl. Abb. 7. Das Prisma sei derart aus dem Erdkörper herausgeschnitten, dass die Axe in die Längsrichtung der Stützmauer fällt, und dass die Spannungen p_1 und p_2 Hauptspannungen sind. In der Fläche $ds \cdot 1$ wirkt die Spannung q' unter dem Einfallswinkel ϱ', den wir positiv annehmen, wenn er wie in Abbildung 7 geöffnet ist. Die Gleichgewichtsbedingungen gegen Verschieben in der Richtung ds und senkrecht dazu lauten

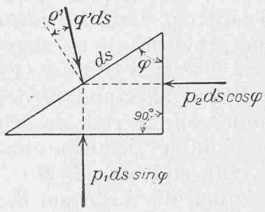

Abb. 7.

$$q' \sin \varrho' = (p_2 - p_1) \sin\varphi \cos\varphi$$
$$q' \cos \varrho' = p_1 \cos^2\varphi + p_2 \sin^2\varphi,$$

woraus

$$tg\,\varrho' = \frac{(p_2 - p_1)\, tg\,\varphi}{p_1 + p_2\, tg^2\varphi} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

folgt. Wir wollen berechnen, bei welchem Werte von φ der Winkel ϱ' seinen positiven Höchstwert erreicht. Da durch jeden Punkt des Erdkörpers ABC eine Gleitfläche geht, ist dieser Höchstwert natürlich gleich dem Reibungswinkel ϱ der Erde; den zugehörigen Winkel φ finden wir aus

$$\frac{d\,tg\,\varrho'}{d\,tg\,\varphi} = 0 = \frac{(p_2 - p_1)\,(p_1 + p_2\,tg^2\varphi - 2\,p_2\,tg^2\varphi)}{(p_1 + p_2\,tg^2\varphi)^2} \quad (7)$$

zu

$$tg^2\varphi = \frac{p_1}{p_2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

Setzen wir diesen Wert in Gleichung (6) ein, so erhalten wir

$$tg\,\varrho = \frac{1 - tg^2\varphi}{2\,tg^2\varphi} = \operatorname{cotg}\, 2\varphi.$$

Darnach ist

$$\varrho = 45^0 - \frac{\varrho}{2},$$

und Gleichung (8) geht über in

$$p_1 = p_2\, tg^2\left(45^0 - \frac{\varrho}{2}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

Wir ergänzen die vorstehende Rankine'sche Untersuchung durch die Beantwortung der wichtigen Frage, wie gross der Quotient $\frac{d\,\varrho'}{d\,\varphi}$ für $\varphi = 0$ ausfällt, also dann, wenn wir die Fläche $ds \cdot 1$ in die Hauptfläche $\perp p_1$ hineindrehen. Es ist gemäss Gleichung (7)

$$\frac{d\,tg\,\varrho'}{d\,tg\,\varphi} = \frac{(p_2 - p_1)\,(p_1 - p_2\,tg^2\varphi)}{(p_1 + p_2\,tg^2\varphi)^2},$$

also

$$\left[\frac{d\,tg\,\varrho'}{d\,tg\,\varphi}\right]_{\varphi=0} = \left[\frac{d\,\varrho'}{d\,\varphi}\right]_{\varphi=0} = \frac{p_2}{p_1} - 1 =$$

$$= \frac{1}{tg^2\left(45^0 - \frac{\varrho}{2}\right)} - 1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

Jetzt betrachten wir die in Abbildung 8 skizzierte Stützmauer. Das Gelände ist wagrecht, die Wandfläche unter dem Winkel β gegen die Vertikale geneigt. Der Erddruck E greift unter dem Einfallswinkel ω an, über den wir auf Grund der Versuchsergebnisse verfügen. Die Gleitflächen AC, $A_1 C_1$ usw. sind gekrümmte Flächen von unbekannter Gestalt. Wir untersuchen den Spannungszustand an der Fläche AH, die alle Gleitflächen unter dem Winkel $\varphi = 45^0 - \frac{\varrho}{2}$ schneidet.

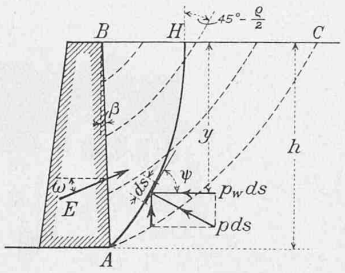

Abb. 8.

In dieser Fläche wirken gemäss den obenstehenden Darlegungen keine Schubspannungen, sondern nur Normalspannungen, d. h. Hauptspannungen p_1; daher gilt für alle Elemente der Fläche AH die Beziehung (10)

$$\frac{d\varrho'}{d\varphi} = \frac{1}{tg^2\left(45^0 - \frac{\varrho}{2}\right)} - 1.$$

Wir verfahren ähnlich wie zur Ableitung der Gleichung (4) für den Druck an einer Gleitfläche, betrachten also ein unendlich kleines Prisma 1-2-3 von der Länge = 1, dessen eine Fläche 1-2 = $ds \cdot 1$ in der Hauptfläche AH liegt, mit der horizontalen Ebene den Winkel ψ und mit der Fläche 2-3 den Winkel $d\psi$ einschliesst, Abb. 9. Auf die

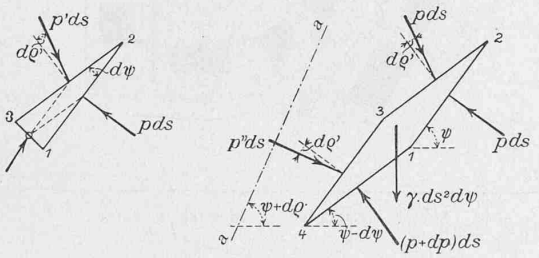

Abb. 9 und 10.

Fläche 1-2 wirkt die Hauptspannung $p_1 = p$, auf die Fläche 2-3 die Spannung p' unter dem Einfallswinkel $d\varrho'$. Die Gleichgewichtsbedingung gegen Drehen um die Axe o in der Fläche 1-3 lautet

$$p \frac{ds}{2} \cos d\psi = p' \frac{ds}{2} \cos (d\varrho' + d\psi),$$

woraus mit einer Genauigkeit bis auf unendlich kleine Grössen zweiter Ordnung

$$p = p'$$

folgt. An die Fläche 1-3 fügen wir das kongruente Prisma 1-3-4 an, vergl. Abb. 10, dessen Fläche 1-4 in die Hauptfläche AH fällt und die Hauptspannung $p + dp$ empfängt. Auf die Fläche 3-4 wirkt die Spannung p'' unter dem Einfallswinkel $d\varrho'$, der entgegengesetzt gleich dem Einfallswinkel der Spannung p' ist [1]). Das Eigengewicht des Prismas 1-2-3-4 beträgt $\gamma \cdot 1 \cdot ds^2 d\psi$. Die Gleichgewichtsbedingung gegen Verschieben in Richtung der zu p'' senkrechten, unter dem Winkel $\psi + d\varrho'$ geneigten (im Querschnitt der Stützmauer liegenden) Axe $a - a$ heisst

$$(p + dp)\, ds\, (d\psi + d\varrho') + p\, ds\, d\varrho' - p\, ds\, (d\psi + 2\, d\varrho') = \gamma\, ds^2\, d\psi \sin (\psi + d\varrho');$$

daraus folgt

$$\frac{dp}{ds} = \gamma \sin \psi \frac{1}{1 + \frac{d\varrho'}{d\psi}}.$$

Für $\frac{d\varrho'}{d\psi} = \frac{d\varrho'}{d\varphi}$ gilt aber Gleichung (10), somit ist

$$\frac{dp}{ds} = \gamma \sin \psi\, tg^2\left(45^0 - \frac{\varrho}{2}\right)$$

und

$$p = \gamma\, tg^2\left(45^0 - \frac{\varrho}{2}\right) \int_0^s \sin \psi\, ds = \gamma\, tg^2\left(45^0 - \frac{\varrho}{2}\right) \cdot y,$$

wo y den Abstand von der Erdoberfläche bezeichnet. Wir zerlegen die Spannungen p in die wagrechten Componenten $p_w = p \sin \psi$ und die lotrechten Componenten $p_e = p \cos \psi$. Dann ergibt sich, vergl. Abb. 8, die wagrechte Componente des Erddruckes E zu

$$E \cos (\omega + \beta) = \int_A^H p_w\, ds = \gamma\, tg^2\left(45^0 - \frac{\varrho}{2}\right) \int_0^h y\, dy = \frac{1}{2} \gamma\, tg^2\left(45^0 - \frac{\varrho}{2}\right) \cdot h^2;$$

h ist die Höhe der Stützmauer. Der Erddruck selbst beträgt

$$E = \frac{1}{2} \gamma \frac{tg^2\left(45^0 - \frac{\varrho}{2}\right)}{\cos (\omega + \beta)} h^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

Es sei nochmals an die *Voraussetzungen* erinnert, die zur Ableitung dieser Formel getroffen wurden. Sie lauten:

1. Die Erdmasse ist homogen und kohäsionslos.
2. Der Reibungswinkel ϱ der Erde ist unabhängig von der Grösse der Pressung (übliche und durch Versuche als berechtigt erwiesene Annahme).
3. Die innern Kräfte im Erdkörper ändern sich mit dem Orte stetig.
4. Durch jeden Punkt des Erdprismas ABC geht eine (gekrümmte) Gleitfläche.

Besondere Annahmen über die Gestalt der Gleitflächen wurden nicht getroffen; auch die eingangs erwähnte Vermutung, die Gleitflächen seien einander ähnlich, ist für die Grösse des Erddruckes ohne Belang. Ferner war nirgends von der Bestimmung eines „Erdprismas vom grössten Druck" die Rede; derartige Maximumaufgaben sind, wie mir scheint, nur dadurch in die Erddrucktheorie hineingekommen, dass man sich über die Gesetze des Gleichgewichtes hinweggesetzt hat.

Die Formel (11) liefert im allgemeinen für den Erddruck *merklich höhere Werte*, als die übliche Berechnungsweise nach *Coulomb*, die ebene Gleitflächen voraussetzt. Ist beispielsweise die Wandfläche lotrecht und $\omega = \varrho = 30^0$, so ergibt sich nach Formel (11)

$$E = \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{tg^2\left(45^0 - \frac{\varrho}{2}\right)}{\cos \varrho} = 0{,}192 \cdot \gamma h^2,$$

und nach der bekannten Formel der Coulomb'schen Erddrucktheorie

$$E = \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{\cos \varrho}{(1 + \sqrt{2} \sin \varrho)^2} = 0{,}149 \cdot \gamma h^2;$$

der Unterschied beträgt mehr als 22 %. Dieses Ergebnis steht in Einklang mit den bereits erwähnten Erddruckversuchen, die durchweg höhere Erddrücke ergaben, als die übliche Berechnungsweise erwarten lässt, wenn auch die theoretischen Werte von Gleichung (11) — vielleicht infolge geringer Kohäsionswirkungen — nicht ganz erreicht wurden. Die Gleichung (11) gilt allerdings nur im Falle wagrechter Oberfläche. Es ist aber klar, dass bei geneigtem Gelände der Unterschied der beiden Berechnungsweisen geringer ausfällt; er verschwindet ganz, wenn bei lotrechter Wand der Erddruck parallel der Erdoberfläche wirkt.

Schliesslich noch eine Bemerkung über die Anwendbarkeit der Gleichung (4), die vielleicht bei der weitern Ausgestaltung der Erddrucktheorie eine grössere Bedeutung erlangt, als ihr heute zukommt. Man könnte versucht sein, diese Gleichung direkt zur Bestimmung des Druckes an der Stützwand anzuwenden, in der Erwägung, dass der Stützwand, sofern der Erddruck unter dem Einfallswinkel $\omega = \varrho$ angreift, der Charakter einer Gleitfläche zukommt. Dies ist deshalb nicht statthaft, weil die Stetigkeitsbedingungen, auf denen die Gleichung (4) fusst, an der Stützwand im allgemeinen nicht erfüllt sind.

Zürich, im Februar 1910.

[1]) Man überzeugt sich leicht, dass $\frac{d^2 tg\,\varrho'}{d\, tg\, \varphi^2}$ für $\varphi = 0$ verschwindet.