

Der Einfluss des Gebirgsdrucks auf einen tief im Erdinnern liegenden Tunnel

Autor(en): **Brandau, Karl**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

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

Heft 21

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-29987>

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: Der Einfluss des Gebirgsdrucks auf einen tief im Erdinnern liegenden Tunnel. — Wettbewerb für ein Gebäude der Ecole de Commerce in Lausanne. — † Adolf Tüche. — Miscellanea: Genfer Bahnhof-Angelegenheit. Grenchenbergtunnel. Lötschbergtunnel. Nationaldenkmal in Schwyz. Schweiz. Landesmuseum. Technische Einheit im Eisenbahnwesen. Beseitigung von Niveauübergängen. Baulinienplan beim Zeitglockenturm in Bern. Neue Kunsthalle in Bern. Eidg. Techn. Hochschule. Die

XXXII. Generalversammlung der G. e. P. Verein schweiz. Maler, Bildhauer und Architekten. Eidg. Landeshydrographie. — Konkurrenzen: Bebauungsplan für das Gebiet zwischen Obersee und Maran in Arosa. Schulgebäude in Arlesheim. — Korrespondenz. — Literatur. — Vereinsnachrichten: Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein. Gesellschaft ehemaliger Studierender: Stellenvermittlung.
Tafel 62: Architekt Adolf Tüche.

Band 59.

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

Nr. 21.

Der Einfluss des Gebirgsdrucks auf einen tief im Erdinnern liegenden Tunnel.

Von Ing. Karl Brandau in Cassel.¹⁾

I.

Anschaung, Erfahrung und Theorie von den Druckkräften innerhalb der festen Erdrinde.

In den zahlreichen Programmen, technischen Gutachten und Propagandaschriften für die Projekte bedeutender Tunnelbauten des vorigen Jahrhunderts finden wir keine Erörterungen der Frage, ob mit zunehmender Tiefenlage der Druck der Tunnelüberlagerung, der nahe der Erdoberfläche in manchen Fällen schon ansehnliche Schwierigkeiten bereitet hatte, stärker anwachsen werde. Wir weisen beispielsweise auf die „technischen und ökonomischen Ueberlegungen über die Durchtunnellung der Alpen“ vom Jahre 1858 des italienischen Ing. *Grandis*²⁾. Ferner auf die Gutachten des Ing. *Colladon*³⁾ vom Jahre 1880 zu den Projekten der Tunnel unter dem Simplon und Mont Blanc.

Zu solchen Erörterungen gab es in jener Zeit keine Veranlassung. Man glaubte allgemein aus Erfahrung und Ueberlegung zu wissen, dass im Erdinnern der Druck der überlagernden Gebirgsmassen nicht auf den Tunnel falle. Und man erklärte sich den Vorgang bei der Druckverlegung als analog mit der sich über Gängen im Sande und im lockeren Erdreich bekanntermassen vollziehenden Verstauchung und Verspannung in den über der First befindlichen Massen.

Dementsprechend hatten die Techniker keine Sicherungen gegen Aeusserungen eines höheren Gebirgsdrucks notwendig gefunden. Jedoch haben sie schon stets die Notwendigkeit erkannt, dass durch sachgemässen Arbeitsvorgang die Beunruhigung des Gebirges und damit das Auftreten von Druckerscheinungen verhindert werden muss. In diesem Sinne bezeichnete es *Rziha* als die erste Aufgabe des Technikers, grosse Druckkräfte fernzuhalten. Also auch er erkennt es nicht als eine vorliegende Aufgabe, den Tunnel gegen einen unter allen Umständen zu erwartenden Gebirgsdruck zu sichern. Bis heute hat der Techniker einen im allgemeinen gleichen Standpunkt beibehalten.

Aber die Frage, *wie* sich die Gebirgslast im Erdinnern verteilt, die sich unabweislich immer wieder aufwarf, war lange Zeit unbeantwortet geblieben. Die Theorien vom Erddruck blieben für die Lösung des Problems ungenügend. Im Jahre 1866 spricht sich Prof. *Cullmann* darüber aus und findet, dass seine Erddrucktheorie wenig im Einklang mit der Wirklichkeit steht und wenig entwickelt ist.

Den Beginn einer klareren Erkenntnis bezeichnet eine Aeusserung des Prof. *W. Ritter* in seiner „Statik der Tunnelgewölbe“ vom Jahre 1879, indem er dort sagt:

„Die im bisherigen abgeleiteten Erddruckbestimmungen haben nur dann Gültigkeit, wenn wir uns in der Nähe der Erdoberfläche befinden, oder genauer ge-

sagt, wenn irgend eine Bewegung des Tunnelmauerwerks auch eine Bewegung des ganzen darüber liegenden Berges nach sich zieht. Dringen wir aber tiefer in die Erde ein, so gestalten sich die Verhältnisse wesentlich anders; wir erreichen eine Tiefe, in welcher die Höhe der darüber befindlichen Erdmasse keinen oder doch nur noch einen unbedeutenden Einfluss auf den Erddruck ausübt . . .“

Von hier bis zur Theorie *Engessers* vom Jahre 1882¹⁾ über die Grösse des Firstdrucks war es nur ein Schritt. Engesser ging davon aus, dass durch den Druck des die Stollenfirst belastenden Erdmaterials eine Senkung derselben entsteht und sich über ihr ein natürliches Gewölbe erzeugt. Daraus folgert er, dass der Firstdruck lediglich durch das Gewicht des zwischen Stollenfirst und dem sich gebildeten Entlastungsgewölbe drucklos verbleibenden Körpers bedingt wird. Die Richtigkeit der auf dieser Grundlage aufgebauten Formeln hat Engesser durch Versuche, prinzipiell wenigstens, bestätigt. Das Verhalten von Getreide in den Silos, in denen der Druck auf die Sohle *nicht* der Höhe der Getreidesäule entspricht, ist bedingt durch eben dieselben Umstände. Aus dieser Theorie ergibt sich unmittelbar die Tatsache der seitlichen Ablenkung der Schwerkraft vom Stollen weg.

Durch die vom Geologen Prof. *A. Heim* im Jahre 1878 veröffentlichte Lehre vom Gebirgsdruck gelangte eine erwünschte Klärung in die Anschauungen über die allgemeinen Wirkungen der Schwere der Gebirgsüberlastung in der Tiefe des Erdinnern. Kurz zusammengefasst ist der Inhalt der Lehre mit Bezug auf die hier besonders interessierenden Fragen folgender:

Der Gebirgsdruck ist gleich dem Gewicht des über jedem Horizont des Erdinnern lagernden Gesteinskörpers. Wo in grossen Tiefen dieser Druck sehr gross wird, nimmt er sprödem Material seine Brüchigkeit und gibt ihm dafür Verschiebbarkeit seiner Teilchen. Der Unterschied vom hydraulischen Druck besteht nur darin, dass hier im Gebirge Störungen des Gleichgewichts einen bedeutenden Grad erreichen müssen, um Bewegungen zu erzeugen, und dass die folgenden, wieder ausgleichenden Bewegungen sehr langsam vor sich gehen, weil sie starke Kohäsionskräfte und innere Reibungen auf gewissen Wegen überwinden, also eine mechanische Leistung ausüben müssen.

Heim hatte zugleich mit dieser Lehre ihre Konsequenzen auf ein Tunnelbauwerk erörtert, wovon wir einen kurzen Auszug geben:

Sobald man mit einem Tunnel in gewisse Tiefen gelangt oder sehr wenig festes Gebirge antrifft, so ist vollkommene Tunnelmauerung mit Sohlengewölbe erforderlich. Wo der Gebirgsdruck grösser wird als die Festigkeit der Gewölbsteine, kann auch der vollständig ausgewölbte Tunnel nicht auf die Dauer halten. Ueberlassen wir den Tunnel längere Zeit sich selbst, so werden die Felsen gegen die Höhlung in harten Blöcken hereinbrechen, bis der Tunnel damit gefüllt wird. Das Gefüge des Felsens lockert sich in einer grossen Entfernung von der Tunnelaxe, mehr nach oben, wenn der Tunnel nicht sehr tief liegt.

Daher muss ein jedes Tunnelgewölbe so „druckfest“ konstruiert werden, dass es die ganze Last der überlagernden Gesteinsäule zu tragen vermag. Bei festem Granit ist in einer Tiefe von weniger als 500 m Sohlengewölbe vielleicht noch nicht erforderlich.

¹⁾ *Engesser*: «Ueber den Erddruck gegen innere Stützwände» «Deutsche Bztg.», 1882. S. 91.

¹⁾ Noch ehe die von uns in Nr. 11 (S. 154) lfd. Bd. angekündigte Entgegnung *Wiesmanns* auf die Ausführungen von Prof. *Alb. Heim* in Nr. 8 (S. 107) eingetroffen, haben wir zum gleichen Gegenstand diese Aeusserung von Herrn *Brandau* erhalten. Die Entgegnung des Herrn *Wiesmann* wird demnächst folgen.
Redaktion.

²⁾ *Seb. Grandis*: «Considerazioni Techniche ed Economiche sul Traforo delle Alpi». Geschrieben 1858. Gedruckt 1895 bei Carlo Guadini in Torino.

³⁾ Ing. *Colladon*: «Notes sur les inconvenients et les difficultés du Tunnel étudié sous le Mont Blanc». Avantages incontestables d'un chemin de fer international par le Simplon.

«Seconde Notice sur la question: Simplon ou Mont Blanc». Genf, Imp. Charles Schuchardt, 1880.

Der gesamte Gebirgsdruck muss unfehlbar je nach der Art des Gebirges nach Verlauf von 10, 20, 50 oder 100 Jahren in seiner ganzen Stärke das Tunnelbauwerk treffen und es dann, falls es nicht vollkommen „druckfest“ hergestellt worden ist, zerdrücken.

Der durchschnittliche Druck im Gotthardtunnel beispielsweise entspreche auf etwa 10 km Länge einer Last von 1000 bis 1500 m Höhe Gneiss-Granit. Zur Gewölbe-mauerung genüge somit der in Verwendung gekommene Gneiss-Granit vollständig, während Kalkstein nicht genügt haben würde.¹⁾

Die Haltbarkeit eines Tunnels, der durchschnittlich 2500 m tief unter einer ganz breiten, beiderseitig höher ansteigenden Gesteinsmasse liegt, ist überhaupt zweifelhaft.

Diese Folgerungen Heims aus seiner Gebirgsdrucklehre sind es, die den entschiedensten Widerspruch hervorgerufen haben, schon deshalb, weil ihnen die Erfahrungen in den Tiefen, in denen Bergleute und Ingenieure überhaupt zu arbeiten haben, entgegenstehen. Der Geologe C. Schmidt glaubte dennoch im Jahre 1906 in einer Begutachtung der Standfestigkeit der Gesteine im Simplontunnel bestätigen zu müssen, dass es nahe läge, die Art der Gesteinsdeformationen in einem tiefliegenden Tunnel in Korrelation zu setzen zur Mächtigkeit des überlagernden Gebirges; letztere, so folgert Schmidt aus den Beobachtungen, sei tatsächlich ein bedeutender Faktor für die Art der Standfestigkeit der Gesteine an Ulmen, Sohle und First des Simplontunnels.

Nachdem Heim in einer Reihe von Veröffentlichungen im Laufe der letzten 15 bis 20 Jahre alle diejenigen Deutungen bekämpft hatte, welche die Wirkung des Gebirgsdrucks auf ein Tunnelbauwerk in den Tiefen, auf die menschliche Arbeitstätigkeit aus andern Gründen beschränkt bleibt, wesentlich anders beurteilen lassen, als die von ihm herrührenden Schlussfolgerungen, hat Ing. E. Wiesmann²⁾ im Jahre 1909 einen Beitrag „zur Frage der Gebirgs- und Gesteinsfestigkeit“ veröffentlicht, der für die Klarstellung der praktischen Seite der Frage als glücklich und förderlich bezeichnet werden kann.

Ausgehend von den Ergebnissen der Festigkeitslehre stellte er in erster Linie fest, dass ein im Erdinnern allseitig umschlossenes Gestein weitaus grössere Pressungen bis zum Ausweichen seiner Teilchen und zur Ueberwindung der Kohäsion zu ertragen vermag, als ein in einer gewöhnlichen Festigkeitsprüfungs-Maschine eingespannter Würfel aus demselben Gestein. Allseitiger, dem hydrostatischen ähnlicher Druck werde im Erdinnern erst in ansehnlich grösserer Tiefe entstehen, als in dem von Heim bezifferten, auf Grund von Festigkeitswerten, die bisher nur relativ als solche gelten konnten.

Es ist offenbar damit die eigentliche Heimsche Lehre in keiner Weise angetastet. Nur ihr Gültigkeitsbereich ist in eine tiefere Zone verwiesen und der Widerspruch mit den praktischen Erfahrungen im Tunnelbau beseitigt.

Da diese Feststellungen Wiesmanns zutreffend sind, so hat er auch recht, zweitens die theoretisch und praktisch erhärteten Regeln von der Druckverteilung in gepressten durchlochten Körpern, zur Erklärung des Verhaltens des Gebirgsdrucks in den für den Tunnelbau in Betracht kommenden Zonen des Erdinnern anzuwenden. Dementsprechend, so führt Wiesmann aus, muss um den hohlen Tunnelraum eine druckfreie Zone entstehen. Zwischen der neuen Lage der Kraftlinien und der Summe der Reaktionen der Massenteilchen wird sich ein Gleichgewichtszustand herstellen, so dass keine Tendenz vorhanden sein wird, den Hohlraum zu schliessen. Somit ergeben sich ohne weiteres die Um-

¹⁾ Es kann nichts anderes als ein Versehen Heims gewesen sein, den Gotthardtunnel unter den genannten Umständen und gemessen nach den Forderungen an einen «druckfesten» Tunnel in dieser Tiefe, als standfest zu bezeichnen. Diese Forderungen würden statt einer Gewölbstärke von 40 cm eine solche von 4 bis 6 m bedingen. Konsequenterweise müsste Heim schon jeden Tag den Zusammenbruch des Gotthardtunnels erwarten.

²⁾ E. Wiesmann, Ing.: «Ein Beitrag zur Frage der Gebirgs- und Gesteinsfestigkeit». «Schweiz. Bauzeitung», Bd. LIII, Nr. 13.

stände, die das Fernbleiben von Firstdruck in tiefliegenden Tunnels zur Folge haben.

Heims Erwiderungen¹⁾ vom Jahre 1912 gegen Wiesmanns Ausführungen schliessen mit einem ungewöhnlich grotesken Vorwurf gegen Alle, die je Tunnel gebaut haben und heute noch bauen:

„Es ist menschlich sehr begreiflich, dass man sich gegen eine Erkenntnis sträubt, die bei allen Projekten für tiefe Tunnels eine Kostenvermehrung von vielleicht 30 % ergäbe, deren Notwendigkeit aber in den ersten 20 bis 60 Jahren des Tunnelbestandes noch nicht deutlich fühlbar ist, sondern erst später unwiderstehlich und entsetzlich sich geltend machen wird. Es müssen offenbar der beweisenden bösen Erfahrungen erst noch mehr abgewartet werden.“

Nach unserer Ansicht hätten Wiesmanns Erklärungen in ihrer knappen Form genügen müssen, um zu beweisen, dass der Tunnelbauer nicht im Eigensinn und in frevelhafter Kurzsichtigkeit handelt, und dass die seit Jahren versuchte Beunruhigung der interessierten Kreise unberechtigt ist. Da das dennoch nicht der Fall war, so soll in den folgenden Absätzen noch ausführlicher von den positiven Ergebnissen der Festigkeitsuntersuchungen und von anderen unsere Erkenntnis vervollständigenden Forschungsergebnissen berichtet werden.

II.

Ueber die Verteilung der Gebirgslast in das den Tunnel umgebende Gebirge.

Wiesmann hatte sich ohne Angabe gewisser Ergebnisse der Festigkeitsforschungen, die er als bekannt voraussetzte, auf seine Erklärungen beschränkt. Heim urteilt zu diesen folgendermassen:

„Das was im Aufsatz des Herrn Wiesmann wirklich neu ist, das ist der rein spekulative Versuch, dazutun, dass der Tunnel die Gesteinsspannungen in seiner nächsten Umgebung aufhebe oder doch vermindere. Das hat er aber nicht zu beweisen und auch nicht begreiflich zu machen vermocht. Soweit meine Einsicht zu reichen vermag, ist das völlig irrtümlich und das Gegenteil trifft zu.“

Demgegenüber muss zunächst betont werden, dass die Gleichgewichtsstörungen, verursacht durch ein kreisrundes Loch, in einem gepressten, unendlich ausgedehnten und homogenen Material, theoretisch genau bekannt sind.²⁾

Darnach erhöhen sich an den Wandungen einer Höhlung die Spannungen. Unter Voraussetzung eines Materials, in dem lineare Beziehungen zwischen Dehnungen und Pressungen bestehen, bringt *lotrechte* Pressung die grösste Druckspannung in der Wand einer zylindrischen Höhlung gleich der dreifachen *lotrechten* Pressung hervor; an Sohle und Decke werden Zugspannungen hervorgerufen, deren Grössenwert der durchschnittlichen Druckspannung gleichkommt. Wirkt der Druck *allseitig* mit gleicher Stärke, so ist die grösste Spannung an den Wänden der Höhlung nur gleich der doppelten ursprünglichen. Dies Verhalten besagt, dass die Pressungen an den Lochwandungen sich vermehrt haben und dass die Pressungen über der Höhlung seitlich in das Material verlegt worden sind.

A. Leon und F. Willheim³⁾ haben Mitteilungen veröffentlicht über Druckversuche auf tunnelartig gelochte Gesteinskörper. Auf deren Versuchsergebnisse einzutreten, ist hier nicht der Platz, weil sie bisher nur in der Festig-

¹⁾ Dr. A. Heim, a. Prof.: «Zur Frage der Gebirgs- und Gesteinsfestigkeit». «Schweiz. Bauzeitung», Bd. LIX, Nr. 8.

²⁾ G. Kirsch: «Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre». «Ztschrft. d. Vereins deutscher Ing.». 1898. S. 798.

A. Leon: «Ueber die Störung der Spannungsverteilung durch Bohrungen und Bläschen». Mitteilungen aus dem mech. techn. Laboratorium der techn. Hochschule in Wien. «Oesterr. Wochenschrift f. d. öffentl. Baudienst», Heft 9, 1908.

³⁾ A. Leon und F. Willheim: «Ueber die Zerstörungen in tunnelartig gelochten Gesteinen». «Oesterr. Wochenschrift f. d. öffentl. Baudienst», Heft 34, 1910. II. Mitteilungen aus dem mech. techn. Laboratorium der techn. Hochschule in Wien.

keitsprüfungsmaschine, ohne Gegendruck an den Seitenwänden vorgenommen worden sind. Sie sind also nicht ohne weiteres auf den in Betracht stehenden Fall passend. Wir entnehmen dieser Arbeit aber die Ausführungen über die Anwendung der oben mitgeteilten theoretischen Sätze der Spannungsverteilung auch auf die Gesteine:

Es bestehen keine linearen Beziehungen. Dehnungen, bezw. Stauchungen nehmen rascher zu, als es einem linearen Zusammenhang mit den Spannungen entspricht. Daher werden die Spannungsstörungen nicht so gross sein können, wie die für elastisches Material, und umso mehr abgemindert, je näher die grösste Spannung an die Bruchgrenze des Materials heranreicht. Das heisst an den Wänden der Höhlung wird die Spannung noch nicht gleich der doppelten ursprünglichen. Abbildung 1 stellt die verschiedene Spannungserhöhung an den Wänden einer Oeffnung im Gestein bei verschieden starken Pressungen bildlich dar. Im homogenen Gestein erhöhen sich also die Spannungen; nach Eintritt etwaiger Beschädigungen des Gesteins an der Wandfläche wird aber der weiteren Stauchung geringerer Widerstand entgegengestellt; schliesslich wird die Verringerung der Spannungen unter die durchschnittliche Pressung eintreten. Wie sich dabei die Vertragung der Kräfte vollzieht, wurde im Aufsatz Wiesmanns anschaulich dargestellt. Der vordem über einer neu geschaffenen Höhlung lastende Druck verteilt sich im Gebirge um die Höhlung herum, mehr abseits, je weicher das Gestein ist oder je höher der Druck. Aehnlich setzt sich die Verteilung der Pressungen fort, wenn mit der Zeit an den Wänden durch Druck und Verwitterung weitere Zermürbung auftritt. In Abbildung 2 ist die Zone um die zylindrische Höhlung als zermürbt punktiert angedeutet. Die Druckverteilung, die anfänglich nach der Kurve *a* vor sich gegangen ist, geschieht nach Eintritt der Zermürbung nach Kurve *b* (vergl. Wiesmanns Abbildung 6 auf S. 165, Bd. LIII).

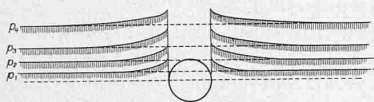


Abb. 1. Abminderung der Spannungsstörungen bei mit den Spannungen wachsenden Formänderungen.

(Nach A. Leon und F. Willheim.)

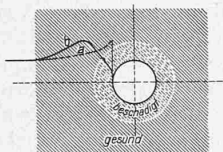


Abb. 2. Spannungsabfall durch beschädigtes oder zerdrücktes Material.

Einen weiteren Beitrag zur Erklärung der Vorgänge bei der Einrichtung des neuen Gleichgewichtszustandes nach der Herstellung einer Tunnelöffnung hat *E. v. Willmann*¹⁾ in seiner Doktordissertation im Jahre 1910 geliefert, aus der kurz folgendes mitgeteilt werden soll. *v. Willmann* weist darauf hin, dass bei Versuchen in der Festigkeitsmaschine Kräfte quer zur Pressungsrichtung im Probekörper entstehen. Nach Föppl ist für Gestein die zulässige Zugspannung — als eine solche sind die abschiebenden Pressungen aufzufassen — schon mit $\frac{1}{9}$ der Druckfestigkeit überschritten. An den ohne Gegendruck freistehenden Seitenflächen wirken die Zugspannungen abschiebend und rufen Abblättern des Materials hervor und den bekannten Vorgang des Zerfalles des Körpers gegen das Ende des Versuchs in pyramidenförmige Körper.

An den freigelegten Ulmen eines Stollens treten nun dieselben Erscheinungen des Abblätterns und Abknallens auf, wie an den Seiten der Probekörper. Weil das bald mehr, bald weniger elastische Gestein durch den Druck der Ueberlagerung Zusammenpressung erfahren hatte, dehnt es sich nach Freilegen der Wände seitlich, nach der Höhlung aus, so lange, bis das durch die Zusammenpressung

¹⁾ Reg.-Baumeister *E. v. Willmann*: «Ueber einige Gebirgsdruckerscheinungen in ihren Beziehungen zum Tunnelbau». Diss. zur Erl. der Doktorwürde. Leipzig, Wilhelm Engelmann. 1911.

aufgespeicherte einmalige Arbeitsvermögen verausgabt sein wird. Ausdehnung und geringe Resistenz der Gesteine gegen Zugspannung sind also im spröden Gestein die Ursachen der sogen. Bergschläge, im weichen des Ausweichens der Wände. *v. Willmann* hat zuerst die wahre Veranlassung für die Entstehung der Bergschläge nachgewiesen und begreiflich gemacht, warum im harten Gestein Bergschläge unter mässigen Ueberlagerungshöhen schon auftreten müssen, lange bevor die Widerstandsfähigkeit gegen Druck erschöpft ist.

Mit dem Fortfall des Gegendrucks dehnt sich aber auch das Gestein, das unter der Gebirgslast komprimiert worden ist, an der First nach unten elastisch aus; mangels einer Unterlage wird es unfähig, den darüber liegenden Druck ferner zu übertragen. Unter diesen Umständen vollzieht sich die Befreiung eines Gesteinskörpers über der First von der Einwirkung des Gebirgsdrucks in der Weise, wie sie von der Theorie Engessers erfasst worden ist (*a* in Abbildung 3).

Wie im lockeren Erdreich und im Getreide der Silos bildet sich ein, den Druck der Ueberlagerung seitlich verträgendes Gewölbe aus. Gegen die Wirkung der horizontalen Komponenten dieser Kräfte und gegen die dabei auftretenden Schubkräfte hat die Mauerwerksbekleidung Sicherung zu schaffen. In der Sohle sind die Vorgänge denen an der First ganz ähnlich. Jedoch wirkt das Eigengewicht des spannungslosen Körpers *b*, Abbildung 3, umgekehrt wie in der First.

Da nun aber an den neu gebildeten Wänden, um die Körper *a* und *b*, über First und unter der Sohle dieselben Schubkräfte arbeiten wie an den Ulmen, so ist daselbst der Vorgang der Ausdehnung des Gesteines ein ähnlicher. Er wird nur verzögert und ein allmählicherer, weil diese spannungslosen Körper zunächst noch fest eingeklemmt in ihrer Lage verharren; nach und nach lockern sie sich aber unter dem Ausdehnungsbestreben der seitlichen Wände, trennen sich in dünne Bänkchen und Schiefer, stauchen sich ineinander und knicken schliesslich gegen den Hohlraum aus. Einmal vollkommen gelockert, ist es nur noch ihr Gewicht, das in der First die verhältnismässig unbedeutenden Erscheinungen vom Firstdruck hervorbringt. Gesteinsablösungen in der First sind selten bergschlagähnlich und in der Sohle ist Bergschlag kaum beobachtet worden.

Die von *C. Schmidt* beobachtete Korrelation zwischen Verhalten des Gesteins an Ulmen, First und Sohle findet nach dem Vorgesagten nur an den Ulmen eine Bestätigung. Durch *v. Willmanns* Erklärungen ist für diese Korrelation das Mass gegeben. Zerstörung an den Ulmen, als Bergschlag usw., durch abschiebende Kräfte kann sich nicht tief in das Gestein erstrecken, weil die innere Reibung in der komprimierten Masse Abschiebungen entgegenwirkt.

Bei der Herstellung des Simplon-Parallelstollens traten an gewissen Stellen kürzere Zeit nachher diejenigen starken Deformationen ein, von denen sich Abbildungen in Bd. LIII, Nr. 6, der „Schweiz. Bauzeitung“ finden.¹⁾ Nach relativ kurzer Zeit hatten diese ihren Höchstgrad erreicht und begannen sich rasch abzuschwächen, bis nach ein oder zwei Jahren völlige Ruhe herrschte. Heute, etwa acht bis zehn Jahre nach der Herstellung, ereignen sich äusserst selten einmal noch Abbröckelungen von bereits gelockerten Schalen.

¹⁾ *Karl Brandau*: «Das Problem des Baues langer, tiefliegender Alpentunnels und die Erfahrungen beim Bau des Simplontunnels». «Schweiz. Bauzeitung», Bd. LIII, S. 2 ff. — Auch als Sonderabdruck erhältlich (mit 20 Abbildungen). Verlag der Schweiz. Bauzeitung, Zürich (2 Fr.).

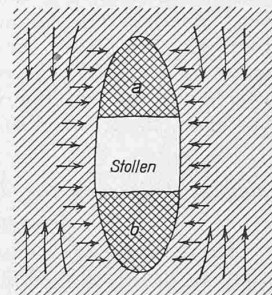


Abb. 3. Wirkung der Ulmenpressung auf die spannungslosen Körper über der First und unter der Sohle. (Nach *E. v. Willmann*.)

Dies Verhalten unterscheidet sich vollkommen von demjenigen, das man nach Heims grundsätzlichen Erklärungen erwarten müsste, und die *Deutung der Bergschläge* als Beginn des grossen Zerstörungswerkes des unverkleideten Stollens durch den Gebirgsdruck ist eine verkehrte. Sie bedeuten vielmehr, wie gesagt, *nur die Tätigkeit einer einmaligen Abgabe eines vor der Stollenherstellung vorhandenen beschränkten Arbeitsvorrates.*

Wir beschliessen diese Betrachtungen mit folgendem Zitate aus v. Willmanns Abhandlung:

„In Tunnels mit geringer Ueberlagerung tritt vorwiegend Firstdruck, mit grosser Ueberlagerung hauptsächlich Seitendruck auf. Auch in sehr tiefliegenden, stark überlagerten Tunnels ist allseitiger, der Ueberlagerung gleicher Druck weder nachzuweisen, noch zu erwarten. Heims Forderungen, tiefliegende Tunnels von vornherein mit allseitig widerstandsfähigen Gewölben zu versehen, lässt sich also nicht aufrecht erhalten.“

III.

Praktische Folgerung für den Tunnelbau aus der Erkenntnis der Druckwirkung.

Machten es die Heimschen Anschauungen über das Verhalten des Gebirgsdrucks unabweislich, jeden Tunnel „druckfest“ und vollkommen auszuwölben, so haben die Anschauungen der Techniker und die Erfahrung zu andern Folgerungen geführt. Ein jeder tiefliegender Tunnel ist durch seine Auswölbung mit sogenanntem Verkleidungsmauerwerk genügend gesichert, vorausgesetzt, dass gewissen lokal auftretenden zerstörenden Wirkungen durch lockeres Gebirge, Wasserzutritt, plastisches Material entsprechend begegnet worden ist. Die Dauerhaftigkeit eines Tunnelgewölbes bleibt ausschliesslich bedingt von der Güte seiner Ausführung und des verwendeten Baumaterials, nicht von grossen Belastungen. Ausserdem allenfalls von den unter gewissen Umständen mehr oder weniger starken Einwirkungen der feuchten Luft, des Gehaltes der Luft an schwefeliger Säure oder gewisser, Schwefelsäureverbindungen enthaltender Schwitzwässer, welche auf die Zerstörung des Mörtels und des Gesteins Einfluss haben können. First- und Sohlendruck haben im festen Gestein immer nur eine mässige, im lockeren Gestein eine bedeutendere, aber dennoch beschränkte Stärke. Der Seitenschub an den durch den Tunnelausbruch freigelegten Gesteinswänden kann kurz nach dem Ausbrechen eine erhebliche Intensität haben. Er vermag schnell eingebrachte Holzsicherungen zu zerbrechen und Mauerverkleidung zu verschieben, ja zu zerstören. Gewöhnlich hat er aber völlig ausgewirkt nach Verlauf derjenigen Zeit, die beim Arbeitsvorgang verstreichen muss, um den Ausbruch zu vervollständigen und um mit der Herstellung der Verkleidung vorgehen zu können. Dennoch sollte man in tiefliegenden Tunnels den Widerlagern mit Rücksicht auf eine mögliche längere Dauer des vollen Auswirkens des Seitenschubes eine etwas grössere Stärke geben, als in den bisher gebauten Tunnels, z. B. auch als im Simplontunnel. Denn wo immer Zerstörungen von Mauerwerk im Simplontunnel beobachtet worden sind, konnten sie stets direkt auf Verschiebungen der Widerlager zurückgeführt werden oder auf deren Folgen, die sich bis in die Gewölbe hinauf ausdehnten.

Von den Geologen werden ausserordentliche Pressungen in Aussicht gestellt in den Schenkeln tektonischer Gewölbe oder Dome, die im gefalteten Gebirge gegeben sind. Vorausgesetzt, dass diese Gewölbe den Druck ihrer Ueberlagerung wirklich, wie die Geologen es darstellen, ähnlich wie in einem freistehenden Kunstgewölbe nach ihren Stützpunkten hin übertragen, würde man im Innern der Erde, event im festen Gestein, Druckpartien zu erwarten haben, in denen die Tunnelverkleidung ganz ungewöhnliche Stärke erhalten müsste und wo ausserordentliche Schwierigkeiten der Bauausführung entgegenzutreten könnten. Es liegt daher die Frage nahe, ob eine solche Ansicht begründet ist, und wir äussern deshalb unsere Anschauungen dazu.

Starke Pressungen in der Erdrinde haben Verschiebungen oder Ueberschiebungen von Teilen der Erdoberfläche veranlasst. Wo sich den also geschobenen Massen Hindernisse in den Weg stellten, waren sie gezwungen, sich als Falten aufzubäumen. Bei andauerndem Nachschub erlitten diese die gewaltsamsten Zusammenpressungen und Zusammenquetschungen. Innerhalb der auf diese Art gebildeten Bergmassen sind die ehemaligen Gesteinsbänke wohl als petrographisch unterschiedliche Schichten erhalten geblieben. Indessen sind sie zu einer einzigen stark gepressten und gequetschten Masse geprägt. Dass sich darin die einzelnen Bänke wie freistehende Tonnen- oder Kuppelgewölbe verhalten können, ist undenkbar. In bezug auf eine Druckverteilung, wie sie die Geologen voraussehen, sind sie unbedingt inert. Wie ein gemauertes Kunstgewölbe so lange als tote Masse auf dem Lehrbogengerüst lastet, bis ihm nach Entfernung desselben seine Beweglichkeitsmöglichkeit verliehen wird und aus ihm ein lebendiges aktives Gewölbe entstanden ist, so ist es auch mit den Gewölbe- oder Kugelschalengliedern im Gebirge. Da hier aber die untern Glieder niemals gelockert oder weggezogen werden können, kann von einer Vertragung der Ueberlastung auf seinen Widerlagerfuss auch nicht die Rede sein.

Abgesehen von diesem wesentlichen Grund gegen die Bildung solcher Druckkonzentrationen im Innern der Erde würde Gewölbewirkung, wenn sie in einem intakten Gebirgsgewölbe wirklich zustande käme, in Wirklichkeit allermeist schon längst durch tiefe Erosionsschluchten, durch weitreichende Abtragungen, durch grosse Verwerfungsspalten usw. gestört oder vollkommen aufgehoben worden sein. Auch die in solchen Faltengebirgen häufig vorkommenden Ausquetschungen der stärksten Bänke, von 100 m und mehr Stärke, auf wenige Meter oder gar auf ein Nichts, sodass das Hangende und Liegende der Bank in direktem Kontakt stehen, ist einer der vielen Gründe, die zu grossen Diskontinuitäten Veranlassung sind.

Als Beispiel für diese Einwendungen führen wir die Südseite des Simplontunnels an. Auf den ersten 6 km wurde der Antigoriogneiss als ein mächtiges Gewölbe aufgefasst. Von diesem behaupteten die Geologen, dass es das unterlagernde weiche Gestein, in dem der Voraussicht nach der Tunnel erbohrt werden sollte, vor dem Druck der Ueberlagerung bewahren werde. In der Tat fallen zwischen Km. 4 bis 5 des Tunnels die Schenkel eines nach Süden aufsteigenden Gewölbes ein. Die eigentliche Kuppel desselben ist aber durch tiefe Schluchten völlig ausser Zusammenhang gebracht und auf grosse Flächen durch Erosion abgetragen. Von diesem Gewölberest eine Gewölbewirkung sich zu versprechen, ist wohl ein wenig zu weitgehend; wenn nachträglich bei Beurteilung des Verhaltens der Gesteine im Simplontunnel die Wirkung des Gewölbedrucks an der Durchörterungsstelle des Tunnels als Erklärung der Vorgänge im Gestein herangezogen wurde, so müssen die Schlussfolgerungen unhaltbar genannt werden.

Dass in dieser Hinsicht dem Tunnelbau in grösseren Tiefen besondere Schwierigkeiten entgegenzutreten können, erscheint daher unbegründet. Als einzige mögliche Komplikation in Hinsicht auf hohe Drucke bleibt also nur die Möglichkeit des Antreffens weicher oder gebräucher Gesteine. In diesen ist der Firstdruck ein bedeutenderer, weil die über der First locker werdenden Gesteinskörper in grössere Höhe hinaufreichen. Der Seitendruck wird kräftiger, weil die Kraftlinien schräger geneigt abgelenkt werden, weil also deren Horizontalkomponenten grösser werden müssen. In der Sohle erfolgt der Auftrieb stärker, bewirkt durch eben diese Schubkräfte auf die von keinem Gegendruck gehaltenen gelockerten Massen unter der Sohle. Deshalb sind in solchem Gebirge wirklich starke Mauertypen mit Sohlengewölbe anzuwenden.

Die Bestimmung der Gewölbe- und Widerlagerstärken auf rechnerischem Wege lässt sich nur für Tunnels durchführen, die noch nahe der Erdoberfläche liegen. Hier sind die physikalischen Eigenschaften des Gesteins bekannt,

und die Gebirgsdrucke können leicht rechnerisch oder graphisch ermittelt werden. In bedeutenderen Tiefenlagen wäre man auf willkürliche Annahmen über die Höhe, bis zu denen die weichen Gesteine, die im Tunnel angetroffen werden, hinaufreichen, angewiesen, und dafür fehlt jeder Anhaltspunkt. Nach der Erfahrung muss die Annahme erlaubt sein, dass selbst in sehr weichen und plastischen Gesteinsarten sich der Gebirgsdruck in nicht allzugrosser Höhe über den Tunnel seitlich von der Tunnelaxe verteilt; daneben werden überdies andere, nicht erkennbare Umstände eintreten, welche die Kontinuität der Gesteinssäule unterbrechen. Eine solche Annahme gilt z. B. für die Druckpartie der Südseite des Simplontunnels, wo plastisches, äusserst druckreiches Gestein unter 1200 m Ueberlagerung erbohrt worden war, das nach dem tektonischen Bild des Simplongebirges bis zur Erdoberfläche reichen sollte. Hätte man druckfestes Gewölbe für die Bedingungen, welche der ungünstigste Fall stellte, ausführen müssen, so würde sich die Aufgabe durch die ungeheuerlichen Dimensionen als unausführbar erwiesen haben. Man musste sich deshalb aus praktischen Gründen mit Gewölbstärken von 1,60 m begnügen. Schon während der Tunnelherstellung machten sich die Anzeichen einer wesentlichen Verminderung der ursprünglichen Druckäusserungen bemerkbar, und besonders der Firstdruck gestaltete sich schliesslich ganz unerheblich. Dies Beispiel, bei dem nach Heims Schlussfolgerungen der volle Gebirgsdruck sofort hätte eintreten sollen, beweist, dass der Tunnelbau in grossen Tiefen niemals durch den vollen Gebirgsdruck der überlagernden Gebirgsmassen beansprucht werden wird.

Die „gewöhnliche Gewölbetheorie des Technikers“, wie sie Herr Heim bezeichnet hat, bewährte sich deshalb noch in jedem Falle als zutreffend. Und ausserdem scheint es, dass die bisher gewählten Gewölbeabmessungen, die man in den druckhaftesten Gesteinen nicht rechnerisch bestimmen konnte, sondern lediglich nach praktischem Gefühl ermassen musste, auch bei dem Vorkommen der höchsten Ueberlagerungen einwandfrei waren. Darnach dürfte es nicht gerechtfertigt erscheinen, die Kosten eines Tunnelbauwerks durch Rücksichten derart, wie sie Heim verlangt, um 30 % oder in irgend einem andern Verhältnis zu verteuern.

Wettbewerb für ein Gebäude der Ecole de Commerce in Lausanne.

Durch das gefl. Entgegenkommen des waadtländischen Département des Travaux in Lausanne sind wir heute in der Lage, unsern Lesern die hauptsächlichsten Pläne der fünf bei diesem Wettbewerb mit Preisen ausgezeichneten Entwürfe vorzuführen, welcher Darstellung wir das eingehende Gutachten des Preisgerichtes in üblicher Weise beifügen.

Dieses hat mit wenigen, äusserlichen Kürzungen folgenden Wortlaut:

Rapport du Jury.

Monsieur le Conseiller d'Etat,

Le jury auquel vous avez bien voulu confier le soin de juger les projets qui vous ont été envoyés pour le Concours de l'Ecole de Commerce, composé de MM. C. Decoppet, Conseiller d'Etat, P. Etier, Conseiller d'Etat, F. Stehlin, architecte, à Bâle, E. Prince, architecte, à Neuchâtel, et C. Melley, architecte, à Lausanne, s'est réuni, au complet, le lundi 26 février 1912, à 9 heures du matin, à l'Ecole Normale à Lausanne, où les dits projets avaient été préalablement exposés. Etaient en outre présents MM. Bron, architecte cantonal, et Gauthier, chef de service au Département de l'instruction publique et des cultes.

Monsieur le Conseiller d'Etat Decoppet préside la séance et donne connaissance du résultat obtenu par la mise au concours de cette étude. Il résulte de son exposé que 53 projets ont été présentés et sont parvenus à destination en temps voulu, sauf deux d'entre eux, provenant de l'étranger, livrés en retard par le service postal. Ces deux envois ayant été consignés à la poste dans le délai fixé, sont également admis au concours.

Monsieur le Président remet à chaque membre du jury, une liste des projets présentés, contenant la vérification des cubes annoncés, établie par les soins de l'architecte cantonal en vue de faciliter les opérations du jury.

Le jury consacre une heure et demie à la visite individuelle de l'exposition et procède ensuite à la vérification des pièces produites et des échelles, sur la base de l'article I du programme. Ces prescriptions ont été remplies par tous les concurrents.

Il est procédé à un 1^{er} tour d'élimination destiné à écarter d'emblée les projets insuffisants comme étude ou comme conception architecturale.

Un seul projet est écarté de ce chef, savoir le n° 3 «Et puis vous».

Sont éliminés ensuite pour dispositions défectueuses, défauts d'orientation ou mauvaise utilisation du terrain les 10 projets suivants:

N° 12. Commerce; 17. All' right; 19. Sud-Est I; 25. Silhouette; 28. Davel; 34. Sud-Est II; 35. D'après le programme exact; 37. Lausanne II; 38. Tell; 40. Lequel.

Le jury reprend séance à 3 h. après midi.

Après nouvel examen les 12 projets suivants, n'offrant qu'un intérêt secondaire, sont encore éliminés, pour dispositions inadmissibles savoir:

N° 4. Baumont; 7. Mill.; 8. 12 - 11 - 12; 13. Jeunesse; 14. Mérite; 18. Manouba; 26. Liberté et Patrie; 27. Grandes lignes; 33. Mercurius; 39. Le plus petit cube?; 41. Commercial; 47. Charrette.

Serrant encore davantage les données du programme, spécialement en ce qui concerne les accès, l'utilisation des locaux, les convenances comme caractère architectural ou comme prix de revient de construction, le jury procède encore à un 4^{me} tour d'élimination au cours duquel les 13 projets suivants sont écartés.

N° 1. Mercure; 5. Le Sourire; 6. Simplex; 9. Deux préaux; 15. Business; 20. Juventuti; 22. Vue; 23. 1912; 29. Ni plus ni moins; 30. Vive le commerce; 36. Alea Jacta est; 44. Primerose; 45. 15 février 1912.

La séance est levée à 6^{1/2} du soir.

Le jury reprend séance le mardi 27 février à 9 h. du matin.

Il constate que sur les 53 projets présentés 17 projets restent encore en présence pour l'obtention des primes prévues au programme, ce qui l'oblige à faire un nouveau tour d'élimination; mais avant de suivre à cette opération il est procédé à un nouvel examen individuel détaillé des 17 projets en question afin de pouvoir mieux se rendre compte de leurs mérites respectifs.

Les 8 projets suivants sont éliminés au cours de cette opération.

N° 2. Motto: «Un seul rez-de-chaussée». Disposition dissymétrique avec corps principal de bâtiment parallèle au mur de soutènement de l'école primaire de Beaulieu et cour au nord. Agrandissement et salle de gymnastique en bordure de route à l'Ouest sur l'Avenue Gindroz. Préau spacieux à trois entrées. Bon aménagement de l'escalier extérieur au Sud. L'escalier du vestibule de l'entrée principale paraît trop important. Deux variantes pour la salle de gymnastique, dont l'une adossée au mur de soutènement, ce qui n'est guère recommandable. Les formes de ces salles sont trop irrégulières. L'entrée principale des constructions prévues pour les besoins immédiats est trop excentrique et par contre serait aussi trop rapprochée de celle qui est prévue pour les agrandissements futurs.

Façade monotone, tombant trop dans le genre fabrique et manquant de variété dans la disposition des baies. Cube: 34 556,46 m³.

N° 10. Caducée (dessin). Projet très étendu entourant tout le terrain d'une ceinture de construction avec préau intérieur et entrée principale dans la partie en courbe au Sud. Agrandissement prévu en bordure de voie sur l'Avenue Gindroz. Salle de gymnastique adossée au mur de terrasse de l'école primaire et raccordée aux ailes par préaux couverts. Cette disposition présenterait le gros inconvénient, vu la pente générale de cette cour intérieure, d'amener nécessairement de l'humidité dans la construction donnant sur le Maupas. L'ensemble est beaucoup trop important et constitue deux écoles séparées, reliées seulement dans les étages du bas par un raccordement en courbe, d'où impossibilité de circulation directe aux étages supérieurs. Classes trop en bordure de route. Surveil-