

## Geologische Nachlese.

Von

Albert Heim.

---

Nr. 14.

### Tunnelbau und Gebirgsdruck.

In meinem „Mechanismus der Gebirgsbildung“, der 1878 erschienen ist, habe ich im II. Band, besonders auf Seite 105 und 106 das gleiche Thema besprochen, das uns jetzt beschäftigen soll. Der Schluss, zu welchem ich damals gelangt war, dass ein grosser Tunnel unter einem mächtigen Gebirge immer vollständig ausgemauert werden müsse, wurde vom Ingenieur-Geologen des Gotthardtunnelbaues, Hrn. Dr. F. M. Stapff, bestritten und ich wurde wegen dieser Behauptung bekrittelt. Wenige Jahre später öffneten sich jedoch im anfänglich festesten und geschlossensten Felsen des Gotthardtunnels die Fugen, und endlich musste alles eingewölbt werden. Durch das Zögern hatte man sich die Arbeit wesentlich erschwert. Seither sind eine Menge weiterer Erfahrungen gemacht worden und ich selbst habe keine Gelegenheit versäumt, bezügliche Beobachtungen anzustellen. Meine Darlegungen aus dem Jahr 1878 waren indessen sonst von Niemandem aufgegriffen worden. Kein Vertreter der Ingenieurwissenschaften scheint sie beachtet zu haben. In den theoretischen wie praktischen Lehrbüchern über den Tunnelbau werden sie nirgends verwertet. Da ich meine damaligen Anschauungen aber fortwährend nur bestätigt sehen musste, und da ich die Sache für sehr ernst halte, fühle ich längst die Verpflichtung, in dieser Angelegenheit nochmals hervortreten, um wenigstens, wenn meine Erörterungen wieder unbeachtet bleiben sollten, mein Gewissen zu salviairen.

Die Theorie des Tunnelgewölbes wird gewöhnlich so gegeben, dass man zunächst alles, was unter einer durch die Basis des Tunnels gehenden horizontalen Ebene liegt, als starr und unveränderlich betrachtet. Darüber liegt nun das Gestein mit seiner Last. Das Gewölbe wird so konstruiert, dass es diese Last über und neben dem Tunnel auffängt und durch die Keilgestalt der Gewölbesteine auf eine Drucklinie leitet, welche ganz innerhalb des Gewölbes zu liegen kommt und sich beiderseits in die Widerlager, senkrecht auf deren Auflagerungsfläche, am Untergrunde verlängert. Dabei wird seitlich nach auswärts vom Widerlager weg schief hinauf ein Reibungswinkel angenommen in dem Sinne, dass die unter der möglichen Abrutschungsfläche gelegenen Massen gar nicht mehr auf das Gewölbe drücken — ganz nach Art der Theorie des Erddruckes auf Stützmauern im Freien.

Nach meiner Überzeugung ist zunächst die Annahme der Starrheit des Untergrundes der Hauptfehler in dieser Theorie des Tunnelgewölbes.

Dass der Boden nicht als starr angesehen werden kann, lehren uns eine Menge von Erfahrungen. In den tiefen Kohlenbergwerken in England so gut wie in Westfalen, im Gebiet von Saarbrücken, in Belgien etc. etc. steigt der Boden stets unter den lange offen bleibenden Stollen. Da, wo zwei Stollen sich kreuzen, steigt er am schnellsten. Es gibt solche Orte, wo man allmonatlich wieder nachhauen muss, um die Schienen wieder flach zu legen. Im Asphaltbergwerk im Traverstale stieg unter den einige Jahre un- ausgebaut offen gelassenen Strecken der Mergelfels und der Kalkfels des Untergrundes, sie rissen auf, und Wasser unter Druck quoll von unten ein und fügte dem Bergwerk enormen Schaden zu. Alle Versuche, diese Löcher wieder zu verstopfen, sind an dem stets langsam weiter gehenden Aufsteigen und Aufreißen des Bodens gescheitert. In den meisten Bergwerken kennt man das Aufsteigen des Bodens längstens und man weiss auch, dass es unter Zerreißen des Bodens bei den festesten Gesteinen auftritt, nur bei letzteren erst nach Jahrzehnten, bei den weniger festen schon rasch. In England nennt man die aufgewölbten Bodenteile „creeps“. In einer ganzen Anzahl von älteren Eisenbahntunnels zeigte sich streckenweise ein Heben des Bodens. Im Hauenstein-tunnel beträgt es schon 10 und 20 cm. Sogar in dem viel jüngern

Bötzberg- und im Gotthardtunnel ist es bemerkbar. In manchen ist von Zeit zu Zeit die Schienenlage wieder korrigiert worden. Überall, wo schon während dem Tunnelbau sich das Gestein als „druckhaft“ erwies, da hatte man nicht nur Bewegungen von oben und von der Seite, sondern stets auch, freilich in etwas geringerer Masse, von unten. Ich habe das in der „druckhaften Stelle“ des Gotthardtunnels wie im Simplon bei 6000 und 9000 m von Nord und in tiefen Wasserfassungsstollen oft gesehen. Und wo neuer Bergbau uns in alte, tiefe, seit Jahrzehnten verlassene Stollen oder Auslaugungshöhlen der Salinen führt, da sehen wir, dass sich oft der ganze alte Stollen wieder geschlossen hat und zwar nicht bloss durch Einsinken des Daches, sondern zu einem Drittel oder einem Viertel durch Aufsteigen des Bodens und zugleich durch Zusammengehen der Seitenwände. Sogar in den fertig gebauten Teilen des Simplontunnels zeigen die Nivellements schon stellenweise Steigen des Bodens.

Meistens werden von den Tunnelingenieuren diese Erscheinungen vom Aufsteigen des Bodens leicht genommen. Gewöhnlich nimmt man an, das werde bald aufhören und sehr oft wird die Erscheinung kurzweg bezeichnet als ein „Blähen“ der äusseren Teile des Gesteines durch die nun zutretende Luft und Wasser und dadurch bedingte lokale Aufquellung. Immer sucht man die Ursache in einer ganz lokalen eigentümlichen Gesteinsbeschaffenheit und man sucht trocken zu legen. Niemals bisher will man darin eine allgemeine mechanische, mit Notwendigkeit in jedem Gestein schliesslich eintretende Erscheinung erkennen. Darin liegt der zweite Irrtum. Ein wirkliches „Blähen“, das heisst Quellen des Gesteins, ist nur äusserst selten nachweisbar. Ein kräftiges Quellen kennen wir eigentlich einzig bei dem Übergang von Anhydrit in Gips. Die kaolinisierten Gneisse der druckhaften Stelle des Gotthardtunnels quollen nicht, sie wurden nur in den Tunnel eingepresst; die Mergel im Fahrnauertunnel quollen auch nicht, sie lösten sich nur an der Tunnelwand in Brei auf, aber die Auflösung drang kaum einige Centimeter tief hinein. Und wo ich zusehen konnte, wenn vermeintlich durch Wasseraufnahme unter den Schienen gequollenes Gestein abgedeckt wurde, da zeigte dasselbe wohl manchmal Bewegungsrisse, aber absolut keine Quellformen und keine bezügliche Veränderung seiner Beschaffenheit.

Stapff und auch andere Fachgenossen hatten meiner Erörterung des Gebirgsdruckes entgegengehalten, diese sei eine blosser Konstruktion. Ich war erstaunt darüber, dass der bis ins Äusserste mathematische Spekulant Stapff (Neues Jahrbuch 1879) darin einen Vorwurf sah. Wenn nur die Prämissen, von denen wir ausgehen, richtig geprüft sind, warum sollen wir denn nicht darauf mit Schlüssen weiterbauen dürfen? Ist das nicht das Hauptgeschäft der anerkannt exaktesten Wissenschaft, der Mathematik? Man hat meine Ableitung nur deshalb so schwer angenommen, weil die meisten meiner Fachgenossen in die Mechanik der festen Körper sich vorher nicht genügend vertieft hatten, um die Richtigkeit der Schlüsse sehen und mitfühlen zu können. Den Herren Ingenieuren sollte das leichter fallen. Ich bin nun genötigt, wenn auch in etwas anderer Art als früher und so kurz und einfach als möglich, meine Theorie des Gebirgsdruckes hier nochmals zu geben.

Die rückwirkende oder Druckfestigkeit der Gesteine wie aller uns bekannten Materialien ist eine beschränkte. Wir können uns von jedem Gestein eine Säule denken, so hoch, dass ihre Last den Fuss zerquetscht. Die Höhe dieser Säule sei  $h$ . Betrachten wir einen Gesteinswürfel unter dem Boden in einer Tiefe etwas grösser als  $h$ . Die Belastung würde ihn dort zu Pulver zerquetschen, wenn er von den ringsum einschliessenden Gesteinsmassen befreit wäre. Die Teilchen wollen ausweichen, aber es ist kein Raum frei zur Bildung von Rissen, zur seitlichen Bewegung. Seitlich stossen gleich belastete Gesteinsteile an, die notwendige Folge wird darin bestehen, dass der Druck von den seitlichen Gesteinswürfeln aufgenommen wird. Druck und Gegendruck sind, wo keine Bewegung ist, gleich. Aber in gleicher Weise drückt jeder Gesteinswürfel auf alle ringsherum gelegenen; selbstverständlich erfährt aber auch der oberhalb gelegene den Gegendruck, der aus dem Nichtweichen des unteren resultiert. Das weit über seine Festigkeit gepresste Gesteinsstück sucht nach allen Richtungen mit ähnlicher Kraft sich zu bewegen. Stünde ihm der Weg nach oben offen, so würde es in Pulver zermalmt dorthin fliehen. Ein Gesteinspartikel, dessen überliegender Nachbar plötzlich entfernt wäre, würde zwischen den seitlich anliegenden herausgedrückt, hinauf in den Hohlraum. Man mag sich dies nach allen Richtungen überlegen, so kommt man stets unau-

weichlich zu dem Resultate, dass in einer Tiefe, wo die durchschnittliche Belastung durch überliegendes Gestein wesentlich grösser ist als die rückwirkende Festigkeit eines isolierten Gesteinswürfels, sich der Schweredruck nach allen Richtungen im Raume fortpflanzen muss, gerade so wie in einer Flüssigkeit. Der Druck wird ein hydrostatischer. Gerade so gut wie in einer Flüssigkeit muss es auch im Gestein tief unter der Oberfläche einen **Auftrieb** geben. Mir scheint, dass in dieser Deduction keine Hypothese enthalten ist, und dass dies Resultat so sicher ist wie die einfachste mathematische Ableitung.

Gegenüber einer Flüssigkeit bestehen nur zwei Unterschiede: 1. Die innere Reibung ist viel grösser; wirkliche Deformation, Fliessen bei Störung des Gleichgewichtes kann deshalb erst dann eintreten, wenn der Schweredruck überdies noch ausreicht, die innere Reibung zu überwinden und 2. es kann bei Gleichgewichtsstörung die Bewegung infolge der entgegenstehenden innern Reibung und Festigkeit des Gesteines nur sehr allmählich und langsam im Laufe der Zeit eintreten.

Denken wir uns nun, dass in der Tiefe, wo der Schweredruck schon ganz hydrostatisch sich nach allen Richtungen fortpflanzt, plötzlich ein grosser Gesteinswürfel herausgenommen würde. Das ist nun eine grosse Störung im hydrostatischen Gleichgewicht. Damit ist nach allen Richtungen von dem Hohlraum ausgehend der hydrostatische Gegendruck aufgehoben. Es muss also von allen Seiten her Bewegung nach diesem gegendruckslosen Punkte hin eintreten. Es werden sich zuerst rings um den Hohlraum kugelig konzentrische Schalenstücke loslösen nach den Flächen des maximalen Druckes, die sich hier rings um den Hohlraum wie die Drucklinien eines Gewölbes anordnen müssen. Es werden abgetrennte Stücke knisternd in den Hohlraum gestossen. Das Gefüge des Felsens lockert sich in immer grössere Entfernung von dem Hohlraum, der Hohlraum möchte sich gewissermassen durch das ganze Gebirge in feinen Fügen gleichförmig verteilen. Die sehr entfernten Teile, die zugleich tief genug liegen, biegen ohne Bruch gegen den Hohlraum hin. Die Trümmer werden zusammengedrückt, in kleinere zerbrochen, die sich immer dichter aneinander schmiegen, die Hohlräume werden immer enger, immer weiter im Gebirge

fein zerteilt, der ursprüngliche grosse Hohlraum schliesst sich wieder im Laufe der Jahre. In ganz enormen Tiefen würde ein Tunnel, einen Moment entstanden gedacht, sich rasch wieder schliessen wie ein Loch, das wir in einen Brei oder in eine Flüssigkeit stechen.

Wir haben den Satz gewonnen, dass in einer Tiefe, wo die Schwerelast im Durchschnitt wesentlich grösser ist, als die rückwirkende Festigkeit, die Last sich nach den Gesetzen des hydrostatischen Druckes in allen Richtungen fortpflanzt, und dass ein Hohlraum, der hier gemacht würde, also z. B. ein Tunnel, sich von allen Seiten her, also auch von unten her wieder schliessen müsste. Wir heben ausdrücklich hervor, dass diese Ableitung durchaus unabhängig ist von der Beschaffenheit des Gesteines und für jedes Gestein gelten muss. Die Differenz in der Gesteinsbeschaffenheit kann nur darin sich zeigen, dass dieser Zustand, bei welchem die innere Festigkeit gewissermassen durch die Last überwunden ist, bei den einen Gesteinen schon in einer mittleren Tiefe von wenigen hundert Metern, bei andern erst in einer solchen von mehreren tausend Metern eintritt.

In ganz grossen Tiefen muss der hydrostatisch sich verteilende Druck einen plastischen Zustand zur Folge haben, der bei Gleichgewicht zunächst latent bleibt, bei Gleichgewichtsstörung, z. B. durch hinzutretende Gebirgsstauung aber eine Deformation der Gesteine zulässt, die in geringeren Tiefen durch Bruch und innere Verschiebungen, in grossen Tiefen in total plastischer bruchloser Umformung sich äussert. Die Untersuchung der Gebirge, wo Abwitterung und Talbildungen Gesteinsmassen entblösst haben, die ursprünglich unter grosser Belastung bewegt worden sind, hat eine grossartige Fülle von Erscheinungen kennen gelehrt, die alle Arten und Stadien der Gesteinsumformung unter hohem Druck uns tatsächlich vor Augen führen. Mikroskopisch feine innere Verschiebungen, Ausbildung innerer Zertrümmerung, bruchlose Fältelung, Auswalzung, Umformung von Versteinerungen und von Geröllen, Linearstreckung, Transversalschieferung, Knetstrukturen, Marmorisierung der Kalksteine, Ausbildung von einer Menge von dichteren und von gleitfähigeren Mineralien, alles in zonenförmiger Anordnung im Zusammenhang mit der Gebirgsstauung, das sind

die unmittelbaren Resultate der Gleichgewichtsstörung, vollzogen an durch enorme Belastung plastisch gewordenen Gesteinen. Sie alle konnten nur entstehen unter einem Druck, der allseitig viel grösser war als die rückwirkende Festigkeit. Sie beweisen uns aber auch durch die Art ihres Auftretens, dass die oben entwickelte Theorie vom hydrostatisch plastischen Zustande der Gesteine in grosser Tiefe bis in ihre letzten Konsequenzen richtig ist. Das Studium dieser Erscheinungen hat mich zuerst auf diese Theorie geführt („Mechanismus der Gebirgsbildung“ Bd. II), und von der Theorie aus haben wir eine Menge solcher Erscheinungen erraten, die sich nachher gefunden haben.

Doch kehren wir zu der Anwendung der Theorie des Gebirgsdruckes auf den Tunnelbau zurück.

Wir sind ausgegangen von der rückwirkenden Festigkeit der Gesteine. Dieselbe wird gemessen in den Festigkeitsmaschinen dadurch, dass man unter bestimmten Vorsichtsmassregeln einen gesunden Würfel des Gesteines verquetscht. Das ist aber die rückwirkende Festigkeit eines einzelnen Gesteinsstückes, eines Bausteines, das ist keineswegs die Festigkeit einer grossen Felsmasse aus demselben Gestein. Alle Felsen sind von Flächen geringerer Kohäsion, sogenannten Ablösungsflächen massenhaft durchsetzt. Oft liegen diese ziemlich regelmässig (plattige, säulenförmige, kubische, parallelepipedische etc. Absonderung), manchmal ganz unregelmässig. Wie schwierig ist es, für Bauzwecke, Monumente etc. einen Gesteinsblock von nur einigen Kubikmetern zu gewinnen, der nicht seine „Stiche“ hätte. Felsen in Tunnels oder an Hinterwänden von Steinbrüchen frisch entblösst, die erst vollständig ganz scheinen, öffnen nach einiger Zeit viele Fugen. Ganz scheinende Gesteinsblöcke, die einige Jahre dem Temperaturwechsel ausgesetzt werden, zerfallen nach Flächen geringerer Kohäsion. Die rückwirkende Festigkeit einer ganzen Gebirgsmasse ist immer viel geringer als die rückwirkende Festigkeit des Gesteines, wie sie in der Festigkeitsmaschine gefunden wird. Wir müssen fortan als zwei ganz verschiedene Dinge unterscheiden: Gebirgsfestigkeit und Gesteinsfestigkeit. Erstere ist gewiss oft zwei-, drei- und bis zehnmal geringer als letztere.

Wir bauen z. B. in einem Gestein, dessen  $h$  aus der rückwir-

kenden Festigkeit berechnet 2000 m betrage, einen Tunnel in 1000 m unter der Oberfläche unausgewölbt. Da stellen sich nach einiger Zeit Risse ein, Stück um Stück trennt sich, die Lockerung greift tiefer. Warum? Man beschwichtigt sich mit einigen Vermutungen: Diese Lockerungen seien Folge der Einwirkung der Luft und des Temperaturwechsels und haben nur geringe Bedeutung, sie gehen nicht tiefer. Nein! Die Erscheinung ist ganz allgemein und Luft und Temperaturwechsel vermöchten so intensive Wirkung bei den meisten Gesteinen in so kurzer Zeit nicht auszuüben. Der Temperaturwechsel ist im Tunnel ein viel weniger häufiger und viel langsamerer als an der Aussenfläche und wie viele Jahrzehnte muss er dort arbeiten, bis er ein Gestein so sehr in Trümmer auflöst! Die Ursache dieser Lockerungen liegt darin, dass die Gebirgsfestigkeit nur etwa ein Drittel der Gesteinsfestigkeit war. Durch das Aufheben des Gegendruckes an den Wänden des Tunnels sind aus „hydrostatischem Gesteinsdruck“ jetzt „hydrodynamische“ Spannungen und Bewegungen ausgelöst worden; der Tunnel will sich schliessen. Die einzelnen Gesteinsstücke werden in der Regel nicht zermalmt; dazu sind wir nicht tief genug. Aber an einer aus dem rohen Felsen bestehenden Tunnelwand wird der Gebirgsdruck an keiner Stelle eine Resultierende bilden, die zufällig genau senkrecht auf allen den verschiedenen Gesteinsfugen steht. Es entstehen daher überall Kraftkomponenten in der Richtung der Gesteinsfugen selbst. Diese überwinden die Reibung allmählich, öffnen die Ablösungsstiche weiter, verschieben die vielfach keilförmigen Gesteinsblöcke und drängen sie tunneleinwärts. Das Mosaikwerk des festen Felsens fällt allmählich auseinander. Hierzu ist manchmal wenig mehr Kraft notwendig, als die Überwindung der Reibung auf den Fugen erfordert, jedenfalls noch lange kein Druck, der der Gesteinsfestigkeit gleichkäme.

Im Richtstollen des Gotthardtunnels und an den vorerst belassenen Strossen im festen Schöllengranit liess sich diese Lockerung in ihrem Fortschreiten von Monat zu Monat verfolgen, bis endlich die Überzeugung reifte, dass alles auszuwölben sei. Im festesten Gestein von tiefen Bergwerken kann man diese Erscheinung alltäglich beobachten.

Wir müssen also auswölben. Ein Gewölbe ist eine Anordnung



von Gesteinsstücken, bei denen die Fugen zwischen den Steinen so gestellt sind, dass der Druck nach dem Tunnel hin auf allen Fugen sich in einen Druck senkrecht auf die Steinfuge des Gewölberinges umsetzt. Solange wir nun nicht in einer Tiefe sind, deren Schweredruck auch die Festigkeit der Gewölbesteine, in der Festigkeitsmaschine gemessen, übertrifft, so hält das Gewölbe Stand. Denken wir uns aber den Tunnel so tief, dass die mittlere Belastung grösser ist als die Festigkeit der Gewölbesteine, so werden auch diese zerdrückt.

Natürlich kommt es auch darauf an, wie dick das Gewölbe gebaut wird, d. h. wie gross die zusammenstossenden Gewölbesteinungen sind, die den Gebirgsdruck aufzunehmen haben. Die Widerstandsfähigkeit des Gewölbes hängt nicht nur von seinem Material, sondern auch von der Gewölbedicke, der Gewölbeform und Grösse etc. ab. In der zu grossen Tiefe aber hilft auch die vermehrte Dicke und die Enge des Gewölbes nichts mehr. Es ist hier nicht der Ort, näher auf den relativ geringen Einfluss dieser Einzelfaktoren der Gewölbekonstruktion einzutreten.

Zu der Erkenntnis, dass in gewisser Tiefe die Schwerelast sich hydrostatisch fortpflanzt, kommt also die weitere hinzu, dass wegen der Unganzheit der Gesteine diese Erscheinung in schon viel geringeren Tiefen sich geltend machen muss, als es der Druckfestigkeit der einzelnen dem Gebirge entnommenen Gesteinsprobe entspräche. Ein genaueres Mass verlieren wir. Wir können nicht einen Kubikkilometer Gestein unter die Festigkeitsmaschine nehmen, um die Gebirgsfestigkeit experimentell festzustellen und mit der Gesteinsfestigkeit messend zu vergleichen.

Wir haben unsern vorhin in 1000 m Tiefe gedachten Tunnel nur oben gewölbt. Die hydrostatische Druckverteilung muss aber auch von unten als Auftrieb arbeiten, wenn auch etwas weniger stark und weniger rasch als von oben und von den Seiten. Die Widerlager pressen in den Boden hinein. Das unterliegende Gestein kann gegen den Tunnelhohlraum ausweichen. Langsam langsam verschiebt sich Stück um Stück dorthin. Der Tunnelboden wird zwischen den Widerlagern aufgequetscht. Die Widerlager nähern sich einander. Zuerst entstehen Kantenabschälungen der Gewölbesteine in den unteren Teilen des Gewölbes nahe am Wider-

lager. Allmählich rücken sie nach oben. Unterdessen haben sich die Schienen gehoben und bald bemerkt man auch Deformationen im oberen Gewölbe, dort mehr in Form von Senkungen. Der Tunnel kann nur dann auf die Dauer halten, wenn wir auch in seiner Sohle die Gesteinsfugen so geordnet haben, dass keine Schübe auf denselben eintreten können. Der Auftrieb im Gebirge muss durch ein ihm entgegengestelltes, nach unten konvexes Gewölbe aufgefangen und gestellt werden. In jeder Richtung quer durch das Tunnelrohr muss der Druck von der einen Seite durch Gewölbe aufgefangen und geschlossen auf gleiches Gewölbe auf der gegenüber liegenden Seite übergeleitet werden. Das linksseitige Gewölbe muss auf das rechtsseitige aufstützen. Ohne Sohlengewölbe ist das aber nur einseitig, nur oben, nicht unten möglich. Wir müssen also Sohlengewölbe einsetzen. Der Tunnel muss eine geschlossene feste Röhre sein, die von keiner Seite, auch nicht von unten eindrückbar ist.

Beim praktischen Tunnelbau in der ungeheuer gewalttätigen Art, wie er jetzt mit grossen Bohrlöchern (z. B. durch die Brandtschen Maschinen) und starken Dynamitladungen betrieben wird, kommt noch ein die Verhältnisse erschwerendes Moment hinzu. Das Gestein wird mehrere Meter tief hinein zerschlagen und erfährt dadurch rings um den Tunnel herum eine Lockerung seines Gefüges, die wiederum die rückwirkende Festigkeit des Gebirges herabsetzt und den Tunnel umso eher in das Gebiet der hydrostatischen Druckverteilung setzt. Manche Gesteine, die früher sich ordentlich standfest erwiesen, werden jetzt „druckhaft“. Für den Gebirgsdruck gestaltet sich dann die Sache ähnlich, wie wenn ein Tunnel von viel grösserem Querschnitt gemacht worden wäre. Die Gesteinsmassen klemmen sich bei ihrem Hineindrängen nach dem Tunnelhohlraum gegenseitig weniger, die Bewegung ist erleichtert.

In der Theorie des Tunnelgewölbes ging man bisher von einem Grenzfall aus. Man dachte sich zuerst gewissermassen eine Art freien architektonischen Gewölbes, auf starren Boden gestellt, auf welches dann allmählich mehr und mehr Gebirge aufgeschüttet würde. Damit änderte man seine Gestalt etwas. Auch die Culmannsche Berechnung des Tunnelgewölbes geht von diesem Grenz-

fall aus. Darum ist in der Theorie der Gebirgsauftrieb vernachlässigt und dann nur als ausnahmsweise Besonderheit, statt als Allgemeinheit berücksichtigt worden. Mir scheint, wir müssen in der theoretischen Betrachtung das Tunnelgewölbe als etwas völlig verschiedenes ganz vom architektonischen Gewölbe trennen. Es ist nicht eine Verwendung des architektonischen Gewölbes unter Boden. Hier gewinnen wir vielmehr den allgemeinen Fall, wenn wir uns in eine Tiefe denken, wo die Schwerelast die Gebirgsfestigkeit weit übertrifft. Da stellt sich nicht die Frage, wie können wir ein Gewicht von oben tragen, sondern wie können wir durch diese Masse mit hydrostatischer Druckverteilung ein Loch stossen, das sich nicht mehr schliesst, weder durch die Last von oben, noch durch den Seitendruck, noch durch den Auftrieb. Die Antwort ist: Das Loch muss mit einer Röhre umgeben werden, deren Festigkeit gegen Zusammendrücken in jeder Richtung grösser ist, als die Gebirgslast. Dies kann erreicht werden, wenn der Tunnel mit einem geschlossenen röhrenförmigen Gewölbe eingebaut wird, wird aber niemals erreicht durch Auswölben bloss auf den Seiten und oben. Das Sohlengewölbe ist die **allgemeine** Notwendigkeit, und der Tunnel von kreisförmigem Querschnitt in grossen Tiefen der sicherste und angemessenste.

Und jetzt gehen wir von diesem allgemeinen Falle aus gegen die Grenzfälle hin.

Es sind von grösster Tiefe in geringere Tiefe vorschreitend folgende Fälle, wobei natürlich alle Zwischenformen denkbar sind, zu unterscheiden:

#### A. Gebirgsdruck grösser als jede Gesteinsfestigkeit.

In einer gar grossen Tiefe wird ein Tunnel nicht mehr möglich sein. Die grösste Tiefe für den Bau eines haltbaren Tunnels ist dadurch gegeben, dass ihre Gebirgslast noch etwas kleiner sein muss, als die rückwirkende Festigkeit der Gewölbesteine. Nehmen wir diese aus den druckfestesten Gesteinen, den besten Diabasen oder Basalten, so ist eine mittlere Gesteinshöhe von 5000 bis 6000 m über dem Tunnel noch in dem daraus resultierenden Drucke zu überwinden. Endlich könnten wir Gusstahl anwenden. Wir werden nie in die Lage

kommen, so tiefe Tunnels anzulegen. Einzelne noch höhere Berge, unter denen wir durchgehen wollten, sind pyramidal geformt, die durchschnittliche Belastung für die Tiefe ist viel geringer als die Höhe des höchsten Gipfels über dem Tunnel. Bei richtigem Bau ist also kein irgend wünschenswerter Gebirgstunnel auf der Erdoberfläche wegen Gebirgsdruck unausführbar.

B. Gebirgsdruck grösser als Gebirgsfestigkeit, kleiner als maximale Gesteinsfestigkeit.

1. Gebirgsdruck ausserdem auch noch grösser als Gesteinsfestigkeit der zu durchbrechenden Gesteine. Der Tunnel muss als geschlossene Röhre ausgewölbt werden, die Gewölbesteine müssen von einem Materiale von grösserer Druckfestigkeit sein, als das durchbrochene Gestein, kreisförmiger Querschnitt am sichersten.

2. Gebirgsdruck kleiner als Gesteinsfestigkeit: Sohlengewölbe notwendig, auch elliptischer Querschnitt oder flacheres Sohlengewölbe zulässig, es kann die gleiche Gesteinsart als Gewölbestein verwendet werden, die dieses Gebirge zusammensetzt.

C. Gebirgsdruck kleiner als Gebirgsfestigkeit: Sohlengewölbe ist nicht notwendig, das ganze Gewölbe kann ein blosses Auskleidungsgewölbe sein.

D. Gebirgsdruck sehr klein, Gebirgsfestigkeit und Gesteinsfestigkeit gross: Kleinere Tunnels können unausgemauert bleiben.

In der Praxis sollte nun bestimmt werden können, ob wir es im einzelnen Fall mit dem Typus B 1 oder B 2, mit C oder D zu tun haben. Das können wir nur in sehr unsicherer und unvollkommener Weise tun. Sodann kommt es nicht nur auf die mittlere Tiefe, sondern auch auf die Form des durchstochenen Gebirgsteiles an. Ist nur eine einzige vorspringende Gebirgscoulisse zu durchtunneln, dann kommt ein zusammenhängender Gebirgsdruck, eine hydrostatische Fortpflanzung desselben gar nicht ins Spiel, selbst nicht bei grossen Gesteinshöhen einzelner Punkte über dem Tunnel. Die äussere Bergrinde ist steif, ist starrer als der innere plastisch gedrückte Kern, sie hält in gewissem Grade den

beweglicheren Kern gefangen. Der Gebirgsdruck, d. h. die Schwerelast des überliegenden Gebirges, ist leicht ungefähr zu berechnen, die Gesteinsfestigkeit ist experimental zu bestimmen. Der ungemessene Hauptfaktor aber ist die Gebirgsfestigkeit. Wir wissen nur so viel, dass sie viel geringer, in der Regel um mehrere Male geringer ist, als die Gesteinsfestigkeit. Vorläufig bleibt nur Schätzung auf Grundlage unseres Gefühles, das wir an Hand von Beobachtungen, z. B. der Maximalböschungen aufbauen können, welche im Gebirge diese Gesteinsart erträgt. Ich glaube, wir können etwa folgendes schätzungsweise sagen:

Bei über ca. 2000 m mittlerer Gesteinsbelastung über dem Tunnel wird ein Auswölben als geschlossene Röhre mit normalem Granit oder Gneiss als Gewölbstein nicht mehr genügen. Im Laufe der Zeit würden die Gewölbesteine zerdrückt. Da ist Auswölbung mit den besten Porphyren, Gabbro, Diabas oder Basaltgesteinen notwendig.

In mittleren Tiefen des Tunnels von 1000 bis 2000 m wird ein guter gesunder Granit, Gneiss oder ähnliches Gestein als Gewölbstein auch auf die Dauer Sicherheit bieten. Aber es ist Sohlengewölbe notwendig, selbst in Gneissgebirge oder Granitgebirge.

Bei mittlerer Gesteinshöhe von 500 bis 1000 m mag vielleicht in festem Granit, in quer zum Tunnel streichendem, steil gestelltem, gesundem Gneiss etc. ein schwaches Sohlengewölbe genügen und bei weniger als 500 m darf es wahrscheinlich wegbleiben.

In Kalkstein, Mergel und Tonschiefer aber sind 500 m Gebirgshöhe über dem Tunnel noch viel zu viel, um das Sohlengewölbe ersparen zu dürfen. In Molassemergel, in den Lias- und Keupermergeln des Jura etc. wird vermutlich noch bei 100 bis 500 m Tiefe ein Tunnel ohne Sohlengewölbe nicht auf die Dauer haltbar sein.

Als Gewölbesteine können gute Kalksteine verwendet werden, wenn die mittlere Tiefe des Tunnels weniger als 800 bis 1000 m beträgt. Für Backsteine, Zementsteine oder andere Kunststeine ist eben ihre Druckfestigkeit zu bestimmen und daraus  $h$  zu berechnen. Als Gewölbesteine sind sie in mittleren Tunneltiefen von weniger als  $\frac{2}{3} h$  wohl verwendbar.

Das sind die wenigen, sehr ungefähren Zahlen, die wir aus

der gegebenen Reflexion ableiten können. Wollen wir eine zweifache, dreifache Sicherheit, dann müssten wir freilich noch viel mehr verlangen. Im allgemeinen werden wir ungefähr das richtige treffen, wenn wir die Gebirgsfestigkeit auf höchstens ein Drittel der Gesteinsfestigkeit annehmen und wenn wir sagen: ein Gestein kann als Gewölbestein nur verwendet werden bei mittlerer Tunneltiefe = höchstens  $\frac{2}{3}$  der aus der Gesteinsfestigkeit berechneten Höhe der Gesteinssäule, die eben ihren Fuss verquetscht. Da das spezifische Gewicht der in Betracht fallenden Gesteine nur in engen Grenzen (2,6 bis 2,8) schwankt, hatten wir bisher keine Veranlassung, dasselbe besonders in Betrachtung zu ziehen. Vielleicht wird es allmählich gelingen, präzisere Zahlennormen in diesen Fragen aufzustellen. Hier kann es sich vorläufig nur darum handeln, die Gesichtspunkte zu markieren, von denen aus nach meiner Überzeugung die Tunnelausmauerung beurteilt werden muss.

Eine sehr wichtige Rolle spielt der Faktor Zeit in allem, was sich um Gesteinsdeformation dreht. Er verdeckt uns oft für unser Auge die Erscheinungen. Was Zeit im Gebirge leistet, das lässt sich am besten ahnen, wenn man mit neuen Stollen seit Jahrzehnten verlassene Bergwerksgebiete anfährt und prüft, in welchem Zustand sich hier Tunnel und Gestein befinden.

Die Erfahrungen gehen dahin, dass Deformationen durch Gebirgsdruck im ersten Moment, da die Spannungen durch Anreissen des Gebirges ausgelöst werden, meistens gar nicht bemerkbar sind. Erst nach und nach werden die Reibungswiderstände überwunden, es bilden sich Gleitflächen im Gestein aus, und nun nimmt die Beweglichkeit des Gebirges zu und zwar immer rascher. Das Gebirge, das im ersten Moment standfest schien, wird druckhaft. Gelingt es, ein gutes Gewölbe rasch einzusetzen, bevor stärkere Bewegungen sich eingestellt haben, so hilft die innere Reibung, und ein gewöhnliches Gewölbe hält. Haben wir aber stärkere Bewegungen eintreten lassen, so ist die innere Reibung vernichtet, und wir brauchen um so stärkeres Gewölbe. Beim Bau des Gotthardtunnels hätte man von der später so gefährlich gewordenen druckhaften Stelle in kaolinisiertem Sericitgneiss gar nichts gespürt, wenn nicht das elende dort angewendete Bausystem dem Gesteine erst mehr als ein Jahr Zeit zur Lockerung gelassen hätte, bevor die Auswölbung dorthin vorrückte. Es gibt aber auch Gesteins-

massen, in welchen von vornherein die innere Reibung vernichtet ist, indem schon durch den Vorgang der Gebirgsfaltung das ganze Gestein mit einem Netzwerk von spiegelglatten Gleitflächen sich durchsetzt hat (z. B. Mergel im Bötztbergtunnel).

Die Zeit, welche verstreicht, bis die Gebirgsbewegung im Sinne des versuchten Tunnelschlusses fühlbar wird, ist nun je nach dem Material sehr verschieden. Bei innerlich zermalmtem Gestein, wie es bei den „druckhaften Stellen“ im Simplontunnel war, wird der Gebirgsdruck sofort fühlbar. Bei anderen braucht er lange Zeit. Und hier stossen wir nun auf einen weiteren Irrtum, der gewöhnlich begangen wird: Wenn das Tunnelbausystem ein gutes ist und gut gehandhabt wird, wird fertig ausgewölbt, bevor der Gebirgsdruck fühlbar wird. Dann heisst es: Das Gestein sei nicht druckhaft, und es wird ein leichtes Gewölbeprofil genommen und von Sohlengewölbe spricht kein Mensch. Sohlengewölbe wird nach bisheriger Theorie nur in sofort druckhaftem Gebirge angewendet und dann stets auf besondere Rechnung der lokalen Eigentümlichkeit des Gesteins gesetzt, aber nicht als durch eine allgemeine Erscheinung bedingt begründet. Ich glaube aber aus meinen Beobachtungen und Reflexionen den Schluss ziehen zu müssen; dass um einen Tunnel herum schliesslich jedes Gestein druckhaft wird. Die Frage ist nicht: welches Gestein ist oder wird druckhaft, welches nicht, denn alle werden druckhaft. Was in die Augen springt, ist nur das, dass manche Gesteine rasch schon vor dem Gewölbeeinbau druckhaft werden. Andere werden erst später im Verborgenen hinter den Mauern oder unter Kies und Schwellen nach 20, 30, 50 Jahren „druckhaft“. Wenn Stapff behauptet hat, der Gebirgsdruck hänge nicht von der Gebirgshöhe, nur von der Gesteinsart ab, so hat er sich eben dadurch täuschen lassen, dass er nur die ganz rasch druckhaft werdenden Gesteine im Auge hatte. Wenn wir einen Tunnel ausbrechen in 200 bis 500 m Tiefe unter der Oberfläche in weichen Mergeln, kaolinisiertem Gneiss, Gips oder innerlich zermalmtem Gestein, so äussert sich der Gebirgsdruck sofort in einem Hereinquetschen des Gesteins in den Tunnel und dies bald auch von unten. Wenn wir einen Tunnel in 1000 m Tiefe im festesten Granit ausbrechen, so zeigt sich schliesslich die gleiche Erscheinung, aber erst nach einigen oder vielen Jahren.

Nun wölbten wir rasch aus, und das ist gut. Wir lassen dem Gebirgsdruck gar nicht Zeit, sich zu äussern. Gleitverschiebungen im Gebirgsinnern haben nicht Zeit, sich auszubilden. Die innere Reibung hilft uns, wenn wir sie durch schnellen Einbau vor Zerstörung schützen.

Lücken hinter dem Gewölbe werden leider nicht immer zu vermeiden sein. Sie sind entschieden schädlich, denn sie provozieren, weil sie lokale Aufhebungen des Gegendruckes, gewissermassen lokale Verneinungen des Gewölbes darstellen, Bewegungen im rückliegenden Gebirge. Die oft geübte trockene Auspackung der Lücke zwischen Gewölbe und Gebirge wirkt häufig schlecht, besonders wenn das Gebirge weich merglig ist, weil es sich dann doch bewegen und zwischen die Steinbrocken hineinquetschen kann. Im allgemeinen und besonders, wo man es nicht mit sehr hartem und festem Gestein zu tun hat, ist satt anmauern an den Fels viel richtiger. Dem allfälligen Wasser kann man dennoch Ableitung geben.

Nun hält das leichte Gewölbe Jahre lang scheinbar sehr gut. Aber der allseitig sich fortpflanzende und allseitig wirkende Gebirgsdruck ist in der Tunnelsohle nicht durch Gewölbe aufgefangen worden. Der Gebirgsauftrieb ist vernachlässigt geblieben. Er muss schliesslich mit Naturnotwendigkeit sich geltend machen. Im Tunnelboden aufwärts hat das ringsum sonst geschlossen gepresste Gestein noch einen Ausweg. Es findet ihn langsam, aber es findet ihn sicher. In Mergel, Tonschiefer, Gips vielleicht bei 500 m Gesteinsbelastung schon nach 10 bis 30 Jahren, bei Gneiss, Granit in 1000 bis 2000 m Tiefe nach 30 bis 50 oder mehr Jahren. Es ist ganz falsch, zu meinen, dass das nicht bestehe, was nicht sofort fühlbar wird. Gebirgsbewegung durch Gebirgsdruck braucht Zeit, um sich zu äussern, viel Zeit in festem gutem Gestein, wenig in schlechtem, aber endlich wird sie sich überall einstellen.

Ich bin überzeugt, dass ein relativ leichtes Gewölbe sehr oft in alle Zukunft den Dienst tun wird, falls es nur sehr rasch eingesetzt, satt ans Gebirge angeschlossen, und falls die Widerlager durch nach oben konkaves, auch leichtes Sohlengewölbe verbunden werden. Baut man dagegen kein Sohlengewölbe, so wird auch ein doppelt und dreifach so starkes Obergewölbe auf die Dauer



nicht haltbar sein. Es scheint mir nicht ganz unmöglich, dass die künftige Erfahrung zeigen werde, dass man hie und da leichtere Gewölbe als gebräuchlich anwenden darf, falls gleichzeitig Sohlengewölbe eingebaut wird.

Unsere grossen tiefen Tunnels, bei denen überhaupt eine Äusserung des Gebirgsauftriebes zu erwarten ist, sind alle noch nicht alt. Der älteste, demnächst 50 Jahre, ist wohl der Hauensteintunnel. Da drin ist aber schon viel rekonstruiert worden! Man hat die Schuld von den Deformationen des Gewölbes und des Bodens in allen möglichen besonderen Dingen gesucht, und demnächst soll eine durchgreifende Rekonstruktion des Gewölbes stattfinden. Der Betrieb soll unterdessen eingleisig sein. Aber alles das wird nicht helfen. Die Bewegungen im Gebirge sind im Gang und werden nachher trotz allem Neubau des Obergewölbes sich viel rascher als das erste Mal wieder einstellen. Die Schuld liegt in der Vernachlässigung des Gebirgsauftriebes, im Mangel an Sohlengewölbe, und falls man sich nicht entschliesst, durchweg in den deformierten Strecken Sohlengewölbe einzubauen, wird der Hauensteintunnel ein kostspieliges Sorgenkind bleiben. Freilich, es ist sehr schwierig, vielleicht unmöglich (das kann ich nicht beurteilen), während des Betriebes solches Sohlengewölbe einzusetzen.

Aber nicht nur das, es muss die ganze Auswölbung, Obergewölbe wie Sohlengewölbe, viel stärker als es ursprünglich nötig gewesen wäre, gemacht und muss sehr gut an den Fels angeschlossen werden, denn nun sind die Bewegungen eben da, im Gestein eine Masse Gleitflächen entstanden, die innere Reibung dadurch vermindert. Das sich bewegende gelockerte Gebirge muss nun wieder zurückgestaut werden. Es muss nicht nur Verkleidungsgewölbe, sondern auch im besten Gestein bestes druckstarkes Gewölbe angewendet werden.

„Beim Hauensteintunnel sind es aber ganz besondere lokale Ursachen, wasserführende, splittrige Kalksteine mit sich erweichenden Mergeln dazwischen“, so hält man mir entgegen. Ich antworte: Eben darum wirkt hier der Gebirgsauftrieb schon bei relativ geringer Tiefe unter der Oberfläche. Eben darum hätte man schon von Anfang an den Tunnel als starke ringsum geschlossene Röhre bauen sollen.

Und die anderen grossen Tunnels werden bald ähnliches zeigen. Der Bötzberrgtunnel, obschon ursprünglich „gut“ gebaut und erst ca. 30 Jahre alt, und obschon die Wasserverhältnisse hier lange nicht so ungünstig wie im Hauenstein sind, ist in seinem Gewölbe schon schwer deformiert und steht bald nicht viel besser, als der Hauenstein. Der Mont Cenis, Gotthardtunnel, der Arlberg-, der Simplontunnel, der Weissensteintunnel, Rickentunnel etc. werden wohl alle nach einem halben Jahrhundert sich ebenso „rekonstruktionsbedürftig“ zeigen: An manchen 20 bis 40 Jahre alten tiefen Tunnels flickt man schon lange. Ein solches Werk aber war für mehr als bloss ein Jahrhundert bestimmt!

Beim Simplontunnel ist zum erstenmal ein neues Tunnelbausystem angewendet worden. Wie wir vom französisch-belgischen (Firststollen), vom englisch-österreichischen (Sohlenstollen) Tunnelbausystem sprechen, so dürfen wir jetzt auch von einem schweizerischen Tunnelbausystem reden. Das ist der Bau von zwei eingeleisigen Tunnels in einer gewissen Distanz an Stelle des einen doppelspurigen Tunnels. Das Zweitunnelsystem ist ein genialer Griff gewesen, der einzig die Durchtunnelung so enormer und so warmer Gebirgsmassen erlaubt, wie wir sie am Simplon haben. Allein ich habe Herrn Oberst Ed. Locher, dem Mitunternehmer, vor Beginn des Simplonbaues sofort meine Bedenken dahin ausgesprochen, dass der Stollen II den Tunnel I deformieren werde. Herr Locher hielt entgegen, dass auch Stollen II nachher sehr rasch ausgeweitet und ausgewölbt werden soll. (Vergl.: „Über die geologische Voraussicht beim Simplontunnel, Antwort auf die Angriffe des Herrn Nationalrat Ed. Sulzer-Ziegler, verfasst von Alb. Heim im Auftrage der geologischen Simplon-Kommission, *Eclogae Geologicae Helvetiae* Vol. VIII Nr. 4 Nov. 1904“). Allein es bleiben mir schwere Bedenken: Stollen II bleibt (wo er sich nicht rasch druckhaft zeigt) grösstenteils einige Jahre unausgewölbt, bevor auch er eingebaut wird. Die Verbindungsstücke bleiben ebenso lange unausgewölbt — wahrscheinlich so lange, bis die Lockerung zum Auswölben zwingt. Und vor Allem: Weder Tunnel I noch Stollen oder Tunnel II sind allgemein mit Sohlengewölbe bedacht, sondern nur an den „druckhaften“ — d. h. schon nach ganz kurzer Zeit fühlbar druckhaften Stellen. In der Tunnelmitte, wo man eine Wechselstelle errichten wollte, hat sich die Bewegung

bereits im ursprünglich standfesten Gebirge eingestellt. Man gesteht sich schon ein, dass man ein anderes Mal die Distanz der beiden Tunnels grösser als 17 m nehmen sollte, um Druckerscheinungen besser auszuweichen.

Überlegen wir, wie die zwei Tunnels mit den Traversen auf die Gebirgsdruckbewegungen einwirken werden. Der eine Tunnel ist rasch ausgemauert worden — gut nach den bisherigen allgemein und einzig herrschenden Ansichten, viel besser als der Gotthardtunnel. Niemand kann weder der Leitung noch der Unternehmung einen Vorwurf machen, dass sie es so und nicht anders gemacht hat. Der Stollen 17 m daneben ist unausgemauert. Der hydrostatische Gebirgsdruck wird zuerst am leichtesten gegen diesen Stollen hin Bewegungen hervorrufen, denn der ist eine Stelle ganz ohne Gegendruck. Man wird den zweiten Stollen rasch nachholen und auch auswölben. Aber ich zweifle daran, dass dies so rasch geschehen könne, dass nicht unterdessen stellenweise schon Deformationen im ersten durch das Drängen des Gesteines nach dem zweiten hin entstanden sein werden. Die Traversen werden in ihrer Umgebung die Möglichkeit von Bewegungen vermehren. Der Einbau des zweiten Tunnels wird auf druckhaftes Gebirge sich schon in weiterer Ausdehnung gefasst machen müssen, als es bei der Auswölbung des ersten fühlbar geworden war. Und nun ist immer noch in beiden Tunnels der Gebirgsauftrieb bei allen Stellen, die nicht schon während des Baues sich „druckhaft“ erwiesen haben, unberücksichtigt geblieben. Er wird sich je nach dem Gestein fühlbar machen nach 10, 20, 50, 100 Jahren, aber seine böse Wirkung wird nicht ausbleiben. Das Zweitunnelsystem ist für das Hervorrufen von Bewegungen durch den Gebirgsdruck am Anfang bis zur Vollendung beider Tunnels entschieden ungünstiger, als ein Eintunnelsystem. Nach Vollendung wird es sich vielleicht eher etwas günstiger zeigen, indem zwei wesentlich schmälere, nicht ausgewölbte Tunnelsohlen die Gebirgsbewegung wohl weniger erleichtern, als eine sehr wesentlich breitere unausgewölbte Tunnelsohle. Das Zweitunnelsystem wird aber seine Genialität nur dann auf die Dauer bewähren können, wenn beide Tunnels und ausserdem alle Traversen möglichst rasch vollständig ausgewölbt würden und zwar mit Sohlengewölbe, d. h. als geschlossene druckfeste Gewölberöhre auch im zuerst scheinbar festesten Felsen. Zudem

wird man wohl finden, dass bei einem zweiten Tunnelbau nach dem Zweitunnelsystem die Distanz der beiden Tunnels zur Erschwerung der Gebirgsbewegungen, welche vom zuerst nicht ausgemauerten ausgehen und auf den andern einwirken, grösser zu nehmen ist.

Und wenn nun nach Jahrzehnten bei den grösseren tiefen Tunnels ohne Sohlengewölbe die Übelstände stets zunehmen und „Rekonstruktion“ sich notwendig erweist, wie muss dann vorgegangen werden? Es wird sehr schwierig und sehr kostspielig werden. Aber das Unglück kann dadurch nicht vermieden werden, dass wir uns seiner Erkenntnis verschliessen. Drum reden wir offen. Wie kann man während des Betriebes Sohlengewölbe einlegen? Und dass ohne solches keine Rekonstruktion hilft, ist für mich völlig sicher. Nach noch einem halben Jahrhundert der bösen Erfahrungen wird das gewiss allgemein anerkannt sein.

Man wird vielleicht in manchen Fällen dazu gelangen, einen ganz neuen Paralleltunnel zu bauen. Die Distanz ist aber grösser, wo möglich 100 m oder mehr zu nehmen. Den neuen Tunnel wird man sofort mit Ausnahme der äussersten Teile ganz mit Sohlengewölbe und durchweg nicht nur in Verkleidungsmauer, sondern auch im festesten Fels stark druckfest ausmauern. Nun aber muss möglichst rasch der alte Tunnel auch mit Sohlengewölbe rekonstruiert werden. Der Betrieb wird unterdessen durch den neuen Tunnel geleitet. Man muss den alten, auch wenn man ihn für den Betrieb niemals mehr gebrauchen würde, vollständig druckfest neu auswölben, weil er sonst im Laufe der Zeit den neuen deformiert durch „Ansaugen“ des Gesteines nach seinem Hohlraum. Diese Arbeit wird schwieriger werden, weil das Gestein rings um den alten Tunnel gelockert ist. Aus dem einen Tunnel, der früher ohne Sohlengewölbe unter Vernachlässigung des Gebirgsauftriebes gebaut worden ist, erwächst später das Servitut, einen ganz neuen und einen fast neuen Tunnel mit Sohlengewölbe zu bauen; einzig der Gesteinsausbruch beim einen ist schon vorhanden, die ganze Auswölbung rings um das Tunnelloch aber muss neu gemacht werden.

Es gibt in gewissen Zonen der Erdrinde noch Gefahren für die Haltbarkeit eines grossen Tunnels, die durch keine Konstruktionsart überwunden werden können. Das sind die fortgehenden Dis-

lokationen in der Erdrinde. So sehr jeder Geologe die Möglichkeit von solchen zugeben wird, und so oft wir das ruckweise Fortgehen von solchen Bewegungen in der Erdrinde in den Erdbeben erkennen können, so ist doch meines Wissens in Mitteleuropa noch kein Fall einer Störung in einem Tunnel bekannt geworden, die auf dergleichen Ursachen, das ist gewissermassen auf das Fortdauern der Gebirgsbildung zurückgeführt werden müsste. In Japan hingegen sind furchtbare Zerstörungen an Eisenbahnlinien und ihren Tunnels durch Erdbeben mit dauernden Verschiebungen im Boden zu stande gekommen. Diese Gefahren werden uns am Tunnelbau nicht hindern. Und wenn sie einmal sich auch bei uns praktisch geltend machen sollten, so ist das als eine Wirkung der „force majeure“ zu taxieren, nicht wie die Deformation alter tiefer Tunnels als ein Fehler in der Konstruktion durch den Menschen.

Das Resultat meiner Erörterungen geht dahin:

Die Schwerelast des Gebirges setzt sich in einer je nach der Gebirgs- (— nicht Gesteins-) Festigkeit ungleichen durchschnittlichen Tiefe in einen allseitigen, dem hydrostatischen Druck ähnlichen Gebirgsdruck mit Auftrieb um. Tunnels, die in diese Tiefe gelegt worden sind und weiter gelegt werden, können nur dann dauernd haltbar sein, wenn sie als geschlossene Röhre mit Sohlengewölbe druckfest ausgemauert werden. Das momentane Verhalten des Gesteins ist nicht massgebend für die allmählich sich einstellenden Deformationen durch den Gebirgsdruck.

„Grosse Gebirgstunnel kann man nicht durchweg mit Sohlengewölbe bauen, das geht einfach der Kosten halber nicht.“ Das wird es sein, was man mir zu allererst entgegen wird. Ich antworte im Voraus: Wird es dann leichter sein, 50 Jahre später mehr als die doppelten Kosten nochmals zu wagen? In welche Verlegenheiten wird man dann kommen! Gewiss ist es für die Bahnbaubestrebungen ein Missgeschick, wenn ich mit meiner ganzen Auffassung von Gebirgsdruck und Gebirgsauftrieb recht habe. Allein wir können eine Schwierigkeit, die in der Natur der Sache liegt, dadurch nicht aufheben, dass wir uns ihrer Erkenntnis ver-

schliessen. Mir scheint, es wird doch vorteilhafter sein, in Zukunft die Mehrkosten zur richtigen Durchführung einer grossen Tunnelbaute zu wagen, auch wenn dadurch die Inangriffnahme etwas verzögert werden sollte, als sich den Gefahren und den furchtbaren, gegenüber dem ersten Bau verdoppelten Mühsalen und Kosten einer solchen Rekonstruktion auszusetzen. Da hilft kein kurzer durch die momentanen Vorteile beengter Blick. Es handelt sich um eine grosse Sache, die von grossen Gesichtspunkten aus beurteilt werden muss.

Mit dieser Erörterung habe ich mein Gewissen entlastet. Die Zukunft wird lehren, was wir jetzt noch nicht zu beurteilen vermögen.