

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 81/82 (1923)
Heft: 24

Artikel: Ueber den Sanddruck
Autor: Forchheimer, Ph.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-38925>

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: 10.07.2025

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

INHALT: Ueber den Sanddruck. — Das Kraftwerk Ritom der S. B. B. — Beitrag zur Didaktik des technischen Unterrichts. — Wettbewerb für die Kornhausbrücke in Zürich. — Nekrologie: John Eduard Brüstlein. O. Meister-Weidmann. — Miscellanea: Elektrifikation der französischen Bahnen. Schweizerische Schlepsschiffahrt-Genossenschaft. Neue Syphonanlagen des Catskill-Aquäduktes. Die Schweizerische

Naturforschende Gesellschaft. Internationaler Eisenbahnverband. Internationaler Chronometer-Wettbewerb. Ueberbrückung des Hundwilertobels. Ein Denkmal für Ingenieur Marc Séguin. Schweizerische Landwirtschaftliche Ausstellung Bern 1925. — Konkurrenzen: Neubau des Burgerspitals in Bern. Neubau für die Bezirksschule in Lenzburg. — Literatur. — S. T. S.

Band 81.

Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

Nr. 24.

Ueber den Sanddruck.

Von Prof. Dr. Ph. Forchheimer, Wien.

Die Gesetze des Erddruckes sind, obwohl er seit zwei Jahrhunderten Gegenstand der Forschung bildet, heute noch wenig geklärt. Die wesentliche Ursache ist, dass schon beim einfachsten Fall Theorie und Experiment miteinander in Widerspruch zu stehen scheinen. Dieser einfachste Fall ist der des Druckes, den trockener, kohäsionsloser, von einer wagrechten Oberfläche begrenzter Sand auf eine senkrechte Mauer ausübt. Denkt man sich einen unendlichen Sandkörper mit wagrechter Oberfläche durch eine lotrechte Ebene geteilt, so übt offenbar der eine Halbkörper auf den andern einen wagrechten Druck aus, wonach in der betrachteten unendlichen Masse der Druck auf lotrechte Flächen wagrecht gerichtet ist. Ebenso klar ist es, dass hier wagrechte Flächen, die in der Tiefe z unter der Oberfläche liegen, wenn die Raumeinheit des Haufwerkes das Gewicht σ besitzt, unter einem senkrechten Drucke von der Grösse σz pro Flächeneinheit stehen. Sinkt nun aus irgend einer Ursache der wagrechte Druck, über dessen Grösse bisher noch nichts gesagt wurde, so weit, dass er $= \sigma z \tan \varphi$ wird, so muss, falls φ den Reibungswinkel von Sand auf Sand bezeichnet, eine Gleitbewegung vor sich gehen. Aus dieser einfachen Ueberlegung folgte *Rankine*¹⁾ weiter, dass der Druck, den eine Sandmasse von wagrechter Oberfläche auf eine senkrechte Mauer von der Höhe h und der Breite b ausübt, wagrecht gerichtet sei und die Grösse habe:

$$H = \frac{1}{2} \sigma b h^2 \Phi = \frac{1}{2} \sigma b h^2 \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} = \frac{1}{2} \sigma b h^2 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (1)$$
 ferner, dass beim Nachgeben der Mauer sich eine Gleitebene von der Neigung $\frac{90^\circ + \varphi}{2}$ bilde²⁾.

Der Widerstreit der Meinungen, der sich über die Gültigkeit der Rankine'schen Lehre entwickelte, werde hier übergangen und nur gesagt, dass ich im Jahre 1882 gezeigt habe³⁾, dass, wenn eine senkrechte oder vorgeneigte (d. h. gegen die Luft geneigte) ebene Wand wagrecht vorbewegt

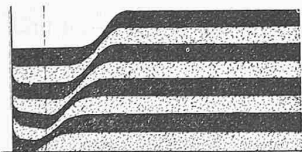


Abbildung 2.

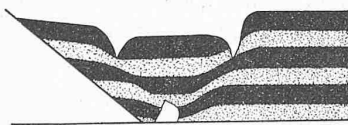


Abbildung 3.

wird, die entstehende Gleitebene (vgl. Abbildung 2) tatsächlich nahezu die berechnete Neigung aufweist. Es bilden sich sogar, wenn die Wand weniger als $\frac{90^\circ + \varphi}{2}$ vorgeneigt ist, zwei Gleitebenen, beide nahezu von der Neigung $\frac{90^\circ + \varphi}{2}$ eine nach vorn, die andere nach hinten ansteigend, zwischen

¹⁾ Phil. Transactions of the London Royal Society 1856/57. A manual of applied mechanics, London 1861.

²⁾ Unter Neigung werde im vorliegenden Aufsatz immer der Winkel verstanden, den die betreffende Ebene mit der wagrechten Ebene einschliesst.

³⁾ Z. d. österr. Ing.- u. Arch. V. 34 (1882) S. 111; 35 (1883) S. 103.

denen ein Keil niedersinkt, ähnlich wie dies Abbildungen 3 und 4, allerdings für nassen Sand¹⁾, zu erkennen geben. Die Versuche bestanden darin, dass ich abwechselnd ungefärbte und gefärbte Sandlagen an ein Holzklötzchen schichtete, dann das Klötzchen, also die Stützwand bewegte, geschmolzenes Paraffin in die durch die Bewegung umgestaltete Masse eingoss, das Paraffin erstarren liess und den fest gewordenen Körper entzweigte. Dabei zeigte es sich u. a., worauf bisher noch nicht aufmerksam gemacht wurde, dass in der Nähe der Seitenwände steilere Gleitflächen als im Innern entstehen, was bei der Verwertung des Verfahrens von *V. J. Kurdjumoff*²⁾, nämlich bei Ersatz einer Seitenwand durch eine Glaswand und photographischer Abbildung der Bewegung, zu berücksichtigen ist. Meine Versuche bestätigten also die Meinung Rankine's, die aber doch keine allgemeine Anerkennung fand, weil der Seitendruck damals noch nie so gross gefunden worden war, wie Gleichung (1) ihn angibt. Auch als *Ad. Donath*³⁾ ein Verfahren anwandte, das ihm gestattete, verschieden grosse Bewegungen des Stützbrettes eintreten zu lassen, aus denen er auf das Drehmoment für die Bewegung ϕ schliessen wollte, gelang es ihm nicht, das H der Gleichung (1) zu finden, das er erwartet hatte. Seine Stützwand war an ihrem Fusspunkte durch ein Scharnier befestigt und sein H berechnete er unter der Voraussetzung, dass diese wagrechte Kraft in der Höhe $\frac{1}{3} h$ über dem Fusspunkte angreife. Er fand z. B., je nachdem er ausser den Seitenwänden, die den Sand seitlich begrenzten, zur Feststellung der Reibung an den Seitenwänden noch eine Mittelwand im Sand stehen hatte oder nicht, folgende Zahlen

	Mit Mittelwand				
Drehungswinkel der Wand	0' 14"	0' 28"	0' 42"	1' 03"	1' 17"
Moment des Sanddruckes cm kg	714,64	680,95	657,34	632,29	609,89
	Ohne Mittelwand				
Drehungswinkel der Wand	0' 17"	0' 29"	0' 42"	0' 57"	1' 06"
Moment des Sanddruckes cm kg	885,68	850,56	811,12	786,07	737,75

Das Endergebnis, zu dem Donath gelangte war, dass der Druck zwar wagrecht wirke, aber nur etwa 0,7 des theoretischen Wertes erreichte, oder dass

$$\Phi = 0,7 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2)$$

sei; den Reibungswinkel φ fand er zu $33^\circ 42''$.

Ähnliche und grössere Abweichungen zwischen Φ und $\tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$ fanden die anderen Experimentatoren, die alle mit gröberen Vorrichtungen arbeiteten. Als es aber *H. Müller-Breslau*⁴⁾ gelang, Messungen durchzuführen, bei

denen das Oberende einer 750 mm hohen, 1015 mm langen senkrechten Wand sich z. B. nur 0,0083 mm und das Unterende nur 0,0037 mm von der ursprünglichen Lage entfernte und die Drehung nur 0' 1,3" betrug oder die

Bewegung auf ähnliche kleine Masse beschränkt blieb, ergab sich bei Messungen⁵⁾ $H = 135$ bis 147,8 kg statt der

¹⁾ Zeitschr. des Ver. deutsch. Ingenieure 37 (1893) S. 806. Bei den Versuchen mit nassem Sand bestand die Benetzung aus geschmolzenem Paraffin; die Verschiebung fand nämlich nach dem Paraffineinguss statt.

²⁾ Civilingenieur 38 (1892) S. 292.

³⁾ Zeitschrift für Bauwesen, 41 (1891) S. 491.

⁴⁾ *H. Müller-Breslau*, Erddruck auf Stützmauern, Stuttgart 1906, S. 141, 145, 146, 147, 150.

⁵⁾ Den Angaben Müller-Breslau's ist hier nach *K. Skibinski*, österr. Wochenschrift für den öffentl. Baudienst, 23 (1917) S. 208, als Widerstand an den Seitenwänden 10 bis 10,8 kg hinzugefügt.

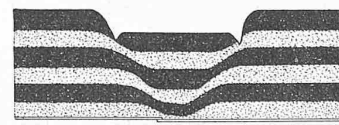


Abbildung 4.

theoretischen 140 kg, oder $\Phi = 0,295$ bis $0,323$, gegenüber $\text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = 0,307$, welche Zahlen sich für ein Eigengewicht $\sigma = 1600 \text{ kg/m}^3$ und einen Reibungswinkel $\varphi = 32^\circ$ errechnen. Einige Messungen blieben also unwesentlich hinter dem H der Gleichung (1) zurück und einige übertrafen es, was vermutlich auf Ungenauigkeiten zurückzuführen ist; immerhin sei bemerkt, dass die Theorie nur sagt, dass eine Rutschung erfolgt, wenn $H < \frac{1}{2} \sigma b h^2 \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$ wird, und dass sie annimmt, dass vorher $H = > \frac{1}{2} \sigma b h^2 \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$ gewesen sei, beides Angaben, die durch die in Rede stehenden Messungen bestätigt erscheinen. Erwähnt sei ferner, dass Müller-Breslau's Wand nicht um ein Fussgelenk drehbar, sondern sowohl in senkrechter wie in wagrechter Richtung beweglich war und z. B. bei der obgenannten Verschiebung $0,003 \text{ mm}$ abwärts sank, welcher Vorgang für die Grösse von H wahrscheinlich von sehr geringer Bedeutung gewesen ist.

Hier war nur die Rede von den Messungen des auf eine Wand ausgeübten Druckes; es ist aber vor wenig Jahren einem Forscher durch einen geistreichen Versuch gelungen, unmittelbar im Sandinnern das Verhältnis des wagrechten zum lotrechten Drucke festzustellen. *K. von Terzaghi*¹⁾ im Robert College in Konstantinopel hat nämlich die Kraft gemessen, die er aufwenden musste, um ein Stahlband das eine Mal in aufrechter, das andere Mal in flacher Lage durch den Sand zu ziehen, und er hat dabei das Verhältnis statt zu $0,281$, wie es nach Rankine im Grenzfalle für den betreffenden Sand hätte sein sollen, wirklich viel grösser, nämlich zu $0,42$ gefunden.

Wenn die Schüttung nicht von einer Oberfläche begrenzt war, sondern von der senkrechten oder vorgeneigten Wand unter einer Neigung $\varepsilon = 20^\circ$ anstieg, gaben meine Versuche²⁾ Gleitebenen von der Neigung $\gamma = 54^\circ$ bis 58° an, während nach Rankine hier $\gamma = 52^\circ 47'$ hätte sein sollen. Die Uebereinstimmung war also mangelhaft. Es ist fraglich, inwieweit sich bei solcher Anordnung die Druckäusserung der von Rankine vorausgesetzten anschliesst. Es liegt nämlich für eine von der Wandoberkante aus mässig ansteigende Böschung zwar eine Messung von Müller-Breslau vor, aber eben nur eine einzige. Für sie war $\varepsilon = 16^\circ$ und wie früher $\sigma = 1600 \text{ kg/m}^3$, $\varphi = 32^\circ$, $h = 750 \text{ mm}$, $b = 1015 \text{ mm}$, $\frac{1}{2} \sigma b h^2 = 456,8 \text{ kg}$. Im unendlichen Sandkörper sollte in diesem Falle der Druck auf die senkrechte Wand parallel zur Oberfläche gerichtet gewesen sein und die Grösse

$$P = \frac{\sigma}{2} b h^2 \frac{\cos \varepsilon - \sqrt{\cos^2 \varepsilon - \cos^2 \varphi}}{\cos \varepsilon + \sqrt{\cos^2 \varepsilon - \cos^2 \varphi}} = 456,8 \cdot 0,360 = 164,5 \text{ kg}$$

gehabt haben, deren wagrechte Teilkraft $P \cos \varepsilon = 164,5 \cdot 0,961 = 158 \text{ kg}$ betragen haben würde. *Müller-Breslau*³⁾ bestimmte den schrägen Druck zu 195 kg und nahm an, dass dieser einen Winkel von 27° mit der Normalen zur Wandfläche eingeschlossen habe, also unter 27° geneigt gewesen sei. Als wagrechte Teilkraft hätte er also $195 \cdot \cos 27^\circ = 174 \text{ kg}$ gehabt, welche Zahl, weil grösser als obige 158 kg , der Theorie zwar nicht geradezu widerspricht, sie aber auch nicht bestätigt.

Wenn die Böschung von der Wandoberkante aus steiler als unter $\varepsilon = 20^\circ$ anstieg, ergaben meine Versuche entschieden grössere Neigungen γ der Gleitfläche, als sie bei unbegrenzter Ausdehnung des Sandes zu erwarten sind. Dabei mochte der Umstand mitgewirkt haben, dass meine Versuchskörper vergleichsweise kurz waren, also nicht hoch genug anstiegen. Immerhin schien es, als ob der Sand bei $\varepsilon = \varphi$ nicht, wie die Theorie es verlangt, unter $\gamma = \varphi$, sondern längs einer steileren Fläche abrutscht, und dass die Ursache dieses Verhaltens in seiner Lockerungsfähigkeit zu suchen ist. Zunächst bildet sich anscheinend unter gleich-

zeitiger Lockerung des Rutschkeiles eine steile Trennungsfläche, die sich bei nassem Sande, sogar durch eine Fuge (vgl. Abbildung 5) zu erkennen gibt, und später rollen blos die an der Oberfläche befindlichen Körner, die ihre Unterstützung verloren haben, so lange nach, bis wieder eine natürliche Böschung entstanden ist.

Kehren wir nun wieder zum Sand mit wagrechter Oberfläche und zur lotrechten Stützwand zurück. Es ist sicher, dass bei wagrechter oder aufwärts gerichteter Verschiebung der Wand eine Gleitfläche nahezu von der Neigung $\gamma = \frac{90^\circ + \varphi}{2}$ entsteht, und es ist ebenfalls sicher, dass bei einer Verschiebung, die so klein ist, dass sie für den Bestand einer Stützmauer ungefährlich wäre, die auf die Mauer wirkende wagrechte Druckkraft H beträchtlich kleiner ist, als sie Rankine errechnete. Mit diesem scheinbaren Widerspruch ist ein zweiter verbunden. Zweifellos tritt bei der Verschiebung einer senkrechten Mauer eine senkrecht gerichtete Reibungskraft auf, und doch steht, wie der genannte Forscher bewiesen hat, die Mauer unter wagrecht gerichtetem Druck. Es ist auch gewiss, dass wenn man sie genau senkrecht heben oder senken wollte, der Sand dem Vorhaben Widerstand entgegenzusetzen würde. Er täte dies selbst bei vorgeneigter Wandfläche, wird doch z. B. ein mit einem vortretenden Rand versehener, nicht zu stumpfer Kegel, den man durch einen durchlochenden Boden steckt und umschüttet (s. Abbildung 6), vom Sand festgehalten, wenn der Fussrand dessen Ausfluss verhindert. Eine Erklärung der genannten Widersprüche soll versucht werden.

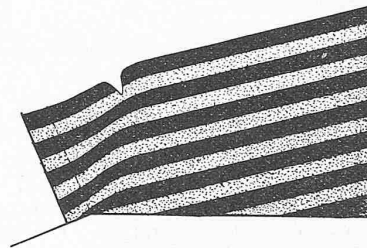


Abbildung 5.

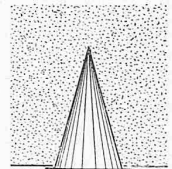


Abbildung 6.

Rankine nimmt mit Recht an, dass auf den zwischen seiner Gleitfläche und der lotrechten Wand befindlichen Keil drei Kräfte wirken: das Gewicht G des Keiles, der wagrechte Gegendruck H der Mauer und die mit der Normalen zur Gleitfläche einen Winkel φ einschliessende, also unter $\frac{90^\circ + \varphi}{2}$ geneigte Reaktion R des unbewegt bleibenden Sandes. Rutscht der Keil ohne Formänderung längs der Gleitfläche eine kleine Strecke Δ hinab, so ist nach dem Prinzip der virtuellen Verschiebungen die Summe der Produkte aus den Projektionen von Δ auf die Kräfte und den Kräften selbst oder

$$\Delta \sin \gamma \cdot G - \Delta \cos \gamma \cdot H - \Delta \sin \varphi \cdot R = 0 \quad (4)$$

und das führt, weil $G = \sigma \frac{b h^2}{2} \cot \gamma = \sigma \frac{b h^2}{2} \cot \frac{90^\circ + \varphi}{2}$ ist und ihrem absoluten Werte nach die senkrechte Teilkraft von $R = G$, die wagrechte $= H$ sein muss¹⁾, auf die eingangs mitgeteilte Gleichung (1). Zu der hierbei obwaltenden Kräfteverteilung ist zu bemerken, dass nach Rankine alle längs den Elementen der Rutschebene auftretenden Einzelkräfte dieselbe Neigung $\frac{90^\circ + \varphi}{2}$ haben, und dass sowohl diese Gegenkräfte dR , wie auch die Einzeldrucke dH auf die Wand proportional mit der Tiefenlage wachsen. Das Gewicht G , die Kraft R und der Druck H schneiden sich dabei in einem Punkte, der in der Höhe $\frac{1}{3} h$ auf der Rutschfläche liegt. Eine andere mögliche Kräfteverteilung würde in der gleichförmigen Verteilung von R und H bestehen, darin, dass alle dR und alle dH gleich gross sind und dass längs der Wand eine Reibungskraft V auftritt, die gleich der halben

¹⁾ Die Geschwindigkeiten sind so gering, dass die Beschleunigungen nicht in Betracht kommen.

¹⁾ Engineering News Record 85 (1920) S. 633.

²⁾ Zeitschrift d. österr. Ingenieur- u. Architekt. Verein 35 (1883) S. 104.

³⁾ Erddruck auf Stützmauern S. 151. Nach dem Beispiele *Skibinski's* ist hier kein Zuschlag für Seitenwandreibung gemacht worden.

senkrechten Teilkraft von R , also $= \frac{1}{2} R \sin \frac{90^\circ + \varphi}{2}$ ist.

Die Angriffspunkte der Reaktion R und des Sanddruckes liegen dann in halber Mauerhöhe. Als wahre Druckverteilung kann man wenigstens näherungsweise jene Kombination der beiden betrachteten Verteilungen ansehen, bei der die Arbeit des sinkenden Gewichtes G die Arbeitserfordernisse der Kräfte R , H und V deckt und überdies die für die Formänderung des Rutschkeiles nötige Arbeit leistet. Der Keil ändert nämlich seine Gestalt, indem die wagrechten Lagen, wenn man den Sandkörper aus solchen zusammensetzt (wie z. B. Abbildung 2 zeigt) länger und dünner werden. Daher legen die Kräfte nicht mehr gleiche Wege Δ zurück, sodass Rankine's Gleichung nicht mehr zutrifft und eine schwächere Druckkraft H ausgeübt wird, die dafür bei gleicher Keilsenkung einen längeren Weg macht. Behufs Ableitung des neuen Ausdruckes für die Arbeit werde vorerst in Gleichung (4) die Reaktion R durch ihre wagrechte Teilkraft $R \cos \gamma$ und ihre senkrechte Teilkraft $R \sin \gamma$ ersetzt, deren Wege $\xi_1 = \Delta \cos \gamma$ und $\zeta_1 = \Delta \sin \gamma$ sind. Man erhält bei Berücksichtigung des jedesmaligen Richtungssinnes von Kraft und Weg

$$\zeta_1 G - \xi_1 H + \xi_1 R \cos \gamma - \zeta_1 R \sin \gamma = 0 \quad (5)$$

Bei merklicher Verschiebung der Wand machen aber G und H von ζ_1 und ξ_1 abweichende Wege ζ und ξ durch und kommt an der Wand eine senkrechte Reibung V hinzu, derart, dass für die Formänderungsarbeit der Ausdruck

$$\zeta G - \xi H + \xi_1 R \cos \gamma - \zeta_1 R \sin \gamma - \zeta_1 V \quad (6)$$

gilt. Hier erfordert das Gleichgewicht in wagrechter und senkrechter Richtung, dass

$$H = R \cos \gamma \quad \text{und} \quad G = R \sin \gamma + V$$

sei, wonach aus (6) für die Formänderungsarbeit der Ausdruck

$$\zeta G - \xi H + \xi_1 H - \zeta_1 G = (\xi_1 - \xi) H + (\zeta - \zeta_1) G \quad (7)$$

hervorgeht. Einen gewissen Einblick in das gegenseitige Verhältnis von ξ , ξ_1 , ζ und ζ_1 gewährte ein seinerzeit veröffentlichter Sägeschnitt durch einen 44 mm hohen Versuchskörper, dessen Sand einen Neigungswinkel φ der natürlichen Böschung von 33° hatte. Bei der wagrechten Wandverschiebung von 10 mm bildete sich eine Gleitebene von durchschnittlich $\gamma = 60^\circ$ (statt der theoretischen $61^\circ 30'$) Neigung und erlitt der Schwerpunkt des Rutschkeiles eine Senkung ζ von 10,6 mm. Daraus, dass die Lagen wagrecht blieben, folgt, dass wie in (6) angenommen für die Reaktion R und die Wandreibung V wirklich die gleichen senkrechten Verschiebungen ζ_1 gelten. Die Arbeit an jedem Punkte der Rutschebene dürfte dem Produkte aus der Tiefe und der Verschiebung proportional gewesen sein. Der Sägeschnitt zeigt folgende Zahlen:

Urpr. Schichtentiefe in mm	0	5,5	11	16,5	22	27,5	33	38,5	44
Schichtverschiebung „	12	11,5	11	10,5	10	9	7	4,5	0
Produkt	0	63	121	173	220	248	231	173	0

Aus der Produktsumme 1229 geht ein mittleres Produkt

$$\frac{1229}{8} = 154 \quad \text{und hieraus, da die mittlere Tiefe 22 mm be-}$$

trägt, $\zeta_1 = 154 : 22 = 7,0$ mm und $\xi_1 = \zeta_1 \cot \gamma = 4,0$ mm hervor. Dass eine Reibungsarbeit auf dem Boden bei dem Vorrutschen des Sandes zu verrichten war, bedarf keiner Berücksichtigung, weil im vorliegenden Falle die Arbeit von V ungefähr um ebenso viel kleiner war. Die Formänderungsarbeit lässt sich folgendermassen schätzen: Eine Schicht von der Dicke dz in der Höhe z über den Boden gleitet über die darunter befindliche am äusseren Ende gar nicht, am innern um das Stück $\frac{\xi}{z} dz$, und da auf ihrer Fläche $bz \cot \gamma$ eine Last $\sigma bz (h - z) \cot \gamma$ ruht, erfordert das Gleiten eine Arbeit $\frac{1}{2} \sigma b (h - z) \xi \cot \gamma \tan \varphi dz$. Für den ganzen Keil macht dies, wie die Integration von $z=0$ bis $z=h$ zeigt, $\frac{1}{4} \sigma b h^2 \xi \cot \gamma \tan \varphi = \frac{1}{2} G \xi \tan \varphi$ aus. Bei dieser Ableitung ist aber nicht berücksichtigt worden, dass die Reibung V die Last vermindert, schätzungsweise um $0,4 G$, sodass sich als Endergebnis die Formänderungsarbeit

$$0,3 G \xi \tan \varphi = 0,3 \cdot 10 \cdot 0,65 G = 2,0 G \quad (8)$$

findet. Die Schlussgleichung lautet daher gemäss (7) und (8)

$$\left. \begin{aligned} (10,0 - 4,0) H &= (10,6 - 7,0 - 2,0) G \\ \text{oder } H &= 0,27 G = 0,078 \sigma b h^2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

während nach Rankine $H = \frac{1}{2} \sigma b h^2 \cot^2 \gamma = 0,167 \sigma b h^2$ wäre.

Bisher wurde eine *wagrechte* Verschiebung der Stützwand vorausgesetzt und aufmerksam gemacht, dass sie eine Formänderung des Rutschkeiles bewirkt. Der Gedanke liegt nahe, die Formänderung dadurch zu vermeiden, dass man die Wand in der Richtung der Gleitfläche, also unter der Neigung $\frac{90^\circ + \varphi}{2}$ verrückt. Die Gleitfläche steigt dann aber nicht in der gewollten Neigung an, sondern steiler. Ein Verschieben in der Richtung der entstehenden Gleitebene ist also gar nicht möglich, es sei denn, dass man die rückgeneigte Wand oder einen Teil des Bodens — der eine Wand von der Neigung Null vorstellt — senkrecht senkt (oder hebt), in welchem Falle sich eine ebenfalls senkrechte Gleitfläche bildet. Diese Erscheinung findet ihre Ergänzung darin, dass bei Senkung eines Bodenteiles ein senkrechter Zylinder niedergeht, der den beweglichen Bodenteil zur Grundfläche hat. Dabei nimmt der Druck auf die Grundfläche ab und steigt überhaupt trotz beliebiger Sandhöhe nicht über eine gewisse Grösse. Zugleich findet beim Nachgeben des Bodenteiles eine solche Lockerung statt, dass die Oberfläche erst bei starker Senkung den Vorgang in der Tiefe durch eine seichte Grube verrät.

Wenn Sand gestampft wird, muss zunächst wohl sein Seitendruck wachsen; das bedeutet aber nicht, dass, wenn die Stützwand nachgibt, gestampfter Sand noch immer mehr Druck als ungestampfter äussert. In der Tat ist, sobald die Gleitfläche sich ausgebildet hat, das Gegenteil der Fall, einerseits weil durch das stärkere Ineinandergreifen der Körner der Reibungswinkel φ und hiermit die Gleitflächenneigung $\gamma = \frac{1}{2} (90^\circ + \varphi)$ grösser oder der Rutschkeil kleiner geworden ist, andererseits weil bei gleicher Wandbewegung der Schwerpunkt des Rutschkeiles sich vergleichsweise weniger tief senkt. Der gestampfte Sand kann sich ja mehr ausdehnen als der ungestampfte. Der ungestampfte Keil äussert also das grössere Arbeitsvermögen beim Verschieben der Wand. Dem Gesagten entsprechend zeigte bei meinen Versuchen¹⁾ Sand, der ungestampft bei wagrechter Wandverschiebung eine unter $\gamma = 58^\circ$ bis 62° ansteigende Gleitfläche gab, wenn er gestampft wurde, $\gamma = 70^\circ$ bis 75° und fand G. H. Darwin²⁾ für ungestampften Sand $\Phi = 0,180$ und für gestampften $\Phi = 0,132$. Da die Verzahnung und die spätere Lockerung auch von der Art der Vornahme der Schüttung abhängen, beeinflusst auch diese den Sanddruck; so ermittelte Darwin für den nämlichen ungestampften Sand, wenn er ihn statt in wagrechte Lagen in solche schüttete, die unter den Reibungswinkel φ nach innen bzw. nach aussen fielen, $\Phi = 0,165$ bzw. $0,189$.

Bisher war nur von Sand als einem Haufwerk reibender Körner die Rede. Von Belang ist aber auch sein elastisches Verhalten. O. Strohschneider³⁾ hat dieses erkannt, dann K. von Terzaghi⁴⁾ dessen Bedeutung für den Erddruck nachgewiesen. Nach ihm nimmt, wenn eine Wand nachgibt, der Erddruck zuerst rasch proportional mit dem Stützwandweg ab, wobei die Hinterfüllung fast ausschliesslich elastische Formänderungen erleide, dann werde eine zweite Phase mit langsamer Druckabnahme durch die Gleitflächenbildung eingeleitet.

Mit diesem Hinweis sei die vorliegende Besprechung der Erddrucktheorie beendet. Sie soll vor allem dartun,

¹⁾ Zeitschr. d. österr. Ingen.- u. Arch.-Ver. 34 (1882) S. 123.

²⁾ Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers 71 (1882) S. 350; s. auch K. Skibinski, österr. Wochenschr. f. d. öffentl. Bauwesen 23 (1917) S. 206 nach Annales des ponts et chaussées, série 6 vol. 6 (1883, 2. Sem.) S. 478.

³⁾ Wien, Sitzungsberichte d. k. Akademie der Wissensch. Mathem.-naturwiss. Klasse, Abt. 2a, 121 (1912) S. 299 f.

⁴⁾ Engineering News Record 1920, 1921. Zeitschr. d. österr. Ing.- u. Arch.-Ver. 73 (1921) S. 240. Wasserkraft 17 (1922) S. 447.

dass es die auf der Voraussetzung eines bestimmten Erd-druckes beruhende, nicht sachgemässe Fragestellung war, die bisher den Fortschritt gehemmt hat. Ein solcher steht zu erwarten, wenn die Forschung sich mit der erweiterten Aufgabe der Aufhellung des Zusammenhanges zwischen Druck und Wandbewegung befasst. Bereits sind die ersten Schritte in dieser Richtung geschehen.

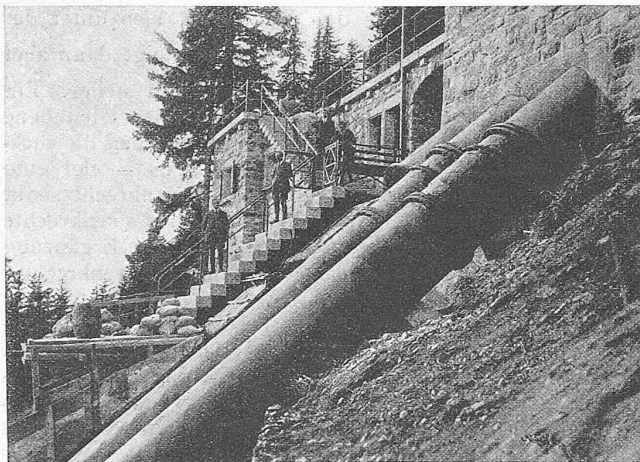


Abb. 30. Obere Seilbahnstation neben der Apparatenkammer.

eine Handbremse zum Festhalten des Wagens beim Auf- und Abladen angebracht. Da von einem gewissen Punkte (Fixpunkt 3) an das Seiltrum, das von den Umlenkrollen der obern Station zur Winde führt, das Uebergewicht über den leeren Wagen erhalten würde, ist dort ein Belastungs-wagen aufgestellt, der sich im Ruhezustand gegen zwei feste Puffer stützt und vom Seilbahnwagen mitgenommen

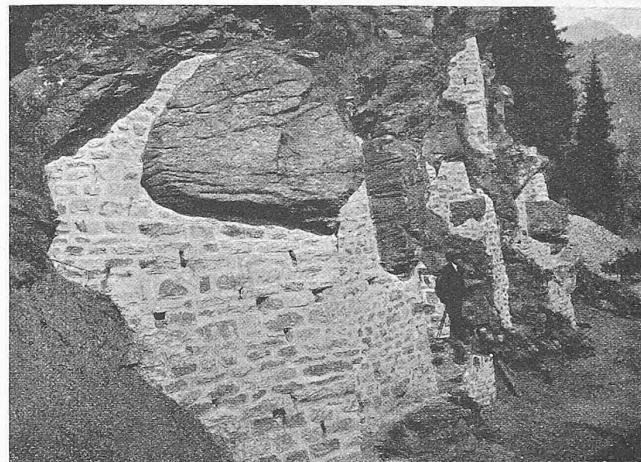


Abb. 33. Sicherungsarbeiten an der Strasse Wasserschlöss-Ritomee.

Das Kraftwerk Ritom der S. B. B.

I. Wasserbaulicher Teil.

Von Ing. H. Eggenberger, Bern,

Stellvertreter des Obergerieurs für Elektrifikation der S. B. B.

(Fortsetzung von Seite 289.)

Die Seilbahn. Zum Transport der Rohre und der Baumaterialien für den Unterbau der Druckleitung, sowie der oberhalb gelegenen Bauobjekte ist westlich der Rohrbahn eine Standseilbahn von 1 m Spurweite auf durchwegs gemauertem Unterbau in bekannter Ausführung der „Giesserei Bern“ der v. Röllschen Eisenwerke mit im Unterbau verankertem Oberbau (Abb. 29) erstellt worden. Das Gewicht der Schienen mit keilförmigem Kopf beträgt 26,8 kg/m. Die Bahn ist auf der ganzen Länge einspurig, ohne Ausweiche, hat also nur einen Wagen. Die Antriebstation ist unten beim Maschinenhaus in einem besondern Gebäude angeordnet. Die Führung des Seiles von der durch einen Drehstrommotor von 72 PS Dauerleistung angetriebenen Winde weg bis zu den Umlenkrollen in der obern Station (siehe Abbildung 30) geschieht neben dem Geleise, auf der der Rohrleitung abgewendeten Seite. Dabei wird das Seil über Rollen von grossem Durchmesser geleitet, die unter Anpassung an den natürlichen Durchhang zum Teil auf Böcken von verschiedener Höhe ruhen (Abbildung 31). Von der oberen Station bis zum Wagen läuft das Seil in der Mitte zwischen den Schienen auf gusseisernen Rollen. In der horizontalen Kurve, die mit einem konkaven Gefällsbruch zusammenfällt, wird durch Druckrollen am obern und untern Kurvenende ein Abheben des Seiles aus den schiefen Tragrollen verhindert. Das Drahtseil hat einen Durchmesser von 32 mm und ein Gewicht von etwa 3,5 kg/m'. Der Seilzug beträgt bei dem maximalen Rohrgewicht von 6,5 t 9550 kg. Da die Bruchgrenze des Kabels bei 57 500 kg liegt, besteht rund sechsfache Sicherheit gegen Zugbeanspruchung. Der Wagen, der für den Transport der Rohre eine Tragfähigkeit von 6500 kg und für den Materialtransport mit Schrägaufsatz eine solche von 5000 kg aufweist, ist mit einer automatischen Bremse versehen, die beim Verschwinden des Seilzuges am Wagen in Funktion tritt und aus zwei Zangenpaaren besteht, von denen jedes in bekannter Weise auf einen Schienenstrang wirkt; die automatische Bremse kann auch mittels eines Hebels von Hand in Tätigkeit gesetzt werden. Ausserdem ist noch

bezw. dort wieder abgesetzt wird. Die Fahrgeschwindigkeit beträgt für schwere Lasten 0,5 m/sek, für den leeren Wagen und geringe Belastung 1 m/sek. Das Signalisieren vom Wagen aus erfolgt durch Berühren eines längs der Linie geführten Kontaktdrahtes mittelst eines Metallstabes. Es sei noch beigefügt, dass nach Bauvollendung ein gedeckter Kasten auf den Wagen montiert wurde und dass

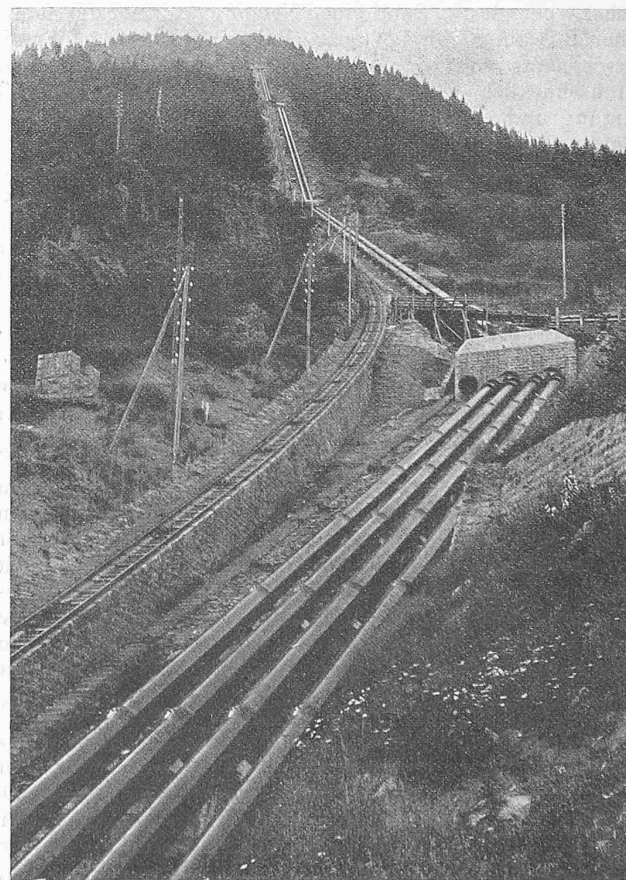


Abb. 29. Die Seilbahn bei Fixpunkt 5 (Gabelung) der Druckleitung.