

Ueber Gebirgsdruck

Autor(en): **Wiesmann, E.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **59/60 (1912)**

Heft 8

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-30040>

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.

INHALT: Ueber Gebirgsdruck. — Neuere Bauten von Arch. Hans Bernoulli, Basel. — Wettbewerb für ein Schulgebäude in Arlesheim. — Gotthardbahn und Giovinlinie. — Miscellanea: Eine Zoelly-Dampfturbine für 28000 PS-Dauerleistung. Internationale Baufachausstellung Leipzig 1913. XXXII. Generalversammlung der Gesellschaft ehemaliger Studierender. Schweizer Landesausstellung Bern 1914. Eidgen. Technische Hochschule. Schweiz. Verein von Gas- und Wasserfachmännern. Deutscher Ausschuss für Technisches Schulwesen. Quecksilberdampfmaschinen für Wechselstrombetrieb. Neues

Kunstmuseum in Basel. Grenchenbergtunnel. Hauenstein-Basistunnel. Gasfeuerung in der Porzellanindustrie. Regulierung der Abflussverhältnisse des Vierwaldstättersees. — Konkurrenzen: Arbeiterwohnhäuser an der Badgasse in Bern. — Preisausschreiben: Schläflistiftung. — Literatur: Karstgebiete und ihre Wasserkräfte. Literar. Neuigkeiten. — Vereinsnachrichten: Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein. Gesellschaft ehemaliger Studierender: Stellenvermittlung.

Tafel 23 bis 26: Geschäftshaus Fischbein & Mendel in Berlin.

Band 60.

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

Nr. 8.

Ueber Gebirgsdruck.

von E. Wiesmann, Ingenieur.

6. Plastizität.

Professor Heims Lehre vom hydrostatischen Druck in grossen Tiefen mit allen Konsequenzen leitet sich aus dem Plastischwerden fester Körper *unter hohem Druck* ab. Zwar ist meistens nur die Rede von *latenter Plastizität*; es ist jedoch eigentlich eine Vorstufe vom Flüssigwerden damit gemeint. Da lesen wir ¹⁾: „Setzen wir einen spröden Körper auf einen Himmelskörper, dessen Schwere die Kraft erreicht oder übertrifft, die notwendig ist, seine Teile zu trennen, so wird der spröde Körper zur Flüssigkeit.“

Verfolgen wir den Gedanken weiter, so ginge daraus hervor, dass auf einem solchen Himmelskörper gewisse Körper z. B. Lava überhaupt nicht fest werden könnten. Ich denke aber, dass dort in einem Stück Lava, dass wegen Temperaturerniedrigung nach irdischen Begriffen erstarren müsste, beim Erstarren die Summe der molekularen Kräfte derart überwiegen würde, dass die vermehrte Schwere kaum in Betracht käme und dass sie sich höchstens in der Weise äussern könnte, dass Lava noch spröder würde als auf unserer Erde. Man kann sich über die Angelegenheit noch andere Gedanken machen:

1. Naturgesetz: Unterhalb der sogenannten kritischen Temperatur können wir einen *luftförmigen* Körper durch entsprechendem hohem Druck in den flüssigen Zustand überführen.

2. Naturgesetz vom Jahre 1878: Unter genügend hohem Druck und unter Einschluss wird ein *fester* Körper flüssig.

3. Naturgesetz: Gewisse feste Körper nehmen durch Druck eine grössere Festigkeit an. Nach Gesetz 2 wird aber der feste Körper unter der Presse plastisch und erst wieder starr, wenn wir ihn aus der Presse herausnehmen.

In Betrachtung dieser drei Naturgesetze könnte man vor Verwunderung selbst starr werden.²⁾

Wir wissen, dass stellenweise spröde Körper, Gesteine (Einfluss der Wärme werde vorerst nicht in Betracht gezogen) bei der Gebirgsbildung eine bruchlose Formänderung erfahren haben, ein Vorgang, den wir berechtigter Weise mit der Plastizität in Beziehung bringen dürfen; wir wissen, dass es durch Laboratoriumsversuche gelingt an Gesteinen, z. B. Marmor, dieselben Erscheinungen künstlich hervorzurufen. *Auf keinen Fall aber dürfen wir plastisches Verhalten spröder Körper in direkte Beziehung mit den unter der Festigkeitsmaschine gewonnenen Druckfestigkeitskoeffizienten bringen.* Ich habe in Abschnitt 4 hervorgehoben, welch unsichern Wert diese haben. Ausserdem haben Laboratoriumsversuche gezeigt, dass es viel grössere Pressungen braucht, um an spröden Körpern (z. B. Marmor) Erscheinungen plastischer Deformation zu erzwingen. Wenn wir hie und da schlecht gelagerte Steinplatten treffen, die sich plastisch verbogen haben³⁾, so hat wenigstens die konvexe Seite unter dem Einfluss von *Zugkräften* plastisch „nachgegeben“, also war das eine Art Plastizität, bei der die rückwirkende Festigkeit nicht in Frage kommt. Oder gibt es vielleicht zwei Sorten von Plastizität, eine für die Druckseite und eine andere für die Zugseite der Platte?

Jeder Körper der unter der Einwirkung äusserer Kräfte bruchlos eine bleibende Formänderung annimmt, hat sich plastisch deformiert. Am leichtesten bringen wir solche

¹⁾ *Alb. Heim* »Mechanismus der Gebirgsbildung« II. Teil, Seite 81.

²⁾ Siehe weiter: Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie 8. und 9. Heft 1879. — Seite 793—814 und besonders I. Band 1881 Seite 191 und 192.

³⁾ Mechanismus der Gebirgsbildung II. Teil, Seite 83.

Erscheinungen durch Biegung hervor, wobei wir eben diese plastische Formänderung sowohl auf der Zugseite als auf der Druckseite wahrnehmen können. Platten aus Eis, Steinsalz, Gips lassen sich auf diese Weise biegen. Die Plastizität ist eben eine *Eigenschaft* der Körper, so gut wie die Elastizität. Unter Druck tritt die Plastizität eines Materials leichter in Erscheinung als durch Zug, weil jener die Massenteilchen zusammenhält. Man kann den Vorgang der plastischen Deformation durch Druck nicht besser kennzeichnen als mit Professor Heims eigenen Worten: „Das Wesentliche liegt darin, dass die Teilchen unter Druck sich verschieben ohne ihre Attraktionssphäre zu verlassen, also ohne den Zusammenhang zu verlieren.“¹⁾

Wie wir allen festen Körpern ein gewisses Mass von Elastizität zuschreiben, so können wir das gleiche tun in Bezug auf die Plastizität. Wir könnten unterscheiden, *leichtplastische und strengplastische* Körper mit allen möglichen Zwischenstufen. Zwischenhinein würden z. B. die meisten Metalle rangieren. Plastisch ist weiches Eisen auch in kaltem Zustand. Diese Eigenschaft machen wir uns zunutzen beim Drahtziehen und in der Kaltschmiedepresse.²⁾ Auch andere Metalle, z. B. Kupfer, Silber zeigen eine gewisse Plastizität. Durch plastische Umformung dieser Materialien wird aber deren Plastizität *erschöpft*. Eisen wird „federhart“ und muss erst ausgeglüht werden, bevor man die plastische Umformung fortsetzen kann. Leichtplastisch sind meist jene Materialien, bei denen Zug- und Druckfestigkeit ziemlich gleich gross sind. Das Gegenteil von Plastizität heisst Sprödigkeit. Oft liegen beide Eigenschaften im selben Körper nahe beisammen, z. B. bei Eis, Steinsalz, Siegelack, wegen der geringen innern Reibung. Man liest da und dort, dass Eis unter einem Druck von 6, nach andern 20 *at*, plastisch werde. Man sollte richtigerweise sagen: „es gibt plastisch nach“ oder „unter diesem Drucke wird die Plastizität des Eises ausgelöst.“ Wenn wir Wasser mit Sand zusammengefrieren lassen, so wird die Plastizität des Eises verringert. Es ist aber unrichtig, wenn man sagt: „das Eis wird dadurch erst unter einem grössern Druck plastisch“. Der beigemengte Sand hat einfach die innere Reibung vermehrt und somit die Verschiebung der Massenteilchen erschwert.

Zur bruchlosen Umformung strengplastischer Körper braucht es drei gleichzeitig eintretende Umstände: 1. *Hohen Druck*. 2. *Guten Einschluss*, doch so, dass nach dieser oder jener Seite eine Bewegungsmöglichkeit bleibt. 3. *Relativ kleinen Druckunterschied* in der Richtung in der die Bewegung erfolgen soll. Es ist auch fast unerlässlich den Druck durch Schub und Zug, wie beim Walzprozess oder Drahtziehen zu unterstützen. Die verschiedenen einschlägigen Forschungen wurden neuerdings von *L. Milch*³⁾ im Zusammenhang dargestellt. Bemerkenswert sind in erster Linie diejenigen Stellen, welche die Plastizität als eine *Eigenschaft* der Körper kennzeichnen. Da heisst es auf Seite 149: „Als „starr oder plastisch“ bezeichnet der Sprachgebrauch Körper, die sich den Grenzfällen nähern (darunter wird verstanden „vollkommen starr“ und „vollkommen

¹⁾ Das besorgt eben der Einschluss. Bei Körpern, die nur eine geringe Plastizität besitzen, darf ein Einschluss nicht fehlen. Es braucht einen verhältnismässig hohen Druck, um die Eigenschaft der Plastizität in Erscheinung zu bringen und zwar besitzt sie das kleinste Massenteilchen so gut wie das Ganze; aus diesem Grunde wurde plastische Deformation bis hinunter zum kleinsten Kristallkorn wahrgenommen. Die Bezeichnung der Plastizität als eine *Eigenschaft* des Gesteins erschwert in keiner Weise die Erklärung plastischer Umformung an Gesteinen.

²⁾ Dr. *P. Goerns* »Kaltformgebung«, Carnegie Scholarship Memoirs Vol. III London 1911.

³⁾ »Ueber Plastizität der Mineralien u. Gesteine«, Leipzig 1911.

plastisch“); die Körper sind somit in dieser Hinsicht nicht der Art, sondern dem Grade nach verschieden und man könnte sie ebensogut als „mehr oder weniger starr“, wie „mehr oder weniger plastisch“ zusammenfassen“ . . . und auf Seite 150: „. . . es erweist sich eine verhältnismässig hohe Zahl von ihnen (den Mineralien) *plastisch*, d. h. sie besitzen die *Eigenschaft*, bei einer Beanspruchung durch äussere Kräfte *über die Elastizitätsgrenze hinaus, bleibend aber allmählich und stetige Veränderungen* ihrer Gestalt zu erleiden, ohne durch ein plötzliches Ereignis den Zusammenhang ihrer Teile einzubüssen“ (nach Groth).

Die Plastizität der Körper überhaupt nimmt durch *Temperaturerhöhung* zu, auch diejenige der Mineralien, weil dadurch die Massenteilchen beweglicher werden, und zwar entspricht bei einem bestimmten Körper jeder Temperatur ein bestimmter plastischer Zustand; d. h. die Plastizität als Eigenschaft wird im *Moment* des Eintretens einer höhern Temperatur ebenfalls auf eine höhere Stufe gebracht. Am bekanntesten ist in dieser Hinsicht das Verhalten der Metalle, von Eisen gar nicht zu reden. Gewisse Metalle zeigen in der Nähe des Schmelzpunktes eine beträchtliche Plastizität, z. B. Blei. Diese Eigenschaft wird bei der Herstellung von Geschosskugeln benutzt. Das Blei befindet sich in einem Metallzylinder, der es durch vorhergehendes Schmelzen satt ausfüllt. Nun lässt man die Temperatur etwas sinken, der flüssige Zustand geht in einen plastischen über. Durch die runde Oeffnung im Grunde des Zylinders fliesst das Blei nicht aus, hingegen kann es durch Druck auf den Kolben als Bleidraht herausgepresst werden, aus dem sogleich vermittelst passender Gesenke Bleikugeln geformt werden. „Der Druck überwand die innern Widerstände“, es ginge jedoch *nicht* an zu sagen: „Durch den Druck ist das Blei soweit plastisch geworden, dass es ausfloss“.

Druck im Gegenteil macht starr. Wenn jedoch durch Druck als eine äussere Kraft plastische Erscheinungen aufgelöst werden, so kann das nur geschehen, wenn nach einer Seite hin ein Druckgefälle entsteht, wodurch eine Bewegung der Massenteilchen eintritt. Es wurde durch die Versuche von G. Tamann 1902 und 1903 (L. Milch, Seite 152) der Nachweis geliefert, dass Kristalle unter höherem Druck schneller ausflossen. Auch hier besteht m. E. die Wirkung des höhern Druckes nicht in einer Vermehrung der Plastizität des untersuchten Körpers.

Berechtigtes Aufsehen machten (L. Milch, Seite 155) die von F. D. Adams und J. F. Nicolson zusammen mit Cocker 1910 ausgeführten Experimente *vollkommener plastischer Umformung von Marmor*. Verkürzt gebe ich hier eine Beschreibung. Ein glatter Marmorzylinder wurde in einen konform gebohrten Stahlblock aus Nickelstahl eingebracht, dessen Wandungen 6 cm betragen. In der Mitte des Blockes war eine Einschnürung und dadurch die Wandstärke auf eine Strecke auf 2 cm reduziert. Die Pressung wurde durch zwei gutpassende Stempel aus Chrom-Wolframstahl auf den Marmorzylinder übertragen und es erreichte dieselbe 20875 kg/cm². Der Druck wurde langsam verstärkt und wirkte 41 Stunden. Der Marmorzylinder war anfangs 40 mm lang und 20 mm dick. Nach der Probe betrug die Länge noch 17,3 mm bei 28,81 mm Durchmesser an der stärksten Stelle.

Daran knüpfte ich folgende Betrachtungen: Der Druck wurde verwendet: 1. Zur Umformung des Marmorzylinders bzw. zur Ueberwindung der innern Widerstände. 2. Zur Ausbauchung der Umhüllung. Offenbar waren die beiden Stahlstempel über ihre bekannte rückwirkende Festigkeit beansprucht. Ob sie darunter litten ist nicht gesagt.

Frage: War während des Vorganges der Marmorzylinder mit einer grössern Plastizität behaftet? Eine Probe wie aus einem Schmelztigel konnte man nicht nehmen. Ich bin geneigt die Frage zu verneinen. Eine Erhöhung der Temperatur würde die Plastizität augenblicklich erhöhen. Die Spannung infolge des Druckes verteilt sich ebenfalls augenblicklich über den ganzen Probekörper. Die Deformation hingegen braucht Zeit und gerade aus dem Ein-

fluss der Zeit schliesse ich, dass der Probekörper nicht mehr Plastizität hergeben konnte, als er von Haus aus besass.

Man sollte vom technischen Standpunkt aus die Plastizität zuerst an anerkannt plastischen Körpern studieren und von da übergehen auf spröde Körper, wie man auch beim Studium der Elastizität nicht beim Granit anfängt, obgleich auch ihm ein gewisses Mass von Elastizität zugeschrieben wird. Die Frage über das plastische Verhalten spröder Körper hat indessen für den praktischen Tunnelbau wenig Bedeutung, ungefähr so viel, wie für die Uhrmacherei eine Diskussion über die Bedingungen der Herstellungsmöglichkeit einer Uhrfeder aus Granit. Sowie im Tunnelbau die Frage über das *Ausbleiben des Gebirgsdruckes* wichtiger ist als diejenige über den Gebirgsdruck selbst, so sollte man jetzt, da die Plastizität so sehr in den Vordergrund tritt, einmal das Wesen der *Starrheit* der Mineralien näher studieren. Ich bin überzeugt, dass auf diese Weise das „Plastischwerden“ spröder Körper unter hohem Druck endgültig in das Kapitel der Scheingründe verwiesen werden könnte.

7. Ruhender Druck, chemische Umformungen.

Professor Heim beanstandet in meinem Aufsatz in der Bauzeitung vom 27. März 1909 die Behauptung, dass sich das Gestein unter allseitigem Druck nicht ändere. Ich schloss meinen Aufsatz mit den Worten: „Physikalische Veränderungen des Gesteins werden, kurz gesagt, nur hervorgerufen durch mechanische Arbeit“. Ich bin heute noch der gleichen Meinung. Dem wird entgegengehalten (Schw. Bauzeitung vom 24. Februar 1912, Seite 108). „Wir kennen aber längst eine Menge von innern Umkristallisationen, die unter ruhendem Druck eintreten.“

Fürs erste glaube ich, dass der Vorgang für die Spannungsverteilung ohne Belang ist. Auf Details kann ich natürlich nicht eintreten, weil mir dieses Gebiet zu weit abliegt. Aber etwas darüber denken, das kann ich doch. Meine Anschauungen sollen hier kurz dargelegt werden.

Ruhender Druck wird heutzutage *potentielle Energie*, Druck mit Bewegung, Kraft mal Weg, *kinetische Energie* genannt. Von einzelnen Autoren werden die in Rede stehenden Erscheinungen mit *Dynamometamorphismus* bezeichnet¹⁾. Das deutet auf kinetische Energie hin. Professor Heim sagt an anderer Stelle: „. . . weil sie starke Kohäsionskräfte und innere Reibung auf gewissen *Wegen* überwinden, also eine *mechanische Leistung* ausüben müssen.“ Wiederum kinetische Energie. Natürlich wäre das noch kein Beweis dafür, dass potentielle Energie nicht auch daselbe tun könnte.

Ein Beispiel: Wenn wir einen kurzen Zylinder aus Eisen unter einer Presse drücken, so verkürzt er sich. Der Vorgang stellt kinetische Energie dar. Dabei setzt sich ein Teil derselben in Wärme um. Der Zylinder erwärmt sich. Endlich soll der Widerstand im Eisenzylinder dem Druck das Gleichgewicht halten. Es tritt ruhender Druck ein, potentielle Energie. Der Wärmeumsatz hört auf. Und ich schliesse weiter: *Wie hier potentielle Energie keine Umsetzung in Wärmeenergie bewirkt, so ist sie auch nicht imstande, sich in chemische Energie umzusetzen.* Dies soll kein Beweis sein, sondern nur zeigen, dass meine Anschauungen nicht unüberlegte sind. Chemisch neutrale Körper können unter starrem Einschluss jeden Druck vertragen, ohne sich zu verändern²⁾; weiches Eisen bleibt unter diesen Bedingungen weich.

8. Ueberdruck, Unterdruck (Depression), Druckgefälle.

Im Erdinnern herrscht voraussichtlich im allgemeinen auf dem gleichen Niveau der gleiche Druck, normaler Druck. Doch kann unter Umständen auch eine unregelmässige Druckverteilung stattfinden. Das wird durchwegs zugegeben. Es bedeutet dies aber einen anormalen Zustand. Somit kann es Stellen geben mit erhöhtem Druck, *Ueberdruck* und andere mit geringerem Druck, *Unterdruck* oder

¹⁾ Albert Heim, „Geologische Nachlese“, Heft 19, Seite 56.

²⁾ Solche Versuche wurden bereits vor Jahren durch Professor Giorgio Spenta an der Universität Turin ausgeführt.

Depression. Der Uebergang von einem zum andern erfolgt meist allmählich. So gut wie wir von einem Temperaturgefälle und in der Hydraulik und Aereodynamik von einem Druckgefälle sprechen, so können wir auch hier ein *Druckgefälle oder Spannungsgefälle* unterscheiden. Der Unterschied besteht jedoch darin, dass sich die erstgenannten Gefälle nur durch Bewegung (Fluss) aufrecht erhalten, während im Gestein durch Kohäsion und innere Reibung *dauernde Erhaltung* (Gleichgewichtszustand) eines *Druckgefälles bewirkt wird*. Reichen diese beiden Faktoren nicht aus, so entsteht, Bewegungsmöglichkeit vorausgesetzt, eine Bewegung, aber meist eine sehr langsame.

9. Einfluss der Zeit.

Wählen wir gleich ein Beispiel: Wenn wir einen festen Körper unter vollkommenem Einschluss pressen, so wird die Spannung der ganzen Masse *augenblicklich* mitgeteilt, weil bei deren Fortpflanzung nur undenkbar kleine Verschiebungen der Massenteilchen in Frage kommen. Wären indes in der Umhüllung Aussparungen, so könnten unter Umständen gewisse Massenteilchen wegen eintretendem Druckgefälle sich dahin bewegen. Wahrscheinlich würden wir die Folgen unter andauerndem Druck erst nach verhältnismässig langer Zeit wahrnehmen. *Indessen würde die Bewegung, so unendlich langsam wir sie uns auch vorstellen, sogleich ihren Anfang nehmen. Den Anfang wenigstens können wir nicht beliebig weit hinausschieben. Ohne Anfang ist die Zeit belanglos.* Denken wir uns eine mittlere Geschwindigkeit der betreffenden Bewegung von 1 zehnmillionstel Millimeter in der Sekunde, so ergäbe dies einen Fortschritt von etwa 3 mm in einem Jahr. Wahrscheinlich sind derartige Bewegungen mit einer Beschleunigung, wenigstens anfangs behaftet. Aktive Reibung sucht eine gleichförmige Geschwindigkeit herbeizuführen, Verstauchung des Materials wirkt verzögernd. Bei einer Verzögerung der Geschwindigkeit entsteht *dynamischer Druck*, es kann selbst Stillstand, *Gleichgewicht*, eintreten. Wenn wir Körper einer langandauernden Einwirkung äusserer Kraft unterwerfen, so zeigen sie eine geringere Bruchfestigkeit, als wenn wir den Bruch durch schnell wirkende Kräfte herbeiführen¹⁾. Dies setzt aber eine von Anfang an einsetzende Bewegung einzelner Massenteilchen voraus. *Wo hingegen die äusseren Kräfte nicht hinreichen, das zwischen den Massenteilchen herrschende Gleichgewicht zu stören, da hat die Zeit keinen Einfluss.* Das ist selbstverständlich wie noch vieles, darf jedoch nicht unerwähnt bleiben.

An dieser Stelle sei noch des Urteils des Geologen *Fr. Pfaff* Erwähnung getan:²⁾ „Was nun noch den Einfluss der Zeit anbelangt, so gilt für ihn ebenfalls derselbe Satz, d. h. auch die Zeitdauer ist gleichgültig für die Qualität der Reaktion. Oder mit andern Worten: eine Reaktion, die nicht in kurzer Zeit eintritt, wird auch in der längsten Zeit nicht hervorgerufen. Wir dürfen z. B. Blei Jahrhunderte lang einer Temperatur von 100° aussetzen, es wird nicht schmelzen, und eine Granitplatte Jahrtausende einem Druck von einigen hundert Atmosphären, sie wird nicht zerbrechen.“

Das ist doch vernünftig und war es schon vor 32 Jahren so gut wie heute!

B. Praktische Erwägungen.

Im vorstehenden werden die Eigenschaften des Gesteins theoretisch untersucht und dasjenige, was wir über dessen *tatsächliches Verhalten* Druckkräften gegenüber wissen können, kurz zusammengefasst. Die Eigenschaften der Materie lassen erkennen, dass die Ingenieure zu dem Schluss vollständig berechtigt sind, „dass in den meisten Fällen das überlagernde Gebirge Kohäsion und Reibung genug besitzt, um als gewaltige Deckplatte die kleine Tunnelöffnung zu überbrücken . . .“³⁾ Es ist unmöglich, hier

¹⁾ *C. Bach*, Seite 77 und 129; *A. Heim*, Mechanismus der Alpenbildung II. Teil, Seite 87.

²⁾ *Fr. Pfaff*, »Einige Bemerkungen zu Herrn Heims Aufsatz zum Mechanismus der Gebirgsbildung« Erlangen 1880.

³⁾ *Dr. F. Hennings*, »Lange Eisenbahntunnel etc.« Internationaler Eisenbahnkongress-Verband 625. 13. Bericht No. IV 1910, Seite 181.

auf die verschiedenen Druckerscheinungen im Tunnel einzugehen; an einschlägiger Literatur fehlt es nicht. Diese Erscheinungen müssen alle vom gleichen Gesichtspunkte aus beurteilt werden. Im nachstehenden soll im Grundsatz gezeigt werden, auf welche Weise die Druckkräfte von der Tunnelöffnung abgelenkt werden und was wir uns dabei vorzustellen haben.

1. Messungen des Getreidedruckes gegen Silowandungen.

Sehr lehrreich ist die Beobachtung, dass bei der Entleerung eines Getreidesilos der Seitendruck im Vergleich zum geschlossenen Zustand auf das *fünffache* ansteigt!¹⁾ Das erklärt sich aus einer Art *Gewölbebildung* im Material, das nur durch die Reibung zusammengehalten wird. An den glatten Wänden sinkt die Getreidesäule nach. Wären die Wände rauh oder abgetrept, sodass die Körner-Gewölbe ein Widerlager finden könnten, so würden die Körner nur langsam abfallen und zwar unter „Glockenbildung“. Durch leichtes Andrücken mit einem aufgespannten Schirm könnte man das „Abbrocken“ der Getreidekörner verhindern und die ganze Getreidesäule im Gleichgewicht halten. Analoge Verhältnisse finden sich vielfach im Stollen. Einen Stollen, der keine Verkleidung erhalten hat, kann man „in üblicher Weise mit Holz sichern, wie man auch in Bergwerken jahrzehntelang Stollen sichert“²⁾.

2. Druckverteilung in den Stollenwänden.

Nach dem Ausbruch eines Stollens kann sich das Gestein, das bis dahin unter allseitigem Einschluss gestanden, an der Peripherie des Stollens elastisch ausdehnen, darum überwiegt dort die Vertikalspannung unter dem direkten Einfluss der Schwerkraft. Die Decke wird durch eine Art *Gewölbebildung* gehalten. In ähnlicher Weise kann sich an der Sohle ein umgekehrtes Gewölbe bilden. Abbildung 1 zeigt, wie der vereinigte Gewölbeschub den Druck von den Ulmen fernhalten kann.

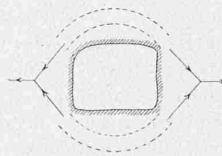


Abb. 1.

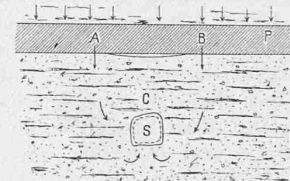


Abb. 2.

Eine ziemlich senkrecht, quer im Stollen verlaufende Schichtung begünstigt die Gewölbebildung, während eine horizontale Schichtung dieselbe erschwert. Von der Decke lösen sich im letztern Falle Platten und die Ulmen zeigen Druckerscheinungen, weil zwischen den Platten die Herbeiführung eines Druckgefälles ebenfalls erschwert wird. Zwischen diesen beiden Grenzfällen gibt es viele Abstufungen, die sich demgemäss verhalten. Fassen wir hingegen die Decke als tragende Platte auf, welche die Last auf die Ulmen, *wie auf Säulen absetzt*, so wird doch der grössere Teil der Last von den innerhalb liegenden Partien übernommen, weil die an der Peripherie liegenden Teile ausweichen können, während jene wegen der Vorlagerung daran verhindert werden. (Unvollkommener Einschluss, siehe Abschnitt A, 1).

Selbst in rein figürlichem Sinn bleibt es wahr, dass wenn eine Last von einer Anzahl von Elementen übernommen werden muss und nun einzelne der Beanspruchung ausweichen, dass dann die andern um so stärker belastet werden. Im übrigen verweise ich auf Abb. 5 und 6 meines frühern Aufsatzes in der Schw. Bztg., Bd. LIII, S. 164 und 165. Es wurde damals homogenes Material vorausgesetzt. In *nicht* homogenem Material wird die Figur entsprechend

¹⁾ *Prante*, »Messungen des Getreidedruckes gegen Silowandungen Z. V. D. J. 1896, Seite 1122.

²⁾ *Bergmeister Müller*, »Gutachten über den Stand des Stollens II (Simplontunnel)« 1907, Seite 13.

unregelmässig. Die Ablenkung der „Kraftlinie“ ändert sich natürlich je nach den Richtungen verschiedener Kohäsion und Reibung, die dem in Frage kommenden Gebirge eigentümlich sind.

3. Der erweiterte Hohlraum.

Namentlich im geschichteten, von Falten durchzogenen Gestein kann sich, indem Material in den Stollen hineingedrängt wird, ein Körper um diesen herum vom Gebirge abtrennen. Die Druckverteilung im abgelösten Kern ist rein lokaler Natur, während sie in den Wandungen des erweiterten Hohlraums sich ähnlich gestalten, wie dies vorhin gezeigt wurde.

4. Einfluss der Schichtenfaltung.

Unter dem Schutz des Gewölbes einer Faltung zeigen sich in der Regel geringere Druckercheinungen im Stollen als wenn er in einem Schenkel der Falte verläuft. „Die entlastende Wirkung einer Falte geht im Lauf der Zeit nicht verloren“¹⁾, weil sich um dieselbe ein dauerndes Druckgefälle einstellt. Bei flachen Gewölben wird die entlastende Wirkung, namentlich in Bezug auf das ungestörte Gleichgewicht des Gebirges überschätzt. Brandau hat früher schon auf diesen Umstand hingewiesen. Es würden so grosse Gewölbespannungen eintreten, dass eine Querdehnung gegen die Unterlage entstehen müsste, was eine gleichmässige Druckverteilung, Entlastung des Gewölbes und wiederum eine Verminderung der tangentialen Kräfte herbeiführen müsste. Und auf welche Weise soll der grosse Ueberdruck in den „Widerlagern“ des Gewölbes vom Gebirge übernommen werden? Wenn durch das Auffahren eines Stollens das Gleichgewicht gestört wird, so findet der Ueberdruck im Gewölbe eher eine „Vertragung“ als in einem Schenkel. Ob man sich nun die Druckvermehrung oder -Verminderung so oder anders vorstellt, d. h. schon vor dem Ausbruch des Hohlraumes oder nachher, die Wirkung bleibt dieselbe.

5. Wie beispielsweise eine tragende Platte wirken kann.

Eine solche decke ein Gebirge von geringer Kohäsion ab. Darin werde ein Stollen getrieben (Abb. 2). An der Trennungsfläche *AB* war anfänglich gleichförmig verteilter Gebirgsdruck. Durch das Auffahren des Stollens *S* schiebe sich das Material etwas in diesen hinein. Dadurch bildet sich über dem Stollen eine kleine Einsenkung. Um die Punkte *A* und *B* herum entsteht nun ein Ueberdruck, im Punkt *C* eine Depression. Je nach der Beschaffenheit des Materials kann der Vorgang direkt einen Auftrieb der Sohle des Stollens hervorrufen. Man vergegenwärtige sich nun die Wirkung der Platte, wenn man sie um die horizontale Lage in verschiedenen Neigungen gedreht denkt.

6. Eigenschaften des Materials, welche die Sicherung des Hohlraumes erleichtern oder erschweren.

Abgesehen von den Eigentümlichkeiten des Gebirgsbaues wird die Arbeit des Tunnelbaues einerseits erleichtert durch die Kohäsion, innere Reibung, strengplastisches Verhalten des Gesteins, Förderung des Einschlusses (Verkeilung), andererseits erschwert durch den Mangel an Kohäsion (Teilung, Zerklüftung), geringe Reibung, wie sie sich beispielsweise im Phyllitschiefer im Simplontunnel zeigte oder verursacht durch vorgezeichnete Rutschflächen, Wassergehalt und leichtplastisches Verhalten des Materials. Im ersten Fall nennen wir das Gebirge standfest: der Hohlraum erhält sich ohne oder mit leichtem Einbau, oft auch ohne Ausmauerung. Im zweiten Fall hat man grosse Mühe, ein stabiles Druckgefälle herzustellen.

7. Gleichgewichtszustand.

Das ist, was wir anstreben müssen. In der Tat beobachten wir, dass durch geeignete Massnahmen druckhaftes Gebirge zur Ruhe kommt (Setzen des Gebirges) und zwar so gründlich, dass „schwere“ Partien absolut keine Veränderung mehr zeigen. Sehr lehrreich ist das nunmehrige Verhalten der Ausmauerung in der bekannten Druckpartie

im Simplontunnel, Südseite.¹⁾ „Die in regelmässigen Perioden bis Ende 1905 vorgenommenen Messungen liessen nicht die geringste Formänderung erkennen.“ Ich bin selbst der Meinung, dass sich beim Ausbau des zweiten Simplontunnels in jener Zone die gleich schweren Druckercheinungen nicht wieder einstellen werden.

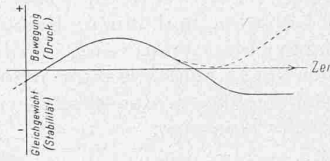


Abb. 3.

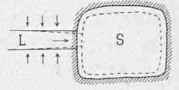


Abb. 4.

Der Vorgang des „Druckhaftwerdens“ und des „Wiederzur-Ruhekommens“ werde in Abbildung 3 durch ein Diagramm veranschaulicht. Die Abszissen bedeuten die Zeit, die positiven Ordinaten Druck und Bewegung, Ordinaten gleich Null seien labiles Gleichgewicht, die negativen Ordinaten bedeuten hingegen stabiles Gleichgewicht, sie seien proportional mit dem Kraftaufwand, der nötig wäre, um das labile Gleichgewicht wieder herzustellen. Wenn die Herbeiführung des labilen Gleichgewichtes für „Ruhe“ genommen und nichts weiteres erreicht wird, so kann unter Umständen die Bewegung später wieder einsetzen. Das werde dargestellt durch den punktierten Teil der Kurve.

8. Mathematische und zeichnerische Bestimmung des Gebirgsdruckes.

Bis jetzt hat jeder Versuch, den auf die Tunnelmauerung, Gewölbe, Ulmen, Sohle fallenden Anteil des Gebirgsdruckes rechnerisch zu bestimmen, versagt, weil er einerseits von sehr vielen wechselnden Umständen abhängig ist, deren Einfluss wir höchstens abschätzen können und weil wir über das wahre Wesen des Gebirgsdruckes noch ziemlich im Unklaren sind. Da hilft die Mathematik einstweilen nicht durch; denn sie antwortet wohl auf die Fragen: „wieviel und wie“, nicht aber auf die Frage: *was?* Es hat auch keinen Zweck, die mathematische Sprache reden zu wollen, solange man nicht weiss, was man sagen soll.

Wirkt der Gebirgsdruck im allgemeinen wie eine Stützmauer? Nein. Wo sich wegen Einschluss keine Gleitfläche ausbilden kann, hat es keinen Sinn, eine solche anzunehmen. — *Lässt sich der Firstdruck allgemein ausdrücken durch das Gewicht eines Körpers von parabolischem Querschnitt?* Beim Ausbau des zweiten Simplontunnels wird man wohl vergeblich nach solchen Glocken fahnden, die über dem Stollen hängen geblieben sind. Solange eine solche Glocke dem Hängenden angehört, also hauptsächlich durch die Kohäsion, d. h. *innere Kräfte* längs ihrer ideellen Umgrenzung gehalten wird, drückt sie nicht. — *Wo es sich um innere Reibung handelt, da hat der Ausdruck Reibungswinkel keinen Sinn.* — *Elastische Formänderung und Aufspeicherung von mechanischer Arbeit durch elastische Zusammenpressung* findet nur statt, wo die Massenteilchen seitlich ausweichen können, unter Einschluss nicht. — *Ist es etwa das Gewicht einer bis an die Oberfläche reichenden Säule, die auf den Tunnel drückt?* Unter solchen Umständen liessen wir das Tunnelbauen hübsch bleiben. — *Ist es angängig, unter dynamischem Druck sich etwas undefinierbares vorzustellen, während es doch nichts anderes sein kann als die Wirkung der Verzögerung einer Geschwindigkeit, die Umsetzung von Geschwindigkeit in Druck?* Vorerst müssen wir unsere Einsicht in das Wesen der Materie durch geeignete Laboratoriums-Versuche und durch kritische Beobachtungen während des Tunnelbaues vertiefen. Es wird aber nie gelingen, eine für alle Fälle gültige Formel aufzustellen. Die ganze Frage löst sich in viele Einzelprobleme auf.

Bei der Behandlung schwieriger Fälle tun wir immer noch am besten, wenn wir die geologischen Verhältnisse der in Frage kommenden Zone so genau als möglich aufzeichnen

¹⁾ Dr. Konrad Pressel, „Die Bauarbeiten am Simplontunnel“, Schweiz. Bauztg. 1906, Bd. XLVII, S. 304 (auch als Sonderabdruck).

¹⁾ E. von Willmann, Seite 26.

und überlegen, wie die Kräfte verlaufen könnten, ob abgetrennte Felsmassen auf das Ganze drücken, nach welcher Seite hin eine Vertragung des Gebirgsdruckes am leichtesten stattfinden kann. Auch werden wir nicht unterlassen, das Verhalten des Einbaues genau zu beobachten. Daraufhin machen wir für eine allfällige statische Untersuchung Annahmen über die Belastung der Ausmauerung, immer in der Voraussetzung, dass nun die so gefundenen Dimensionen den wirklich auftretenden Kräften standhalten.

C. Die Schutzhülle.

Wir machen beim Tunnelbau die Beobachtung, dass an den Wandungen des Hohlraumes keine oder nur schwache Druckäusserungen auftreten, die trotz Bergschlägen und stellenweise auftretendem Auftrieb der Sohle in gar keinem Verhältnisse zu der Grösse des Ueberlagerungsdruckes stehen, der, wenn er tatsächlich vorhanden wäre, viel deutlicher zum Ausdruck käme. Von einer „Ueber-raschung des Gebirges“ kann keine Rede sein. Den Gründen für das *Ausbleiben* des Gebirgsdruckes aber nachzuforschen, scheint mir eine sehr ernste Angelegenheit zu sein. Es bleibt nur die eine Erklärung für dieses Verhalten übrig, nämlich dass der Ueberlagerungsdruck die Bildung einer Art Schutzhülle bewirke, in der nach allen Richtungen ein Druckgefälle entsteht, das den Gebirgsdruck zum grossen Teil vom Hohlraum fernhält. Darauf habe ich im vorhergehenden Abschnitt hingewiesen. Es gibt aber eine grundsätzliche, alles frühere deckende Erklärung für die Entstehung einer Schutzhülle. Dies soll in nachstehendem entwickelt werden.

Ein Probezylinder, der durch Druck eine elastische¹⁾ Verkürzung erfährt, zeigt zu gleicher Zeit eine Querausdehnung. Wird letzteres durch Einschluss verhindert, so kann auch keine Zusammendrückung stattfinden. Wenn es zu einer Schliessung der kleinsten Poren kommen soll, so müssen Molekularkräfte, die einer ganz andern Grössenordnung angehören, hinzutreten. Daraus folgt, dass ein Gestein im Erdinnern durch den Gebirgsdruck nicht wesentlich komprimiert wird. Durch sog. Bergschläge abgesprengte Platten dehnen sich zwar aus: sie passen nicht mehr in das frühere Lager hinein. Dafür lässt sich eine Erklärung finden, die zugleich der Schlüssel zur Lösung der ganzen Frage ist.

Der Einfachheit halber werde der Vorgang an homogenem Gestein gezeigt. Eine Lamelle *L* (Abbildung 4) befindet sich unter dem Einfluss der Gebirgsspannung. Nun werde der Stollen *S* vorgetrieben. Gegen diesen hin wird der Einschluss unterbrochen; erst jetzt tritt eine Formänderung ein, es kann sich die Lamelle in der Richtung gegen den Stollen hin ausdehnen; sie wird aber gleichzeitig zusammengedrückt. Die Massenteilchen weichen seitlich aus und die Spannung nimmt ab in der Weise, wie sich Dr. Nowak ausdrückt²⁾: „Es wird daher mit jedem Bruchteil eines Millimeters, den die Gebirgsmasse vordringt, die Stärke des ausgeübten Druckes abnehmen.“ *Dadurch entsteht ein Druckgefälle, das den Stollen entlastet.* Ob nun beim Gebirgsdruck die vertikale Komponente überwiege oder nicht, *wir erhalten eine das ganze Stollenprofil umschliessende Schutzhülle. Der Tunnelbauer hat also gar nicht die Aufgabe, den Hohlraum gegen Ueberlagerungsdruck abzustützen, das bewirkt die Schutzhülle, sondern er muss nur um deren Erhaltung besorgt sein.* Gleich wie wir in einem reissenden Wasserlauf durch Einziehen von Grundswellen das Gefälle stabilisieren, so mässigen und erhalten wir das Druckgefälle, das den Tunnel umschliesst durch Einbau und Ausmauerung. So wurde es immer gehalten und wird auch in Zukunft gemacht werden. Ob dabei ein Sohlen-gewölbe nötig wird, das richtet sich zunächst nach der Natur des Gebirges. Wir dürfen behaupten: *Kein Tunnel, bezw. dessen Verkleidung, steht unter dem vollen Ueberlagerungsdruck.*

¹⁾ Auch andere als nur elastische Formänderung kann auftreten, aber diese zuerst.

²⁾ Dr. tech. Aug. Nowak, „Aeusere Kräfte einer Tunnelröhre“, aus Empergers Handbuch für Betonbau, Band 7, Seite 218.

Die Schutzhülle hat keine scharfe Begrenzung. Das Druckgefälle geht allmählich in die normale Gebirgsspannung über. Im homogenen Gestein hat jene eine regelmässige Form, in nicht homogenen zeigt der Querschnitt eine unregelmässige Figur, bei deren Ausbildung all das in Frage kommen kann, was mit den Ausdrücken Ver-spannung, Verstauchung, Verkeilung, Gewölbekonstruktion, tragende Platten, Ueberbrückung, seitliche Vertragung usw. gemeint ist. Es kann dabei Bewegung, Druck (auch dynamischer Druck) entstehen. „Das Fernhalten grossen Druckes“ besteht darin, dass man beizeiten die oben genannten Grundswellen (gemeint ist die Ausmauerung) in das übergrosse Druckgefälle einzieht. Bei einem Zwillingstunnel wie der Simplon, fliessen die beiden Schutzhüllen in eine zusammen. *Unter diesem Gesichtspunkt käme dem Abstand der beiden Tunnel nicht die Bedeutung zu, wie sonst angenommen wird.*

Die Schutzhülle entsteht automatisch infolge des Ueberlagerungsdruckes: *nimmt dieser zu, so wird auch jene grösser;* denn das Druckgefälle (nach dem Gebirg hin Steigung) ist wesentlich von der Natur des Gesteines abhängig. Die gegebene Steigung durchläuft einen grösseren Weg, um auf ein höheres Niveau zu gelangen! *Auch in sehr grossen Tiefen ist die Erhaltung eines Tunnels möglich.* Ob nun zwischen Ueberlagerungsdruck und Grösse der Schutzhülle *Proportionalität* besteht oder nur eine Art *Korrelation*, wage ich nicht zu entscheiden. Auf alle Fälle merkt der Tunnelbauer in der Schutzhülle drin wenig, meistens „kann er davon keine Spur erspähen“, wie Brandau sich ausdrückt. Er trifft darin seine Massnahmen mit „praktischem Blick“, d. h. nach Analogieschlüssen, die er aus den an der Oberfläche der Erde oder in andern Tunnels gesammelten Erfahrungen zieht, indem er alle Aeusserungen des Gebirgsdruckes als lokale Erscheinungen, die von der Natur des Gebirges abhängen, auffasst.

Die Korrelation wäre erwiesen, wenn das genau gleiche Gestein unter einer grossen Ueberlagerung sich anders verhielte, als unter einer geringeren. Solche Vergleiche sind schwer durchzuführen. *Nur soviel ist gewiss, dass die Grösse der Ueberlagerung keine Voraussage über das zu erwartende Verhalten des Gesteins zulässt.* Professor C. Schmidt glaubte indessen, eine solche Korrelation zwischen Druck und Ueberlagerung im Simplontunnel konstatieren zu können.¹⁾ Das Auftreten von Bergschlägen scheint mir kein sicheres Merkmal zu sein. Es gibt Autoren, die Korrelation zugeben, z. B. E. v. Willmann; ohne zwar den Ausdruck zu gebrauchen, greift er das von Brandau beschriebene Verhalten eines gewissen Gesteins im Simplontunnel, „das seinen wahren Charakter vollkommen verkennen liess“, heraus und sieht darin ein ungewöhnliches Verhalten.²⁾ Wir wollen also diese Frage offen lassen.

* * *

Zum Schluss sei noch die Bemerkung gestattet, dass ich nicht in der Lage bin, etwas von meinen frühern Ansichten zurückzunehmen. Was ich hier in extenso entwickelte, steht zum grossen Teil schon in nuce in meinem Aufsatz vom Jahr 1909. Eine logische Durchdringung des Stoffes kann dem Tunnelbau nur förderlich sein. Hoffentlich ist es mir gelungen, durch einzelne Streiflichter die Frage etwas aufzuhellen.

Neuere Bauten

von Architekt Hans Bernoulli, Basel.

IV. Geschäftshaus Fischbein & Mendel in Berlin.

(Mit Tafeln 23 bis 26.)

Als letztes Beispiel aus Bernoullis Berliner Wirksamkeit zeigen wir hier einige Bilder des von ihm für die Konfektionsfirma Fischbein & Mendel an der Lindenstrasse in Berlin auf einer Grundfläche von 40 × 70 m erbauten

¹⁾ C. Schmidt, „Untersuchungen über die Standfestigkeit der Gesteine im Simplontunnel.“

²⁾ E. v. Willmann, Seite 11.