

# Ueber Gebirgsdruck

Autor(en): **Maillart, Rob.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **81/82 (1923)**

Heft 14

PDF erstellt am: **24.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-38889>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

wenn der Betriebspunkt vor der Grenzkurve angelangt ist. Wird sie vollends erreicht, so überwiegt der Einfluss des Druckkolbens K; dadurch wird der Steuerschieber B nach abwärts gezogen und gibt Drucköl auf die untere Seite des Kraftkolbens M, wodurch sich das Abblaseventil hebt. Das Gestänge D-E bildet die Rückführung zur Mittellage und die Steuerung kommt erst wieder in Tätigkeit, wenn die kleine Eröffnung des Abblaseventils den stabilen Betrieb noch nicht hergestellt hat. Abb. 10 gibt die Aussenansicht der Vorrichtung. Die beschriebene Wirkung tritt bei beliebiger Drehzahl erst dann ein, wenn der Betriebspunkt an die Grenzkurve heranrückt und die Eröffnung ist immer nur so gross, als zum Vermeiden des Pumpens eben nötig ist. (Schluss folgt.)

### Ueber Gebirgsdruck.

Von Ing. Rob. Maillart, Genf.

Während von Prof. Dr. Alb. Heim die Ansicht vertreten wurde<sup>1)</sup>, die Ausmauerung eines Tunnels müsse in einer Tiefe, in der die Druckfestigkeit des Gesteins überschritten ist, das volle Gewicht des überlagernden Gebirges tragen, betonen die Praktiker<sup>2)</sup>, dass dies nicht zutrifft, indem man mit viel schwächeren Mauerungen auskommt, als es nach Heim nötig wäre.

Des öfters ist versucht worden, diesen Widerspruch zu erklären. Dies geschah immer durch Annahme einer derart gründlichen Aenderung der Spannungsverhältnisse in der Nähe des Stollens, dass der grosse Druck rings um das Profil früher oder später mehr oder weniger verschwand. Entweder werden dabei für kohäsionsloses Material abgeleitete Gesetze auf Gestein übertragen<sup>3)</sup> oder man schuf rings um den Stollen einen „spannungslosen Körper“<sup>4)</sup>, oder man nahm mit Wiesmann eine „Schutzhülle“ an mit an der Peripherie fast ganz verschwindenden Tangentialspannungen<sup>2)</sup>. Darnach fiel es dann nicht mehr schwer, übliche Gewölbestärken als auch theoretisch einwandfrei herauszurechnen.

Keine dieser Annahmen kann jedoch befriedigen. Der Deformationen und Spannungsverteilungen beurteilende Statiker stösst dabei auf Unmöglichkeiten. Die Unklarheit in der Beurteilung der Sachlage dauerte also fort.

Im nachstehenden ist ein, keine dieser Hypothesen in Anspruch nehmender Versuch zur Beurteilung der Spannungsverhältnisse nach Stollenausbruch, insbesondere zur Lösung der Frage: „Wieso kann ein verhältnismässig schwaches Gewölbe selbst bei grossem Gebirgsdruck genügen?“ erschienen im „Bulletin Technique de la Suisse Romande“ (1922 Nr. 22, 23 und 25), zusammenfassend dargestellt.

Man kann nicht von einer bestimmten, konstanten Festigkeit des Gebirges sprechen, etwa wie von der Festigkeit eines Metalls oder eines Steines. Das Gebirge weist Lager- und Spaltflächen auf, sodass die Festigkeit in verschiedenen Richtungen verschieden, dabei aber jedenfalls kleiner ausfallen wird, als die eines intakten Handstückes.

Auch über die im Gebirge vor dem Ausbruch eines Stollens vorhandenen Pressungen sind wir im Ungewissen. Ganz sicher wirkt das Gewicht der überlagernden Gebirgsmasse; aber es ist anzunehmen, dass es an einer bestimmten Stelle mehr, an einer andern weniger stark zur Geltung kommt, infolge von Schichtungen und Verwerfungen, sowie unregelmässiger Gestalt der Erdoberfläche. Ebenso sicher ist mit einem Minimum des Horizontaldruckes zu rechnen, entsprechend der Hinderung der Horizontalausdehnung, die das Gebirge unter dem Vertikaldruck erfahren würde, wenn es sich frei ausdehnen könnte. Hierzu kommen aber

noch die in der Erdrinde aus der Abkühlung unseres Planeten herrührenden, zweifellos vorhandenen Horizontalpressungen. Sie werden verhältnismässig gering sein, wo Einschnitte durch Talbildung geschaffen worden sind, bei wachsender Tiefe aber rasch zunehmen und die Vertikalpressungen bald dermassen übertreffen, dass sich das Gebirge im Bruchzustande befindet. In ganz bedeutenden Tiefen ist nicht mehr Bruchzustand, sondern plastischer Zustand anzunehmen und es wird die Differenz von Horizontal- und Vertikaldruck nur durch die in der plastischen Masse bestehende Reibung begrenzt sein.

Wenn wir also, um das Problem erfassen zu können, im folgenden genötigt sind, die vereinfachenden Annahmen zu machen, es sei erstens das Gebirgsmaterial homogen, ihm somit eine bestimmte Würfelhaftigkeit  $k$  zuzusprechen, und zweitens, es sei der Gebirgsdruck in jeder Richtung gleich dem Ueberlagerungsdruck in der Tiefe  $h$ , also gleich  $p = h\gamma$ , so können die gewonnenen Ergebnisse keineswegs zahlenmässig auf die Fälle der Praxis angewendet werden. Es handelt sich aber hier nur darum, eine plausible Erklärung für nicht abgeklärte Tatsachen zu geben. Gelingt sie für diese einfachsten Annahmen, so wird man lediglich zu beurteilen haben, ob weniger einfache Verhältnisse auf die Ergebnisse von wesentlichem Einfluss sein könnten.

Es sei also im homogenen, unter allseitigem Druck  $p$  stehenden Felsen ein quadratischer Stollen ausgebrochen. Wie stellen sich nun die Druckverhältnisse in einem in mittlerer Höhe geführten Horizontalschnitt? Nach einer von Willmann verfochtenen Ansicht wird der vorher die Stollenhorizontalfläche treffende Druck zuerst ganz von den Ulmen aufgenommen, sodass dort ein um 33 bis 200% grösserer Druck als vor Ausbruch stattfinden würde. Mit wachsender Entfernung nehme er dann rasch ab bis auf den Wert  $p$ . Diese Ansicht, die auf den ersten Blick plausibel erscheint, indem man unwillkürlich das überlagernde Gebirge als Balken auffasst, — was bei einer im Verhältnis zum Massiv grossen Öffnung zutreffen mag, — hält aber nicht Stand, sobald man sich die Kleinheit der Öffnung im Verhältnis zur Gebirgsmasse richtig vergegenwärtigt. Wenn man in eine 1 m dicke Säule ein Loch von ein Quadratcentimeter Weite bohrt, so fällt es Niemanden ein, an dessen Rändern eine Verdreifachung der Spannungen anzunehmen, sondern es erscheint klar, dass der vorher auf die Öffnungsfläche entfallende Hundertstel des Gesamtdruckes von den verbleibenden Flächen fast gleichmässig aufgenommen wird. In der Nähe der Öffnung wird eher eine gewisse Abnahme des Druckes infolge der nun einseitig ungehinderten Querdehnung zu vermuten sein. Diese Abnahme, und zwar im Uebermasse, wird auch von den Vertretern oben genannter Ansicht angenommen, jedoch lediglich als Konsequenz der Schwächung des Materials durch den übertrieben gross angenommenen anfänglichen Randdruck. Da aber einerseits diese Abnahme nicht wesentlich sein kann — sofern nicht Bruch stattfindet — und andererseits die durch den Ausbruch bedingte Mehrbelastung sich auf weite Entfernung verteilt, begehen wir keinen grundsätzlichen Fehler, wenn wir zur Vereinfachung unserer Ausführungen vorläufig annehmen, die den Horizontalschnitt treffende Vertikalpressung sei konstant und zwar gleich  $p$ , wie vor Stollenausbruch.

Dieser konstante Vertikaldruck ist in der beigefügten Abbildung in verschiedener Grösse durch horizontale Linien  $p_I, p_{II}, p_{III}$  dargestellt. Tragen wir zum Vergleich die Würfelhaftigkeit des Gebirges  $k$  als Ordinate auf, so ergibt sich, wenn wir zunächst ein kleines  $p$ , d. h. die unterste Horizontallinie mit Ordinate  $p_I$  in Betracht ziehen, dass die Stollenwände dem Druck ohne weiteres standhalten werden, denn die Ulmen befinden sich in gleichen Verhältnissen, wie die Seitenflächen eines unter der Versuchspressur befindlichen Probewürfels. Hier wie dort ist die Querdehnung unten und oben gehindert, in der Mitte dagegen nicht. Wir bezeichnen diesen Zustand, wo  $p_I < k$ , als *Stadium I (Standfestes Gebirge)*.

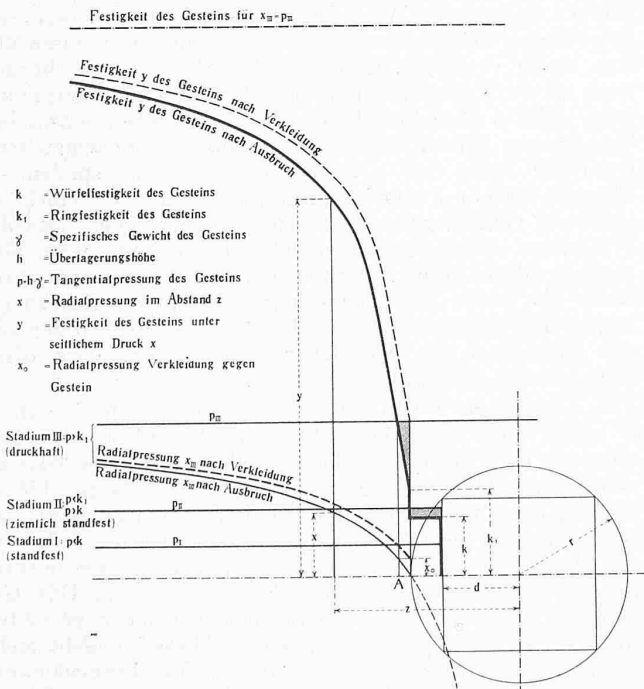
<sup>1)</sup> Siehe z. B. «Schweiz. Bauzeitung», Bd. 59, S. 107 (24. Febr. 1912).

<sup>2)</sup> Vergl. z. B. Wiesmann, «S. B. Z.», Bd. 53, S. 163 (27. März 1909) und Bd. 60, S. 87 (17. August 1912), sowie Brandau, «S. B. Z.», Bd. 53, S. 2 (2. Jan. 1909).

<sup>3)</sup> Bierbaumer, «Die Dimensionierung des Tunnelmauerwerks», Leipzig 1913. Brandau, «S. B. Z.», Bd. 53, S. 70 und 71 (6. Februar 1909).

<sup>4)</sup> Willmann, «Einige Gebirgsdruckerscheinungen und ihre Beziehungen zum Tunnelbau», Leipzig 1911.

Betrachten wir nun die nächsthöhere Horizontallinie ( $p_{III} > k$ ), so wird die Ulme brechen müssen und der Bruchvorgang wird nach obigem ganz ähnlich sein wie bei einem Probewürfel. Es werden sich also von den Kanten aus geneigte Bruchflächen bilden, die sich, steiler werdend, in mittlerer Höhe treffen. Das aus Würfelproben wohlbekannte Segment wird aber beim Stollen nicht widerstandslos in den Hohlraum gestossen, sondern bleibt zwischen Sohle und First festgeklemmt, spaltet sich weiter und zerfällt in Trümmer. Der Bruch auf der durch das schraffierte Rechteck gekennzeichneten Strecke hat zur Folge, dass die Umgrenzung des noch kohärenten Gebirges nun nicht mehr ein Quadrat, sondern annähernd ein Kreis ist. Am Umfange dieses Kreises wirkt nun nach wie vor die Pressung  $p_{II}$  als Tangentialpressung und man ist versucht zu glauben, dass die Zerdrückung des Gesteins unbedingt weiter und weiter fortschreiten müsse. Nun sind aber die Verhältnisse an der konkaven Profilfläche nicht mehr dieselben, wie bei einem Probewürfel, sondern es ist anzunehmen, dass hier eine gegenüber der Würfel Festigkeit erhöhte Festigkeit  $k_1$  zur Geltung kommt. Beim umschnürten Beton fällt die äussere Betonhülle ab, sobald der Druck die Würfel Festigkeit überschreitet; alsdann ist aber noch eine erhebliche Mehrbelastung des Betonkernes möglich, trotzdem er nicht völlig umhüllt, sondern zwischen den Umschnürungseisen frei ist. Für diesen seitlich freien Beton ist also eine andere Bruchzahl massgebend als die Würfel Festigkeit, offenbar, weil sich das Material zwischen den Umschnürungs-Eisen gewölbeartig verspannt. Eine ähnliche Verspannung ist beim runden Stollenprofil anzunehmen, wenn auch offenbar der Effekt infolge des bedeutend grösseren Radius viel kleiner sein wird als im Falle des umschnürten Beton. Nehmen wir an es sei diese „Ringfestigkeit“  $k_1$  grösser als  $p_{III}$ , so wird sich Gleichgewicht trotz Bruch der Ulmen einstellen. Einbau und Verkleidung haben in diesem Falle lediglich die losgelösten Bruchstücke festzuhalten. Wir bezeichnen dies mit *Stadium II (ziemlich standfestes Gebirge)*.



Wird  $p_{III} > k_1$ , so muss der Bruchvorgang an der Peripherie seinen weiteren Verlauf nehmen. Immerhin in langsamem Fortschritt, niemals durch plötzlichen Einbruch. Man muss sich fragen, woher das kommt; denn nachdem nun auch die „Ringfestigkeit“ überwunden ist, erscheint es auf den ersten Blick nicht ausgeschlossen, dass Bruch in grossem Umfange plötzlich, selbst bis zum Tagbruch eintritt. Um diesen Punkt zu ergründen ist es nötig, die

Druck- und Festigkeitsverhältnisse in der Nähe des Stollens eingehend zu untersuchen.

Betrachten wir hierzu einen mit dem Stollen coaxialen Hohlzylinder von innerem Radius  $z$  und Dicke  $dz$ , so wirkt auf ihn von innen eine gewisse Radialpressung  $x$  und von aussen eine entgegengesetzt gerichtete Radialpressung  $x + dx$ . Da die Tangentialpressung  $= p$  ist, erfordert gemäss der Ringformel das Gleichgewicht:

$$p \cdot dz = (x + dx)(z + dz) - x \cdot z = x dz + z dx$$

$$\frac{dz}{z} = \frac{dx}{p - x}$$

integriert:  $l z = C - l(p - x)$

für  $z = r$  ist  $x = 0$ :  $l r = C - l p$

woraus  $\frac{z}{r} = \frac{p}{p - x}$

$$z \cdot (p - x) = r \cdot p$$

Die  $x$ -Kurve ist also eine gleichseitige Hyperbel mit der Horizontalen  $p$  und der Vertikalen durch Stollenmitte als Asymptoten. Sie ist für die Pressung  $p_{III}$  in der Figur eingetragen.

Diese radialen Pressungen wirken nun auf die Festigkeit erhöhend, weil die Festigkeit eines Körpers nicht lediglich eine Funktion der in einer gewissen Axe wirkenden grössten Pressung, sondern auch der in einer der andern zugeordneten Hauptaxen wirkenden Minimalpressung ist. Die in der dritten Hauptaxe wirkende Beanspruchung ist ohne Belang. Diese hauptsächlich von Mohr begründete Erkenntnis hat Kármán<sup>1)</sup> Anlass zu Versuchen gegeben, die den Zusammenhang zwischen Festigkeit und allseitigem Querdruck für Marmor und Sandstein abgeklärt haben. Schon vorher hatte Considère<sup>2)</sup> ähnliche Versuche mit Betonprismen vorgenommen, im Hinblick auf seine Erfindung des umschnürten Beton. Es ergibt sich, dass schon bei geringer Querpressung die Festigkeit ganz bedeutend wächst. Bei Erhöhung der Querpressung wächst die Festigkeit weniger stark, erreicht aber schliesslich doch etwa das zehnfache der Würfel Festigkeit. Bei Anwendung von Pressungen von mehreren Tonnen pro Quadratcentimeter deformierten sich Marmor und Sandstein durchaus plastisch. Die Verkürzungen betragen bis 9% bei allseitiger starker Ausbauchung ohne jegliche Bruchanzeichen. Nur bei verhältnismässig kleinerer Querpressung zeichneten sich auf der Oberfläche der Probezylinder schiefe gerichtete Gleitflächen ab.

Der theoretische Zusammenhang zwischen der Festigkeit  $k$  ohne Seitenpressung und der Festigkeit  $y$  bei einer Seitenpressung  $x$  ist meines Wissens noch nicht gefunden. Die für umschnürten Beton aufgestellten Formeln sind rohe Annäherungen für die in der gewöhnlichen Baupraxis üblichen Spannungsgrenzen und können in unserem Falle nicht genügen. Die Versuche von Considère und Kármán sowie die zahlreichen Versuche an umschnürten Betonprismen lassen sich indessen in befriedigender Weise decken durch folgende empirische Näherungsformel:

$$x = \frac{y^2 - k^2}{a(1+k)^2} \text{ t/cm}^2 \quad \dots \quad (1)$$

wo  $a = 3 \text{ t/cm}^2$  für Beton und Marmor und  $= 6 \text{ t/cm}^2$  für Sandstein ist. Wir nehmen im folgenden die kleinere Zahl an und gehen von der „Ringfestigkeit“  $k_1$  statt von der Würfel Festigkeit  $k$  aus, — beides diskutierbare, aber nicht ausschlaggebende Annahmen — und erhalten damit

$$y = \sqrt{3x(1+k_1)^2 + k_1^2} \quad \dots \quad (2)$$

welche Kurve in unserer Zeichnung aufgetragen ist. Wir sehen, dass sie sehr rasch ansteigt, sodass die Horizontale  $p_{III}$  schon im Punkt  $A$ , also in geringer Entfernung vom Stollen geschnitten wird. Hier ist also die von der Horizontalpressung bewirkte Erhöhung der Gebirgsfestigkeit schon genügend, um der herrschenden Tangentialpressung standzuhalten.

Wir sehen nun einen ganz sonderbaren Zustand vor uns. Rings um den Stollen herum ist die Druckfestigkeit

1) v. Kármán, Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck, Berlin 1912. «Bulletin Techn. de la Suisse Romande» 1922, Seite 238.  
2) «Annales des Ponts et Chaussées» 1904, 2ème trimestre, S. 258.

gemäss dem schraffierten Dreieck mehr oder weniger übersritten. Nun ist aber gewöhnlicher Druckbruch ohne ausgesprochene Gegeneinanderbewegung der Bruchstücke nicht denkbar. Diese Bewegung kann sich aber nicht auslösen, weil sich weiter hinten im gleichen Querschnitt Material befindet, das zum Bruche noch nicht reif, also diese Bewegung nicht mitzumachen geneigt ist. (In weniger ausgesprochener Weise beobachten wir Ähnliches bei Bruchversuchen an stark armierten Eisenbetonbalken; es genügt nicht zum Bruche, dass die Würfel Festigkeit an der Druckkante erreicht ist; die tieferliegenden Querschnittsteile verhindern den Bruch solange, bis auf nahezu der ganzen Druckzone die Bruchspannung vorhanden ist).

Unter idealen Verhältnissen könnte also auch in diesem Zustande Stabilität bestehen. Jedoch werden die Unregelmässigkeiten der Form und des Gefüges meist derart sein, dass insbesondere unter dem Einfluss von Erschütterungen Bruch eintreten wird. Doch wird er naturgemäss zuerst auf eine dünne innere Schale beschränkt sein und sich dort durch kleine Abbröckelungen oder Abspalten dünner Schalen äussern, im Gegensatz zu dem für Würfelproben charakteristischen plötzlichen Gleitbruch. Sobald nun aber eine dünne Schale infolge Bruches vom Tangentialdruck befreit ist, rückt der Nullpunkt der  $x$ -Kurve und damit auch die  $y$ -Kurve nebst dem Punkt  $A$  entsprechend nach links. Es ist also wahrscheinlich, dass der Bruchvorgang die nächste nun freigelegte Schale erfasst und dann nach und nach weiterschreitet. Dabei erscheint indessen auch nicht ganz ausgeschlossen, dass Stillstand des Prozesses eintritt, etwa durch günstige Zufälligkeiten der Struktur, unterstützt durch den verminderten Einfluss der Erschütterungen infolge des durch die zertrümmerten Schichten gebildeten Polsters. Jedenfalls aber ist dieser Gleichgewichtszustand ein labiler.

Beim Zerstörungsprozess tritt eine erhebliche Volumvergrößerung der Bruchstücke ein und diese üben Druck aus, wenn die Ausdehnung gehinder wird (*Stadium III, Druckhaftes Gebirge*).

*Es erhellt nun aber ohne weiteres, dass die Zerstörung schon in ihren Anfängen verhindert wird, wenn wir den in  $A$  herrschenden Horizontaldruck  $x_0$  von innen auf die Peripherie des Stollens wirken lassen.* Sofern wir also eine Verkleidung des Stollens anordnen, die einem Aussendruck  $x_0$  standhalten kann, wird die Druckfestigkeit des Gebirges von  $k_1$  auf  $p_{III}$  erhöht und es damit befähigt, sich selbst zu tragen.

*Nicht durch den ganzen Gebirgsdruck  $p_{III}$  ist also die Verkleidung beansprucht, sondern nur durch den Druck  $x_0$ , der nur ein kleiner Bruchteil von  $p$  ist.*

Wird die Verkleidung erst angeordnet, nachdem die Zerstörung schon weiter, beispielsweise bis  $z$  fortgeschritten ist, so muss eine stärkere Verkleidung angeordnet werden, indem sie nun der Radialpressung  $x_0 \cdot \frac{z}{r}$  genügen muss, damit auf die Peripherie vom Radius  $r$  die Pressung  $x_0$  noch vorhanden ist. Daher die Wichtigkeit der raschen Vornahme der Verkleidung.

Wäre  $p$  im betrachteten Schnitte nicht konstant, also durch eine von der Horizontalen abweichende Kurve darzustellen, so würden sich die  $x$ - und  $y$ -Kurven wohl ändern, aber doch ohne ihren Charakter einzubüssen. Unsere Erörterungen sind also von den Annahmen über diese Veränderlichkeiten von  $p$  nicht abhängig.

Ist der Gebirgsdruck nicht in jeder Richtung gleich gross, also der Horizontaldruck grösser oder kleiner als  $p$ , so ändert dies auch nichts am Wesen der Dinge; im zweiten Falle ist an unserer Betrachtung überhaupt nichts zu ändern, im erstern tritt an Stelle von  $p$  der Horizontaldruck, wobei statt eines Horizontalschnittes ein Vertikalschnitt durch die Stollenaxe zu betrachten ist.

Infolge Schichtung und Klüftung sind  $k$  und  $k_1$  an den verschiedenen Punkten der Peripherie einer Tunnelröhre jedenfalls stark verschieden. Dies beeinflusst aber unsere Ausführungen auch nicht wesentlich, selbst nicht

im extremen Fall, wo im selben Profil verschiedene Stadien auftreten sollten. Denn wenn die nach obigem bestimmte Verkleidung dem minimalen  $k_1$  genügt, so wird sie ohne weiteres auch für stellenweise grössere  $k_1$  ausreichen.

Wichtiger sind die genannten Unregelmässigkeiten für die Beurteilung der Beanspruchung des Verkleidungsmauerwerks. In unserem einfachsten Falle kann die bekannte Röhrenformel benützt werden, oder man berechnet angenähert bei angenommener Verkleidungstärke  $d$  die Beanspruchung  $\sigma = x_0 \cdot \frac{r}{d}$ . Es ist nun leicht einzusehen, dass bei einigermassen stetig gerundetem Profil und satten Anschliessen des Mauerwerks an den Fels jeder Mauerwerksquerschnitt mit dem Maximalwert der Tangentialkraft  $x_0 \cdot \rho$  (wo  $\rho$  der jeweilige Krümmungsradius, der nun, wie auch  $x_0$ , variiert), in ziemlich zentrischer Weise beansprucht sein wird. Denn an den Punkten, wo das Produkt  $x_0 \cdot \rho$  ursprünglich kleiner ist, tritt Tendenz zum Ausweichen ein, wodurch passiver Druck ausgelöst wird, der  $x_0$  dermassen vergrössert, dass das Produkt automatisch auf den zum Gleichgewicht nötigen Wert steigt. Als die allen Eventualitäten mit grösster Wahrscheinlichkeit gerecht werdende Profilform ergibt sich natürlich der Kreis.

Wenn auch kaum von praktischem Wert, so doch interessant ist der Hinweis, dass ein Verkleidungsmauerwerk von der Festigkeit  $k_1$  unter Umständen genügen könnte, um den Tunnel zu befestigen, selbst wenn  $p$  grösser ist als  $k_1$ . Die Spannung in der Verkleidung  $x_0 \cdot \frac{r}{d}$  kann nämlich sehr wohl kleiner ausfallen als  $k_1$ . Daraus folgt, dass wenn es uns gelänge, eine stehen gelassene innere Hülle des Gesteins von der Dicke  $d$  vom ursprünglichen Tangentialdruck zu befreien, diese Massnahme genügen könnte, um nicht nur die Hülle, sondern auch das dahinter liegende Gestein vor dem Verdrücktwerden zu schützen. Daraus darf auch geschlossen werden, dass man nicht ohne weiteres behaupten kann, es sei Gesteinsmaterial, das aus einer Druckerscheinungen aufweisenden Strecke stammt, von vornherein zum Verkleidungsmauerwerk dieser selben Strecke ungeeignet. Vielleicht lässt sich auch aus dieser Betrachtung miterklären, dass Tunnel ohne Sohlengewölbe sich besser verhalten, wenn die Widerlager eingeschnitten sind, als wenn dies nicht der Fall ist. Durch die Einschnitte wird nämlich eine Schicht unter der Tunnelsohle von der Ursprungspannung befreit und kann nun bis zu einem gewissen Grad die Rolle des Verkleidungsmauerwerks spielen. — Mangels solcher Fundament-Einschnitte ist die Schicht in grösserer Gefahr, zerquetscht zu werden, wobei dann die Widerlager zusammenrücken. Diese Erscheinung wäre also weniger durch ein Rutschen der Widerlager auf ihrer Basis als durch eine Bewegung der Basis selbst zu erklären. Das Erstgenannte würde nämlich einen so gewaltigen Druck auf die Widerlager voraussetzen, dass diese eher brechen als rutschen würden.

Der Wert  $x$  ist laut unserer Formel stark von  $y$ , d. h.  $x_0$  von  $p$  abhängig, während die Praktiker verneinen, dass die Ueberlagerungshöhe für die Mauerungsstärke so stark massgebend sei. Zur Erklärung sei darauf hingewiesen, dass die Festigkeit einer gewissen Gebirgsart bei wachsender Tiefe zunimmt, sodass die resultierenden  $x_0$  mit der Tiefe viel weniger zunehmen als es laut unserer Formel bei gleich bleibendem  $k$  der Fall wäre. Das Gebirge ist nämlich oben im Allgemeinen mehr gespalten und zerklüftet als unten, sodass es schliesslich nicht mehr als kompakt, sondern eher als eine Art Trockenmauerwerk anzusehen ist. Wie schon bemerkt, ist in grössten Tiefen volle Plastizität anzunehmen, die sich immerhin durch das Vorhandensein innerer Reibung vom flüssigen („hydrostatischen“) Zustand unterscheidet. Es werden also bei fortschreitender Abkühlung der Erdrinde in diesen Tiefen Faltungen ohne Bruch stattfinden, in vollständiger Uebereinstimmung mit den Anschauungen von Prof. Heim. Sobald aber die Ueberlagerungshöhe infolge Faltung und Erosion zu gering geworden ist, um genügenden Vertikaldruck

und damit plastische Deformation zu gewährleisten, so durchzieht sich das Gestein mit den, den Bruch einleitenden Gleitflächen, wie sie von Kármán an Steinprismen festgestellt wurden, nachdem Ähnliches früher schon von Hartmann beim Eisen konstatiert worden war. Wenn die Ueberlagerung noch weiter abnimmt, so treten wir ins Bruchstadium, d. h. es findet wesentliche Bewegung auf einzelnen Gleitflächen, aber zunächst noch ohne Trennung und völlige Aufhebung der Kohäsion statt. Wird die Ueberlagerung noch kleiner, so wird der Bruch vollständig, d. h. es findet in einem Teil dieser Flächen Trennung statt, sodass offene Spalten das Gebirge durchziehen, das nun wohl noch mehr oder weniger grosse Einzelstücke von hoher Festigkeit enthalten mag, aber als Ganzes wenig tragfähig ist.

Ich glaube den Schluss ziehen zu dürfen, dass meine auf allereinfachsten und ungezwungenen Annahmen beruhende Auffassung mit der Erfahrung in gutem Einklange steht, ohne dabei im Prinzip den Anschauungen von Prof. Heim zu widersprechen. Dass dieser zu Schlussfolgerungen gelangte, die die Praxis als allzupessimistisch verwarf, erklärt sich ganz natürlich dadurch, dass der frühere Stand der Erkenntnis ihm nicht gestattete, den enormen Unterschied zwischen Erreichung der «Festigkeit» in gewöhnlichem Sinne und dem Eintritt der Plastizität wahrzunehmen und zu würdigen. Er erwartete schon bei verhältnismässig kleiner Ueberlagerung Verhältnisse, die den Tunnelbau sozusagen unmöglich machen müssten; diese tritt aber erst in mehrfacher, uns kaum je zugänglicher Tiefe ein.

Genf, den 20. Februar 1923.

### Der Treffpunkt des Wasserstrahls eines Ueberfalls mit dem Boden.

Von Prof. A. Deischa in Moskau.

Der fallende Wasserstrahl verursacht wie bekannt beim Treffen des Bodens grosse Erosionen, die besonders auffallend sind hinter Ueberfallwehren, die auf weichem Boden stehen. Solche Stellen müssen besonders verstärkt werden. Es ist deshalb von Interesse, dem projektierenden Ingenieur eine graphische Methode in die Hand zu geben, mittels der er den Treffpunkt der fallenden Wassermenge mit dem Boden bestimmen kann.

Für das Ausfliessen eines Wasserstrahls aus einer kleinen Oeffnung in einer vertikalen Wand gelten die folgenden Beziehungen (vergl. obenstehende Abbildung 1)

$$l = v t \quad \dots \quad (1)$$

$$h = \frac{g t^2}{2} \quad \dots \quad (2)$$

$$v = \sqrt{2gH} \quad \dots \quad (3)$$

$$\frac{l^2}{2gH} = t^2 = \frac{2h}{g} \quad \dots \quad (4)$$

$$l = 2\sqrt{Hh} \quad \dots \quad (5)$$

Aus der Gl. (5) folgt die Konstruktion der Abbildung 1.

Beim Ausfliessen über einen rechteckigen Ueberfall haben die obere Wasserteilchen eine kleine, die untere eine grosse horizontale Geschwindigkeit. Deshalb findet zwischen den unteren und den oberen Teilchen ein unelastischer Stoss statt. Es ist somit

$$\Sigma(m_0 v_0 + m_n v_n) = M v_x \quad \dots \quad (6)$$

$$v_x = \frac{\int d(mv)}{M} \quad \dots \quad (7)$$

$$d(mv) = \frac{\gamma}{g} \mu dH b 2gH = \mu \gamma b 2H dH \quad \dots \quad (8)$$

wo  $b$  die Breite des Ueberfalls ist.

$$\int d(mv) = \mu \gamma b H^2 + C \quad \dots \quad (9)$$

$$M = \frac{\gamma}{g} Q = \frac{\gamma}{g} \frac{2}{3} \mu b H \sqrt{2gH} \quad \dots \quad (10)$$

$$v_x = \frac{\mu \gamma b H^2 3g}{\mu \gamma 2b H \sqrt{2gH}} = \frac{3\sqrt{gH}}{2\sqrt{2}} \quad \dots \quad (11)$$

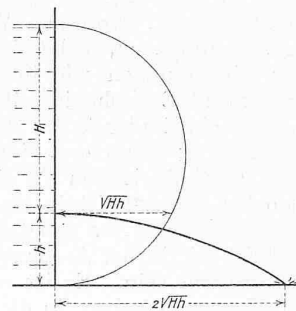


Abb. 1.

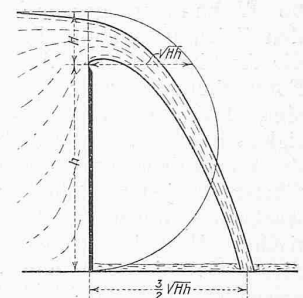


Abb. 2.

Aus den Gl. (1), (2) und (11) erhalten wir in gleicher Weise wie für den ersten Fall

$$\frac{l^2}{\left(\frac{3}{2}\sqrt{\frac{gH}{2}}\right)^2} = \frac{2h}{g} \quad \dots \quad (12)$$

$$l^2 = \frac{2h 3^2 g H}{g 2^2 2} = \frac{3^2 h H}{2^2} \quad \dots \quad (13)$$

$$l = \frac{3}{2} \sqrt{hH} \quad \dots \quad (14)$$

Die Länge  $l$  kann also konstruiert werden, wie es in Abbildung 2 angegeben ist.

### Genossenschafts-Wohnbauten in Prélaz bei Lausanne.

Architekten Gilliard & Godet in Lausanne.

Die zahlreichen Darstellungen neuzeitlicher Wohnkolonien, die wir in den letzten Jahren aus dem Gebiet der Ost- und Zentralschweiz unsern Lesern gezeigt haben, können wir heute durch ein Beispiel aus der Westschweiz ergänzen. Wir tun dies anhand einer ausführlichen, durch viele Zahlen bereicherten Beschreibung im „Bulletin Technique de la Suisse romande“ vom 17. März d. J., dem wir für die freundliche Ueberlassung der Bildstöcke danken, und auf das wir Interessenten bezüglich technischer Einzelheiten verweisen.

Gestützt auf eingehendes Studium englischer, deutscher und schweizerischer Beispiele sind die Architekten zu dem



Abb. 3. Genossenschafts-Wohnbauten in Prélaz bei Lausanne (aus Süd-West).