bAndreae, Charles: Hundert Jahre Tunnelbau, Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich Nr. 150, auf das Jahr 1948

Hundert Jahre Schweizerischer Tunnelbau

VON

CHARLES ANDREAE

DRUCK GEBR. FRETZ AG. ZÜRICH 1948

NEUJAHRSBLATT

herausgegeben von der

Naturforschenden Gesellschaft
in Zürich

auf das Jahr 1948

150. Stück

1948

Kommissionsverlag Gebr. Fretz AG. Zürich

Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich
Jahrgang 92

Beiheft Nr. 5

Redaktion: Prof. Dr. H. Steiner, Zoologisches Institut der Universität
Künstlergasse 16, Zürich

Ausgegeben am 31. Dezember 1947

Louis Favre 1826 – 1879

Titelbild (Louis Favre) Klischee SBB

Hundert .Jahre

Schweizerischer Tunnelbau

Von

CHARLES ANDREAE

Mit 20 Abbildungen

Inhaltsverzeichnis

1. Historischer Überblick 7

2. Allgemeine Probleme des Tunnelbaues und
ihre schweizerischen Lösungen 14

3. Die grossen Alpendurchstiche 25

a) Der Gebirgsdruck 26

b) Die Wärmeverhältnisse 31

e) Die Wasserverhältnisse 39

d) Das Zweitunnelsystem 40

4. Die grossen Juradurchstiche 43

5. Schlusswort 44

Hundert Jahre
Schweizerischer Tunnelbau

Im ganzen Lande wurde im soeben vergangenen Jahre die Erinnerung an die Eröffnung der ersten schweizerischen Eisenbahn gefeiert. Die Naturforschende Gesellschaft in Zürich hat daher für ihr diesjähriges Neujahrsblatt ein Thema gewählt, das mit diesem Ereignis in Beziehung steht. Eine kurze Darstellung des schweizerischen Tunnelbaues ist besonders geeignet, einen Begriff davon zu geben, wie die Naturwissenschaft am Ausbau unseres Eisenbahnnetzes mitbeteiligt war und dabei selber wertvolle Anregungen und Aufschlüsse erhielt.

1. Historischer Überblick

Die Kunst, unterirdische Hohlräume zu erstellen, ist zwar alt. Die Entwicklung des eigentlichen Tunnelbaues kam jedoch erst mit der Eisenbahn, die Geländehindernisse, selbst ganze Gebirge, möglichst dort durchfahren will, wo es die für ihre Zwecke günstigste Trasse verlangt.

Die geographische Lage und die Bodengestaltung der Schweiz brachten es mit sich, dass ihre Eisenbahnen den Bau sehr zahlreicher Tunnel erforderten, und dass dieser Bau sich zum Teil auf eigene Art entwickelte. Schon die erste schweizerische Bahnstrecke durchfuhr bei Baden den 90 m langen Schlossbergtunnel. Heute bestehen in der Schweiz 660 Eisenbahntunnel mit einer Gesamtlänge von 292 km. Darunter sind sieben von mehr als 8 km Länge:

	Länge	Geleise	Bauzeit	Kulmination m ü. M.
Simplon I	19 803 m	1	1898-1906	704,7
Simplon II.	19 824 m	1	1912-1921*)	704,7
Gotthard	15 003 m	2	1872-1882	1154,6
Lötschberg.	14 605 m	2	1906-1912	1242,8
Ricken	8 604 m	1	1903-1910	622,0
Grenchenberg.	8 578 m	1	1911-1915	545,05
Hauensteinbasis.	8134 m	2	1912-1915	451,72

*) Mit Unterbruch durch den ersten Weltkrieg.

In der ersten Bauperiode der schweizerischen Eisenbahnen, die 1865 ihren vorläufigen Abschluss fand, waren schon zahlreiche Tunnel entstanden, worunter der 2495 m lange, in den Jahren 1854-1858 erstellte erste Hauensteintunnel, sowie der 3259 m lange «Tunnel des Loges» der Strecke Hauts-Genevais–Convers, der 1860 in Betrieb kam, die längsten waren. Der Bau dieser beiden Juratunnel bot noch ganz erhebliche Schwierigkeiten. Diese Epoche war die schweizerische Lehrzeit. Die Ingenieure, die unsere Tunnel in jener Zeit bauten, kamen aus dem Ausland, wo der Tunnelbau früher begonnen hatte. Dieser selbst war noch im Stadium des Handwerkes.

Schon sieben Jahre nach Abschluss dieser ersten Periode, im Jahre 1872, begann mit der Inangriffnahme des 15 km langen Gotthardtunnels — für die Schweiz sprunghaft — eine zweite Etappe, die die eigentliche technische Entwicklung des Tunnelbaues brachte.

Vom ersten Hauensteintunnel zum Gotthard war technisch ein grosser Sprung. Der Übergang erfolgte im Ausland durch die im Jahre 1857 begonnene und 1871 vollendete Erstellung des 12 km langen Mont-Cenis-Tunnels, wo der Turiner Ingenieur SOMMEILLER zum ersten Male Bohrmaschinen für den Stollenvortrieb verwendete. Es waren Druckluft-Stossbohrmaschinen, zu deren Erfindung die Studien über die Anwendung von Druckluft zur Kraftübertragung, die der Genfer Physiker Professor DANIEL COLLADON im .Jahre 1855 der Turiner Akademie der Wissenschaften unterbreitet hatte, die Veranlassung bildeten.

Die Erfahrungen des Mont-Cenis-Tunnels gaben in der Schweiz den Befürwortern einer Nord-Süd-Verbindung durch die Alpen neuen Impuls. In den Jahren 1869-1871 kam der Staatsvertrag der Schweiz mit Italien und dem neugegründeten Deutschen Reich betreffend den Bau der Gotthardbahn (GB) zustande, und am 7. August 1872 wurde die Erstellung des Gotthardtunnels an den Genfer Unternehmer Louis FAVRE vergeben (Titelbild). Es brauchte damals Mut, ein solches Werk auf eigene Gefahr zu unternehmen. Man muss an den Stand der Tunneltechnik zu jener Zeit, die noch kaum aus dem Handwerksstadium herausgewachsen war, sowie an die damaligen Kenntnisse betreffend den Aufbau der Schweizer Alpen, die Druck-, Wasser-und Wärmeverhältnisse in ihrem Innern, zurückdenken! Wohl war SOMMEILLER am Mont-Cenis vorangegangen. Er hatte aber günstige Verhältnisse angetroffen, deren Wiederholung im Zentralmassiv ihm niemand zusichern konnte.

Obschon 3 km länger als der Mont-Cenis, kostete der Gotthardtunnel 8 Millionen weniger als jener, 61 gegenüber 69 Millionen Franken. Er wurde am 29. Februar 1880 durchgeschlagen und am 1. Juni 1882 eröffnet. Der Bau hatte 10 Jahre gedauert (Mont-Cenis 14 Jahre). Leider erlebte FAVRE den Durchschlag nicht mehr. Anstrengung und Sorgen hatten seine Gesundheit untergraben. Er starb am 19. Juli 1879 an einem im Tunnel — auf Seite Göschenen — erlittenen Schlaganfall. Die Arbeiten wurden für die

Erbschaft von den beiden Oberingenieuren FAVRE'S fortgeführt. F. LUSSER auf der Südseite, E. v. STOCKALPER auf der Nordseite. Die schnellere Vollendung und die niedrigeren Kosten waren die Folge von Verbesserungen der Bohrmaschinen — ebenfalls Druckluftmaschinen — und der Verwendung von Dynamit. Im Mont-Cenis war noch ausschliesslich mit Schwarzpulver geschossen worden. Die im Gotthardtunnel angewandte Bauweise dagegen bedeutete keinen Fortschritt gegenüber dem Mont-Cenis, im Gegenteil. Dieser war mit Sohlstollen aufgefahren und von diesem aus «belgisch» abgebaut worden. FAVRE dagegen ging mit Firststollen vor, was sich so schlecht bewährte, dass seither alle langen Tunnel wieder mit Sohlstollen aufgefahren wurden. Der Bau des Gotthardtunnels vermittelte überhaupt reiche Erfahrungen für den Tunnelbau. Er klärte u. a. auch über die Bedürfnisse der Lüftung und Hygiene auf. Sie waren hier noch viel zu wenig berücksichtigt worden, was sich auf die Gesundheit der Arbeiter sehr ungünstig auswirkte. Besonders wertvoll waren die Beobachtungen des Tunnelgeologen J. STAPFF, der u. a. die Gesteinstemperaturen regelmässig feststellte. Seine zuverlässigen Aufzeichnungen bildeten eine Grundlage für alle späteren, wissenschaftlichen Untersuchungen der Temperaturverhältnisse im Innern der Gebirge.

Die im Jahre 1882 eröffneten Linien der GB zählten im ganzen 62 Tunnel mit einer Gesamtlänge von 41,5 km (inkl. Gotthardtunnel), darunter die damals epochemachenden sieben Kehrtunnel mit Richtungsänderungen von 200° (Leggisteintunnel ob Wassen) bis 280° (Piano- Tondo- und Travitunnel in der Biaschina). In den vier Kehrtunneln der Südseite, im Monte-Ceneri und im Pfaffensprung-Kehrtunnel ob Gurtnellen kamen auch Bohrmaschinen zur Anwendung, im letztgenannten zum erstenmal in der Schweiz Brandtsche Druckwasser-Drehbohrmaschinen, wie sie später im Simplon- und im Albulatunnel verwendet wurden. Das Problem der Kehrtunnel war kein tunnelbautechnisches, sondern ein geometrisches.

Das Zustandekommen der GB veranlasste den Bau einer Reihe neuer Linien mit zahlreichen Tunneln, worunter der 2526 m lange Bötzbergtunnel (1875), die Tunnel der bernischen Jurabahnen (1872-1877) u. a. m. 1888 bis 1893 wurde die rechtsufrige Zürichseelinie gebaut mit ihren beiden Tunneln unter der Stadt Zürich. Es waren die ersten langen Tunnel in lockerem, mildem Gebirge in der Schweiz. Oberingenieur R. WEBER bildete hier seine Firstschlitzmethode aus, die jedoch heute nur noch in standfesten oder gebrächem Gebirge angewendet wird. In jene Periode fällt auch der Bau des 1897 eröffneten, 3359 m langen Albistunnels.

Die glückliche Vollendung des Gotthardtunnels förderte die Bestrebungen nach einem zweiten, westlichen Alpendurchstich. Nach Verhandlungen mit Italien kam es im Jahre 1895 zum Staatsvertrag, durch den die Jura-SimplonBahn (JS) ermächtigt wurde, den Simplondurchstich als Basistunnel zu erstellen, und zwar so, dass mehr als dessen halbe Länge jenseits unserer Lan-

desgrenze liegen musste. Der Bau wurde im Jahre 1898 durch die Simplonbaugesellschaft BRANDT, BRANDAU & Cie. als Bauunternehmung in Angriff genommen[1]).

Der Bau des Simplontunnels fiel in die Zeit, in der der Tunnelbau im In- und Ausland immer mehr dazu überging, seine bisher nur empirisch entwickelten Methoden wissenschaftlich-systematisch zu überprüfen und seine bisherigen Erfahrungen ebenso auszuwerten. Die grossen Alpendurchstiche, vor allem der Simplontunnel, der heute noch der längste und tiefste Gebirgstunnel ist, stellten ihre Erbauer vor besondere Probleme, mit denen sich der Tunnelbau bisher anderswo nicht auseinanderzusetzen hatte. Manche dieser Probleme waren naturwissenschaftlicher Art, so dass die Naturwissenschaft in weitgehendem Masse zur Mitarbeit herangezogen werden musste, wobei sie ihrerseits durch den Tunnelbau mancherlei Anregung, und Förderung erhielt, sowohl durch dessen Problemstellungen, als auch durch die Aufschlüsse und den Einblick in das Erdinnere, die ihr der Bau gewährte.

Aus Gründen, auf die wir später zu sprechen kommen werden, wurde der Simplontunnel nicht als zweispurige Tunnelröhre, sondern als Zwillingstunnel erstellt. Vollendet wurde Tunnel I (der östliche) mit unausgebautem, aber durchgeschlagenem Parallelstollen 11 im Jahre 1906 (Betriebseröffnung am 1. Juni). Der Richtstollen, der nach den Erfahrungen im Gotthard nun wieder als Sohlstollen vorgetrieben wurde, wurde mit Brandtschen Drehbohrmaschinen aufgefahren, bei denen gezahnte Hohlbohrer durch Druckwasser von 80-100 at an das Gestein gepresst und in langsame Drehbewegung versetzt wurden. Mit diesen Maschinen wurde ein täglicher Fortschritt von 10,41m, beide Seiten zusammengenommen, im Mittel erzielt, während er im Gotthard nur 6,02 m betragen hatte.

Tunnel II wurde in den Jahren 1912-1921 (mit Unterbrüchen infolge des ersten Weltkrieges) durch die SBB, an die im Jahre 1903 die JS übergegangen war, in Regie ausgebaut. Dafür richteten die SBB in Bern eine eigene Bauabteilung ein, zu deren Leiter Ingenieur ROTHPLETZ, ehemaliger Ingenieur der Simplonunternehmung und Oberingenieur der Unternehmung für den Lötschbergtunnel, zu jener Zeit Mitglied der Unternehmung für den Grenchenbergtunnel, eingesetzt wurde[2]). Die Kosten der Arbeiten des Regievertrages beliefen sich auf 26,2 Millionen (Voranschlag 27,5 Millionen). Der gesamte Simplontunnel steht heute mit dem Oberbau und den Generalunkosten der Bauleitung, aber ohne die Elektrifikation, mit 113,2 Millionen im Baukonto der SBB.

---

[1] Ausser den beiden Deutschen BRANDT und BRANDAU (beide ehemalige Studierende des Eidg. Polytechnikums) gehörten der Gesellschaft an: Die Bank von Winterthur, die Firmen Locher & Cie., Zürich, und Gebr. Sulzer, Winterthur.

[2] Dr. h. c. F. ROTHERTZ ist der einzige Ingenieur, der den ganzen Simplontunnelbau (Tunnel I und II) von Anfang bis zu Ende mitmachte.

Gleichzeitig mit dem Bau des ersten Simplontunnels erfolgte der Bau der schmalspurigen Albulabahn mit ihrem 5865 m langen Scheiteltunnel, dessen Richtstollen ebenfalls mit Brandtschen Bohrmaschinen aufgefahren wurde, und mit ihren zahlreichen Kehr- und Lehnentunneln.

In den Jahren 1903-1910 entstand die Bodensee–Toggenburg-Bahn (BT) mit zum Teil bedeutenden Tunneln, wobei im Wasserfluhtunnel für den Richtstollen Druckluft-Stossbohrmaschinen (System Bechem-Keetmann) und in der Ausweitung — gleichzeitig wie im Lötschbergtunnel — zum erstenmal bei uns Druckluft-Bohrhämmer, d. h. kleine, von Hand gehaltene und geführte Schlagbohrgeräte, zur Verwendung kamen. Bohrmaschinen BechemKeetmann arbeiteten auch auf der Südseite des 3700 m langen Weissensteintunnels (1903-1908), zum Teil auch auf leichten Gestellen im Vollausbruch. Zu jener Zeit erstellten auch die SBB den 8604 m langen Rickentunnel. Hier stiessen Vortrieb und Ausweitung wiederholt auf Grubengas, als dessen Quelle in der Molasse eingelagerte Braunkohlennester angenommen wurden. Einige Gasquellen versiegten nach kurzer Zeit. In den meisten Fällen genügte eine kräftige Ventilation. Bei km 3,8 ab Portal Kaltbronn stiess jedoch der Stollen auf eine stärkere Gasausströmung, die einen längeren Unterbruch des Vortriebes verursachte. Zur Überwindung dieser Schwierigkeit mussten die Erfahrungen und Hilfsmittel des Bergbaues herangezogen werden. Der Vortrieb erfolgte durchweg von Hand, zum Teil mit «Bohrrätschen», da sich mechanische Bohrung in der untern Molasse, die der Tunnel durchfährt, als unzweckmässig erwies. (Die Unternehmung hatte die ganze Installation und die Maschinen des Albulatunnels erworben und aufgestellt.)

1906-1913 kam die Berner Alpenbahn (BLS) mit dem 14 605 m langen Lötschbergtunnel. Ursprünglich hätte dieser 800 m kürzer sein sollen. Die Katastrophe vom 24. Juli 1908 unter dem Gasterntal zwang jedoch, die geplante Trasse zu verlassen und die Gefahrzone zu umfahren, wodurch der Tunnel verlängert wurde. Nach dem offiziellen geologischen Gutachten von 1900 hätte der Tunnel unter dem Gasterntal noch von etwa 100 m festem Fels überlagert sein sollen. Statt dessen drang der Richtstollen bei km 2,675 ab NP plötzlich in das Alluvium. Es erfolgte ein Einbruch von mit Wasser durchtränktem Sand und Kies, der den Stollen auf etwa 1,5 km Länge wieder zufüllte. Die ganze Mannschaft vor Ort, 25 Mann, ging dabei verloren. Sehr bald sank der Wasserschwall, und aus dem Tunnel floss wieder die gleiche Wassermenge wie vorher (ca. 70 l/s). Es war nicht die Kander, die eingebrochen war, sondern ein unterirdischer Murgang. Wie die Geologen HEIM, SCHMIDT und BUXTORF feststellten, hatten die Experten von 1900, denen zu ihrer Arbeit zu wenig Zeit zur Verfügung stand, übersehen, dass die Kander in der sogenannten «Klos» ob Kandersteg nicht über anstehenden Fels schäumt, sondern über einen Bergsturz, der das Gasterntal, dessen Sohle ursprünglich etwa 200 m tiefer lag, abgesperrt hatte, worauf es wieder aufgefüllt wurde. An eine Auskolkung durch den Kandergletscher dachte man

Abb. 1
Doppelspuriger Lehnentunnel der Lötschbergbahn, österreichische Bauweise

nicht, da die Möglichkeit der Gletschererosion damals noch bestritten wurde[3]). Der Lötschbergtunnel kostete 52,2 Millionen.

Technisch-historisch war der Lötschbergdurchstich insofern bedeutungsvoll, als hier der Stollenvortrieb wieder mit Druckluft-Bohrmaschinen erfolgte (auf der Nordseite System Meyer, auf der Südseite System Ingersoll). Der tägliche Fortschritt betrug dabei im Mittel, beide Seiten zusammen, 12,17 m, also etwas mehr als im Simplontunnel. Der Dynamitverbrauch pro Kubikmeter Stollenausbruch war allerdings etwas kleiner, das Gestein also durchschnittlich etwas weniger hart als dort. Die Druckluftmaschine war somit der Brandtschen nicht unbedingt überlegen, jedoch ebenbürtig. Nun ist es aber wesentlich leichter und billiger, Druckluft von 6-7 at zu erzeugen und an die Verwendungsstellen im Tunnel zu bringen, als Druckwasser von 80-100 at, weshalb von da an die Druckluft als Triebmittel für Bohrgeräte das Wasser verdrängte. Was der Druckluft den Vorrang endgültig sicherte, ist die Möglichkeit, sie auch für die mechanische Bohrung im Vollausbruch zu verwenden. Im Lötschbergtunnel wurden hiezu zuerst, wie vorher schon im Weissensteintunnel, Druckluftbohrmaschinen leichterer Konstruktion ver-

---

[3] Die Studien für die Urseren-Kraftwerke haben in jüngster Zeit gezeigt, dass der Gotthardtunnel nur durch ein gütiges Geschick vor einer ähnlichen Katastrophe bewahrt wurde, indem die Auskolkung durch Gletscher und das Alluvium bis nur 30 m an den Tunnel heranreichen.

wendet. Bald kam aber um jene Zeit, wie schon angedeutet, der pneumatische Bohrhammer auf, womit die Druckluft endgültig die Oberhand gewann und behielt. So hat sich die Idee und Erfindung des Physikers COLLADON während bald einem Jahrhundert durchgesetzt und bewährt. Die Druckluft wird ihren Platz so lange behaupten, bis die elektrische Bohrmaschine ihr den Rang abläuft. Soweit ist es aber trotz vieler Versuche noch nicht. In kurzen Tunneln, deren Vortrieb nicht so grosse Tagesfortschritte erfordert, wie sie bei langen Durchstichen verlangt werden, erfolgt heutzutage auch der Vortrieb in Fels mit gutem wirtschaftlichem Erfolg ausschliesslich mit Bohrhämmern. Der Hauensteinbasistunnel (1912-1915) erbrachte sogar den Beweis, dass in weichem Gestein die in den Alpendurchstichen mit Bohrmaschinen erzielten Fortschritte ebenfalls erreicht und sogar übertroffen werden können, weil der Wiederbeginn der Bohrung nach der Sprengung nicht die Beendigung der Schutterung abzuwarten braucht, da kein Bohrwagen oder Bohrgestell angefahren werden muss. In hartem Gestein, besonders in den Alpen, werden für längere Durchstiche vor Ort doch wieder stärkere, lafettierte Bohrgeräte notwendig sein. Ein Vorteil der Druckluft ist endlich auch, dass durch den Auspuff der Maschinen und Bohrhämmer die Luftverhältnisse vor Ort und in den hintern Arbeitsstrecken verbessert werden. Ein Nachteil der Druckluft dagegen ist leider die durch sie erhöhte Gefahr der Silikose, der durch Nassbohren entgegengewirkt werden muss.

Die beiden Zufahrtsrampen zum Lötschbergtunnel vermittelten mit ihren 33 Tunneln (darunter ein Kehrtunnel) auch reiche Erfahrungen betreffend den Bau von Lehnentunneln (Abb. 1). Sechs dieser Rampentunnel wurden ebenfalls mechanisch aufgefahren.

Zur Verbesserung, ihrer nördlichen Zufahrten erstellte die BLS in den Jahren 1911-1915 den 8578 m langen Grenchenbergtunnel. Die Juratunnel, besonders die Basistunnel, geben, wie auch der gleichzeitig zur Verbesserung der Gotthardzufahrt erstellte Hauenstein-Basistunnel bestätigte, dem Ingenieur und dem Geologen besondere Probleme auf, u. a. wegen der Wasserverhältnisse im Berginnern, auf die wir noch zurückkommen werden.

Mit dem Ausbau des zweiten Simplontunnels fand der Bau grosser Eisenbahntunnel in der Schweiz vorläufig einen Abschluss, nicht aber der Tunnelbau überhaupt. In den Jahren 1919-1925 wurde in Zürich die linksufrige Seelinie der SBB verlegt, was die Erstellung des Wollishofer- und des Ulmbergtunnels mit anschliessendem Sihl- und Wiedikonertunnel erforderte. Die beiden letzteren wurden in offener Baugrube erstellt, waren also nicht eigentliche Tunnelbauten. Dagegen warf die Ausführung des Ulmberg- und des Wollishofertunnels, die in Moräne bei kleiner Überlagerung (höchste Überlagerung des Ulmbergtunnels 20 m) Gebäude und öffentliche Strassen unterfahren, eigene Probleme auf, über deren Lösung in anderem Zusammenhang berichtet werden soll. Die jüngsten Eisenbahntunnel sind die für das zweite Geleise Brunnen—Flüelen, die zum Teil noch im Bau sind, und die der Genfer Verbindungsbahn.

2. Allgemeine Probleme des Tunnelbaues und ihre schweizerischen Lösungen

Die Aufgabe des Tunnelbaues besteht darin, einen unterirdischen Hohlraum von bestimmtem Querschnitt in genau vorgeschriebener Lage und Richtung so durch ein Gebirge zu legen, dass seine Lage, Richtung und Form d a u e r n d erhalten bleiben. Das unterscheidet den Tunnelbau vom Bergbau, dessen Aufgabe es ist, bestimmten Gebirgsschichten zu folgen, um sie herauszunehmen. Den Bergingenieur interessiert das herausgeholte Material, den Tunnelingenieur der geschaffene Hohlraum, das unterirdische B a u w e r k . Das ist ein grundsätzlicher Unterschied, und die technischen Probleme liegen anders. Dass dies erst verhältnismässig spät erkannt wurde und beim Bau der Eisenbahntunnel zu lange an den Bräuchen des Bergbaues geklebt wurde, hat sich später an vielen Tunneln gerächt.

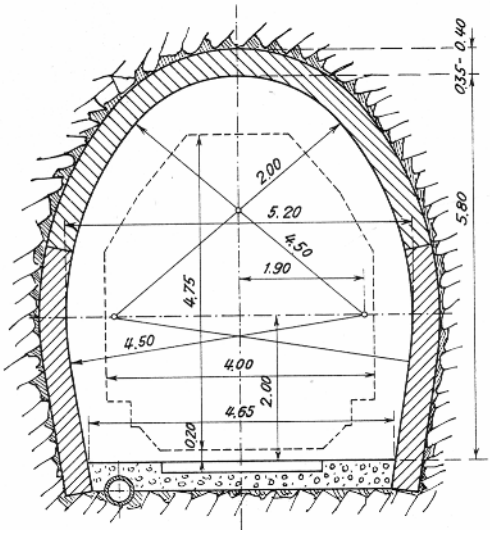

Abb. 2
Querschnitt eines einspurigen Tunnels (Ricken) mit Lichtraumprofil

Lage, Richtung und Neigung eines Tunnels sind durch die Linienführung der Bahn bedingt. Für die Querschnittform sind technisch zwei Faktoren massgebend: Das Lichtraumprofil der Bahn, das für Normalspurbahnen international festgelegt ist (Abb. 2), und die statische Beanspruchung der Tunnelmauerung. In standfestem Gestein können kurze Tunnel unverkleidet gelassen werden. In gebrächem oder gar lockerem Gebirge muss jedoch eine Verkleidungs- oder Stützmauerung eingebaut werden. Lange Tunnel werden zweckmässig auf ihre ganze Länge verkleidet, auch in festem Gestein, da ein regelmässiges Beobachten des Felsens nach möglichen Ablösungen während des Betriebes zu zeitraubend, kostspielig und unsicher ist. In homogenem,

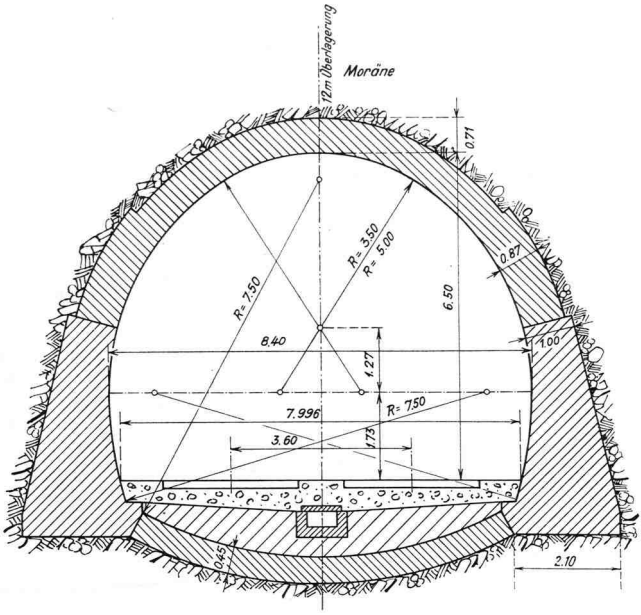

Abb. 3
Querschnitt eines Tunnels mit Druckliniengewölbe (Ulmberg)

lockerem Gebirge in geringer Tiefe lässt sich die Beanspruchung der Tunnelröhre, d. h. ihres Mauerwerkes, nach den Regeln der Erddrucktheorie berechnen und das Tunnelprofil entsprechend formen (Abb. 3). In grösserer Tiefe wird jedoch die Berechnung schon problematischer, da es schwierig ist, die Grösse der am Druck beteiligten Gebirgsmassen zu bestimmen. Hiefür etwa vorgeschlagene Methoden (BIERBAUMER, KOMMERELL u. a.) versagen in der Praxis zum mindesten quantitativ. Qualitativ geben sie immerhin ein grundsätzliches Bild des Kräftespieles in der Tunnelmauerung, das gestattet, bei etwaigen Deformationen und Schäden auf die einwirkenden Kräfte zurück-zuschliessen und damit auf die Druckursache. In unhomogenem Gebirge, das im Tunnelbau die Regel bildet, hört jegliche zuverlässige statische Berechnung auf. In gebrächem oder lockerem Gebirge treten Druckkräfte von sehr verschiedener Grösse und Richtung auf. Je nach der örtlichen Beschaffenheit des Gebirges können sie konzentriert oder verteilt, quer, schief oder parallel zur Tunnelachse wirken, und mit veränderlichen Angriffspunkten. Sie sind auch bei guter geologischer Prognose schwer vorauszubestimmen; denn sie sind veränderlich mit der Zeit, mit dem Feuchtigkeitsgehalt (also mitunter mit der Jahreszeit) und — was wichtig ist — auch mit der gewählten Baumethode und mit der Geschicklichkeit des Ausführenden. Dazu kommt, dass im Bahnbetrieb die durch die Züge verursachten Erschütterungen -die Beanspruchung der Tunnelröhre erhöhen. Sie können in Gebirge, das zu Bewegung neigt, solche auch nachträglich noch auslösen. Führt man jedoch unter Annahme ver-

nünftigerweise möglicher äusserer Kräfte eine statische Berechnung der normalen, üblichen Tunnelprofile durch, so findet man, dass diese nur unter Inanspruchnahme von passivem Erd- bzw. Gebirgsdruck stabil sind, d. h. dass die Tunnelverkleidung stets satt an das Gebirge angemauert sein muss. Das unvermeidliche «Überprofil» darf nicht hohl gelassen oder trocken ausgepackt («versetzt»), sondern muss gut mit Mörtelmauerwerk oder Beton ausgefüllt werden. Im übrigen beruht die Dimensionierung und zum Teil auch die Formgebung der Tunnelprofile weitgehend auf der praktischen Erfahrung des Ingenieurs. Die Unsicherheit betreffend die wirkliche Beanspruchung des Tunnelmauerwerkes führt auch dazu, dort, wo es sich nicht um blosse Verkleidung zum Schutze des Gebirges gegen Verwitterung bzw. des Hohlraumes gegen örtliche Ablösungen handelt, mit geschlossenen Profilen, also mit Sohlgewölbe, nicht zu sehr zu sparen. Es herrschte aus dem gleichen Grund in der älteren Tunnelpraxis die Tendenz, die Verkleidung nicht zu starr und zu monolithisch zu gestalten, um ihr ein Anpassen an die Drucklinie vor dem vollständigen Erhärten des Mörtels zu ermöglichen. Die uns vorangegangene Generation der Tunnelbauer ging sogar so weit, den Portlandzement für die Tunnelmauerung abzulehnen, weil er zu rasch erhärte und die Tunnelröhre an der Annahme ihrer durch die Spannungsverhältnisse natürlich gegebenen Form hindere. So wurde noch der erste Simplontunnel in Mörtel aus hydraulischem Kalk gemauert. Das war übertrieben. In den Strecken mit Gebirgsdruck wurde dort vielfach der zu lange plastisch gebliebene und überhaupt zu wenig druckfeste Kalkmörtel aus den Fugen gepresst, wodurch Pressfugen und Brüche entstanden. Ob sich allerdings das heutige andere Extrem, die Tunnelverkleidung mit Ausnahme des Gewölbescheitels in Zementbeton auszuführen, auf die Dauer besser bewähren wird, kann erst die Zukunft lehren. Der Zustand einiger älterer betonierter Tunnel berechtigt zu dieser Frage.

Je länger ein Tunnel ist, und je tiefer er unter die Erdoberfläche dringt, desto notwendiger wird schon bei der Projektierung die Mitwirkung des Geologen. Dabei muss diesem von Auftraggeberseite zu seiner Arbeit die notwendige Zeit und der erforderliche Kredit eingeräumt werden. Das ist —leider gerade bei den grossen Durchstichen gelegentlich übersehen worden. So lange es sich nur um ein generelles Vorprojekt handelte, dessen Finanzierung und Ausführung noch unsicher war, scheute man die Ausgabe. Später, wenn der Bau beschlossen war, eilte dessen Inangriffnahme, und man begnügte sich in einigen Fällen mit generellen Gutachten aus der Zeit des Vorprojektes, die sich nicht einmal immer auf die endgültige Trasse bezogen, und für die übrigens der Auftrag, bzw. die Expertenfragen nicht immer sachgemäss gestellt worden waren. Wenn dann die Prognosen bei der Ausführung des Tunnels nicht stimmten, so entstanden in manchen Fällen Spannungen, die bei richtigem Vorgehen im Interesse beider Teile vermieden worden wären. Es sei diesbezüglich an die Kontroversen beim Bau des Simplontunnels erinnert und an manche Überraschungen, die der

Lötschberg- und andere Tunnel brachten. Im Jahre 1907 beauftragte das «Splügen-Comite» die Geologen C. SCHMIDT (Basel) und A. STELLA (Turin) mit der geologischen Prognose für den Splügentunnel. Für die Untersuchung der thermischen Verhältnisse wurde noch der kürzlich verstorbene Professor J. KÖNIGSBERGER aus Freiburg i. Br. beigezogen. Der Bericht dieser Experten wurde 1911 veröffentlicht. Professor SCHMIDT äusserte sich einige Zeit darauf zu mir: «Wenn dieses Mal die Prognose nicht stimmt, dann darf hier zum erstenmal die Geologie dafür verantwortlich gemacht werden; denn man hat uns hier zum erstenmal die nötige Zeit und den erforderlichen Kredit eingeräumt, um unsere Arbeit gründlich zu machen.» Der Tunnel ist leider bis heute nicht ausgeführt worden. Bei der Beurteilung der geologischen Prognosen für die grossen Durchstiche darf auch nicht vergessen werden, dass vieles, was den Aufbau unserer Gebirge, sowie ihre thermischen und hydrologischen Verhältnisse anbelangt, der Geologie erst durch die Aufschlüsse dieser Durchstiche selber bekannt wurde. Es sei diesbezüglich auf die zahlreichen geologischen Veröffentlichungen hingewiesen, die zum Beispiel der Simplontunnel veranlasste (SCHMIDT, HEIM, SCHARDT, LUGEON u. a.), sowie auf die 1916 erschienene Publikation von Professor BUXTORF (Basel) über Prognosen und Befunde beim Hauensteinbasis- und Grenchenbergtunnel [4]).

Wichtig ist der Auftrag, der dem Geologen erteilt wird. Es ist zwar bequem aber falsch, diesen allgemein mit der «Begutachtung eines Projektes» zu beauftragen, wie das so oft der Fall war. Der Ingenieur muss über bestimmte Fragen orientiert werden, die er präzis stellen muss, ansonst er Gefahr läuft, gerade hierüber zu wenig zu vernehmen und dafür anderes, wofür nicht der Geologe, sondern er selber zuständig ist. Typisch dafür war das Gutachten von 1900 betreffend Lötschberg- und Wildstrubeltunnel der Geologen v. FELLENBERG, SCHARDT und KISSLING. Die politische Propaganda für den Lötschberg zitierte immer wieder für ihre Zwecke den Passus aus diesem Gutachten, in dem es hiess, die steile Schichtung der Gesteine im Lötschberg sei für die Bohrung günstiger als die flache Neigung der Schichten im Wildstrubel. Nun sind steil fallende und senkrecht zur Tunnelrichtung streichende Schichten für den Vortrieb des Richtstollens tatsächlich viel günstiger als horizontale Schichten, nicht aber für den Vollausbruch. Ein typisches Beispiel dafür lieferte der Simplontunnel. Auf der Nordseite streichen auf den ersten 4 km steil aufgerichtete Kalkphyllite beinahe senkrecht zur Tunnelachse (günstig für den Vortrieb). Auf der Südseite liegen, ebenfalls auf den ersten 4 km, die Antigoriogneise im Tunnelhorizont beinahe horizontal (also ungünstig für den Vortrieb). Der Vollausbruch erforderte auf der Nordseite auf dieser Strecke keinen Holzeinbau, während die Südseite kräftige Zimmerung verlangte. Trotzdem kam auf der Nordseite der Kubikmeter Vollausbruch teurer zu stehen als auf der Südseite, wo die Wirkung der Sprengschüsse, dank der horizontalen Schichtung, wobei

[4] Verhandlungen der N.F.G. Basel, Band XXVII, 1916.

alles fast von selber herunterkam, viel grösser war. Nun spielt wirtschaftlich der Vollausbruch, dessen Kubatur weit grösser ist, eine bedeutendere Rolle als der Vortriebstollen, ganz besonders in einem zweispurigen Eisenbahntunnel. Die technischen Vor- und Nachteile bestimmter geologischer Verhältnisse zu kennen ist Sache des Ingenieurs. Dieser muss vor allem über die Gesteinsfolge, die Lagerung und Struktur der Gesteine, über die Wasservorkommnisse und, bei tiefliegenden Tunneln, über die Faktoren, die die Temperaturverhältnisse beeinflussen können, orientiert werden. Es ist dann an ihm, diese Verhältnisse technisch zu bewerten. Die Verantwortung hiefür kann er nicht auf den Geologen abwälzen.

Bei grössern Tunneln ist die Rolle des Geologen mit der Prognose noch nicht ausgespielt. Der Bau muss ebenfalls vom Geologen verfolgt werden. Die vorgefundenen wirklichen Verhältnisse müssen regelmässig und systematisch festgestellt und registriert werden, einerseits um den Tunnelbau selbst vor Überraschungen zu schützen, andererseits um die Geologie im höchsteigenen Interesse der Technik zu fördern. Der Tunnelbau ist der Wissenschaft diesen Tribut schuldig.

Damit sind wir beim eigentlichen Tunnelbau und seinen Problemen angelangt. Es ist hier nicht der Ort, auf die geometrischen und geodätischen Aufgaben der Richtungs-, Höhen- und Längenbestimmung einzutreten. Es ist dies ein eigenes Sondergebiet. Wir verzichten auch darauf, die rein technisch-wirtschaftlichen Probleme der Bohrung, Schutterung und Förderung zu besprechen, worüber zahlreiche Veröffentlichungen vorliegen. Es sind grösstenteils Probleme der Maschinentechnik und der Organisation. Wir beschränken uns auf die Aufgaben der eigentlichen Tunnelbaukunst und Tunnelbauwissenschaft.

Durch standfestes Gebirge, das heisst durch festen Fels, einen Stollen oder Tunnel zu treiben, ist eine einfache Angelegenheit, die die heutige Technik immer mehr zu mechanisieren bestrebt ist. Wenn von Tunnelbaukunst die Rede ist, so denkt man dabei hauptsächlich an die kunstgerechte Erstellung von Tunneln in gebrächem, rolligem oder gar schwimmendem Gebirge, das heisst in solchem, bei dessen Durchörterung Gleichgewichtsstörungen erfolgen.

Der Ausbruchquerschnitt eines eingeleisigen Normalspurtunnels beträgt 35-50 m^2, der eines doppelspurigen 55-70 m^2, je nach der Stärke seiner Verkleidung. Aus wirtschaftlichen und technischen Gründen wird man bei langen Tunneln nicht mit dem ganzen Querschnitt gleichzeitig vorgehen, sondern zuerst einen Richtstollen vortreiben und von ihm aus den Vollausbruch in mehreren Phasen ausführen. Der Richtstollen ist bei langen Tunneln notwendig für die Richtungs- und Lagebestimmung des Vollausbruches und der Mauerung, also für die Absteckung. Das Vorgehen mit Richtstollen gestattet eine raschere Ausführung des Tunnels. Die Schutterung von 7-9 m^3 Sprenggut im Stollen erfordert weniger Zeit als die grössere Menge, die

beim Abschiessen des ganzen Querschnittes anfällt. Die Vortriebbohrung kann in kürzerer Zeit wieder einsetzen. Auch in lockerem Gebirge, das eine Zimmerung erfordert, kommt der kleine Stollen rascher vorwärts. Sobald der Stollen eine genügende Länge erreicht hat, bietet er für den Vollausbruch so viele Angriffspunkte, dass bei richtiger Organisation dieser mit dem schnellsten Vortriebtempo des Stollens Schritt halten kann, während der Tunnelquerschnitt als Arbeitsfläche bei weitem nicht Raum für die gleiche Anzahl Arbeiter gewährt. Die aufeinanderfolgenden Ausbruchstadien sind so anzuordnen, dass jedes für die folgenden Flächen freilegt, die die Verspannung des Gesteins vermindern und die Sprengwirkung erhöhen. Der Richtstollen dient zugleich als Sonde. Er stösst zuerst auf etwaige schwierige Stellen. Wenn solche seinen Fortschritt hemmen, so stehen deswegen nicht die ganzen Arbeiten still. Für die hintern Arbeiten können rechtzeitig die notwendigen Massnahmen getroffen werden.

Wichtig ist nun die Reihenfolge der hintern Arbeiten, die sogenannte Bauweise.

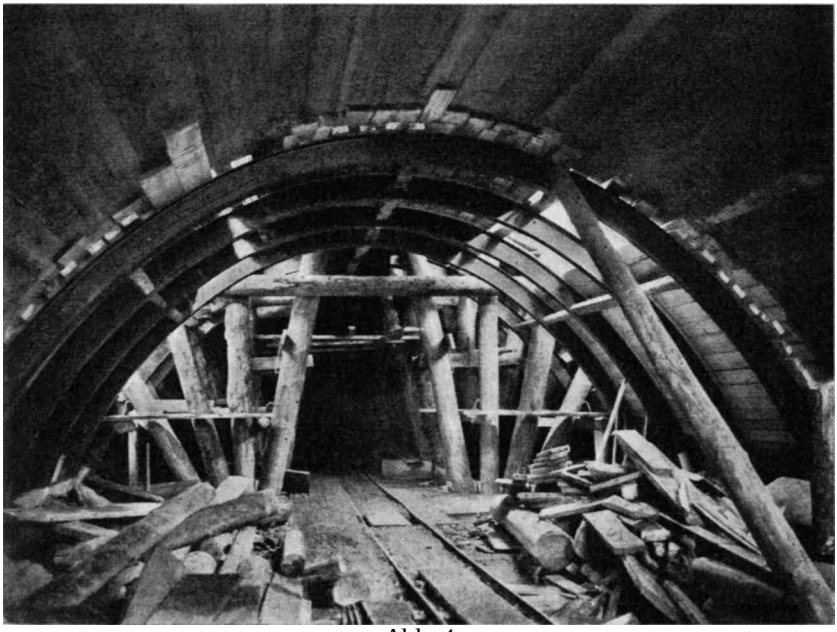

Abb. 4
Ulmbergtunnel (Nordende), belgische Bauweise

Die geographische Lage unseres Landes brachte es mit sich, dass die ausländischen Ingenieure und Techniker, die die Tunnel der ersten Bauperiode unserer Bahnen erstellten, sowohl aus Westeuropa, wie aus Deutschland und Österreich kamen, wobei sie die bei ihnen gebräuchlichen und bevor-

zugten Methoden mitbrachten. Das französische Sprachgebiet bevorzugte damals die sogenannte belgische Bauweise, bei der nach erfolgtem Kalottenausbruch zuerst das Firstgewölbe eingezogen und erst hierauf die Strossen abgebaut und die Widerlager eingebaut werden, wobei das Gewölbe unterfangen werden muss (Abb. 4). Im deutschsprechenden Teil Europas hielt man (zum Teil unter dem Einfluss von Rziha) starr an der sogenannten österreichischen Bauweise fest, wobei vorerst das ganze Profil ausgebrochen, und erst hierauf die Mauerung, mit den Widerlagern beginnend, in Angriff genommen wird (Abb. 1). Bei der österreichischen Bauweise ist der Sohlstollen als Richtstollen das Gegebene, bei der belgischen Bauweise kann der Richtstollen sowohl in der First angeordnet werden, was bei kurzen Tunneln das Zweckmässige ist (zum Beispiel Ulmbergtunnel), als auch als Sohlstollen, wobei von Aufbrüchen aus sekundäre Firststollenstrecken vorgetrieben werden, von denen aus der Kalottenausbruch erfolgt (zum Beispiel Mont-Cenis). Bei langen Tunneln kommt für beide Bauweisen nur Sohlstollen in Betracht. Der Vergleich der beiden Methoden führte in der Schweiz, wo — nebenbei bemerkt — der Gotthardtunnel belgisch, der Simplontunnel und die andern grossen Durchstiche österreichisch abgebaut wurden, bald zur Einsicht, dass es keine in allen Fällen beste Bauweise gibt, sondern dass von Fall zu Fall die Art des Vorgehens den topographischen und geologischen Verhältnissen angepasst werden müsse.

Im Jahre 1874 erschien in Wien die zweite Auflage von Rziha's zweibändigem Werk: «Lehrbuch der gesamten Tunnelbaukunst» Es ist heute noch das grösste, grundlegende Werk über Tunnelbau. Obschon in manchem veraltet und überholt, enthält es heute noch gültige Grundsätze, darunter den klassischen Satz:

«Im Tunnelbau ist es die grösste Kunst, grossen Gebirgsdruck fern zu halten, eine weit grössere Kunst, als jene, einmal vorhandenen Gebirgsdruck zu gewältigen, und wir möchten das erstere mit geistiger, das letztere mit roher materieller Arbeit zu vergleichen wagen.»

Das heisst mit andern Worten, dass auch hier vorbeugen besser ist als heilen. Im Satze von RZIHA liegt die Erkenntnis, dass der Tunnelbau, die Kunst des Bauingenieurs überhaupt, nicht ein Kampf gegen die Natur, sondern ein solcher mit der Natur sein soll. Der Ingenieur muss die Natur — in unserm Fall das Gebirge — verstehen. Wie der Arzt aus dem Gesicht oder äussern scheinbaren Kleinigkeiten auf sich vorbereitende, tiefere Erkrankungserscheinungen eines Menschen schliessen kann, so muss der Tunnelingenieur ebenfalls drohende Gefahren, insbesondere mögliche Gleichgewichtsstörungen und daraus folgende Bewegungen dem Gebirge ansehen, bevor sie in Erscheinung treten, und er muss seine Methoden diesen Gefahren anpassen, um das Auslösen schädlicher Kräfte zu vermeiden.

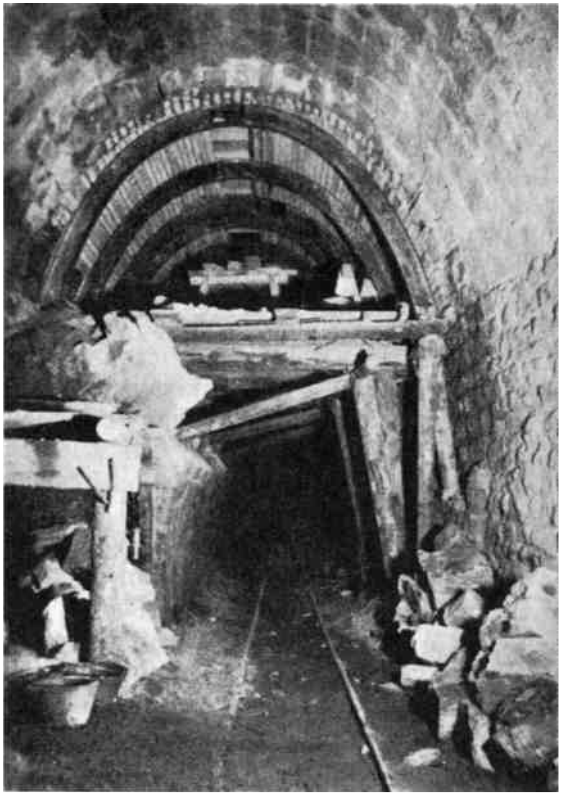

Abb. 5
Simplontunnel 11, belgisch abgebaute Strecke

Diese grundsätzliche Einstellung führte im schweizerischen Tunnelbau allmählich zu den Erfahrungen und der Erkenntnis, die F. ROTHPLETZ im Jahre 1918 in den Satz zusammenfasste, der die logische und notwendige Ergänzung des Satzes von RZIHA ist[5]):

«Es muss in druckhaftem Gebirge die wichtigste Anforderung sein, die wir an die Ausbaumethode stellen, dass sie in kürzester Frist nach Aufschluss des Gebirges zum fertig gemauerten Tunnel führe.»

Wird in einem gebrächen oder lockeren Gebirge ein Hohlraum geschaffen, so haben die Gebirgsteile zunächst an seinem Umfange unter dem Einflusse der Schwerkraft das Bestreben, sich in diesen hinein zu bewegen. Dies tritt je nach der Art, Lagerung, Klüftung und Struktur des Gesteins an der First,

---

[5] F. ROTHPLETZ: Woran leiden unsere Eisenbahntunnel, wie kann abgeholfen, wie vorgebeugt werden? Schweiz. Bauzeitung, Bd. LXXI, 1918

an den Ulmen (Seitenwänden) oder an der Sohle auf, wenn diese dem durch die Ulmen auf sie übertragenen Druck ausweicht. Der Stollen oder Tunnel wird nach einiger Zeit «druckhaft». Der Hohlraum wird dabei enger. Hinter den bewegten Teilen sind aber neue, kleinere Hohlräume entstanden, in die das Gebirge wieder nachdruckt. So geht die Bewegung weiter, wobei das Volumen des mitwirkenden Gebirges zunimmt und der Druck allmählich wächst, wenn der Hohlraum längere Zeit sich selber überlassen bleibt. Gelingt es jedoch, mit den Vollausbrucharbeiten den Umfang des vollen Tunnelquerschnittes rascher zu erreichen als die vom kleinen Hohlraum des Richtstollens ausgehende Bewegung, dieser also zuvorzukommen und die Mauerung einzuziehen, bevor die vom Umfang des Vollausbruches ausgehende neue Bewegung ernsthaft eingesetzt hat, dann kann sich diese in der Regel nicht mehr ausbreiten, und es tritt kein schwerer, auf den fertigen Tunnel wirkender Druck auf. Die Beanspruchung des Mauerwerkes bleibt verhältnismässig klein, es können entsprechend schwache Mauerwerksquerschnitte gewählt werden; die Ausführung ist leichter und billiger. Es ist also stets diejenige Bauweise zu wählen, die im Einzelfalle am besten zu diesem Ergebnis führt.

Die österreichische Bauweise ermöglicht eine geschlossene Zimmerung des ganzen Querschnittes und auch guten Längsverband, wobei Druck in zweckmässiger Weise auf alle stützenden Hölzer übertragen und verteilt wird. Sie eignet sich daher gut bei allgemeinem, von verschiedenen Seiten wirkendem Druck und bei wechselnden geologischen Verhältnissen. Sie bietet auch grössere Arbeitsräume, besonders für die Widerlagermauerung, so dass im allgemeinen die Arbeit freier und rascher vor sich geht. Diese Bauweise wird daher häufiger als andere zur Anwendung kommen, besonders beim Bau langer, tiefliegender Gebirgstunnel[6]) und bei Lehnentunneln mit Seitendruck.

Die belgische Bauweise hat ihrerseits den Vorteil, dass die First nur kurze Zeit auf Holz ruht und bald durch das gemauerte Gewölbe gestützt ist. Sie führt am sichersten zum Ziel in allen Fällen, in denen Firstsenkung die grösste Gefahr bedeutet, wogegen sie für Seitendruck sehr empfindlich ist. Sie ist die gegebene Bauweise bei Tunneln durch mildes Gebirge in geringer Tiefe, unter Ortschaften usw. So wurden die Tunnel der linksufrigen Seebahn in Zürich, der Ulmberg- und der Wollishofertunnel, belgisch ausgeführt. Der erstere unterfährt bei kaum 20 in Überlagerung in milder Moräne Häuser, denen nichts geschah. Die Firstsenkungen des Gewölbes waren praktisch gleich null. Im Wollishofertunnel wurden — zum erstenmal in der Schweiz —die gewöhnlichen eisernen Lehrbogen für die Mauerung als Stütze der Zimmerung verwendet. Im zweiten Simplontunnel, der hauptsächlich österreichisch abgebaut wurde, wurde in einigen kurzen Strecken, in denen infolge Nachgehens des Felsens zwischen den beiden Tunneln Firstdruck aufzutreten drohte, zum belgischen Abbau übergegangen (Abb. 5).

---

[6] Tunnel, die ein Gebirge durchqueren (Wasserscheidetunnel).

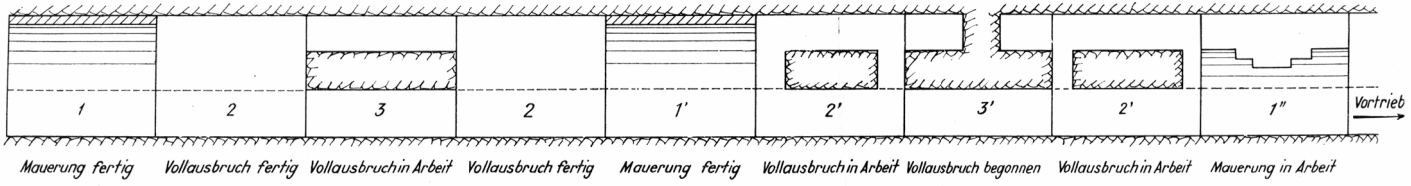

Abb. 6
Sog. Neue österreichische Bauweise

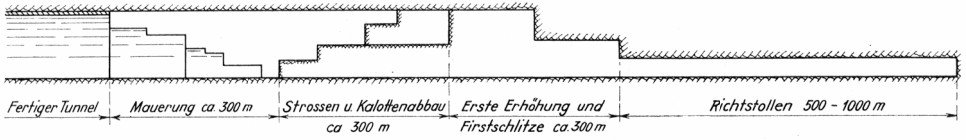

Abb. 7
Fortlaufende Betriebsweise

Wichtig ist nicht nur die Verteilung der einzelnen Baustadien über den Querschnitt des Tunnels, sondern auch ihre Anordnung im Längsschnitt, was die deutsche Tunnelliteratur die B e t r i e b s w e i s e nennt. In Österreich suchte man lange Zeit dem Satz von Rziha zu genügen, indem man ein ähnliches Verfahren anwandte, wie es bei der Erstellung von Stützmauern in beweglichem Gelände üblich ist. Man ging mit Vollausbruch und Mauerung vom Richtstollen aus, der bei der österreichischen Bauweise stets ein Sohlstollen ist, r i n g w e i s e vor (Abb. 6). Der Nachteil dieses Vorgehens ist, dass in drückendem Gebirge die Brust eines jeden Ringes (Ringlänge in der Regel 8 m) gebölzt werden muss und die Enge des Raumes die Arbeit behindert und verlangsamt, was unserem Grundsatz widerspricht. Unsere bedeutenderen schweizerischen Tunnel sind grösstenteils mit sogenannter f o r t 1 a u f e n d e r Betriebsweise ausgebrochen und gemauert worden. Bei dieser Arbeitsmethode sind die einzelnen Arbeitsstufen auf eine gewisse Tunnellänge, je auf eine oder mehrere zusammenhängende Ringlängen, verteilt. Jede Arbeitergruppe arbeitet fortlaufend an derselben Arbeitsgattung (Abb. 7) und schreitet damit vorwärts. Wir gelangen dabei in kürzerer Frist zum fertigen Tunnel. Diese Methode ist auch wirtschaftlicher. Mit Ausnahme der bekannten 50 m langen Druckstrecke bei km 4,5 der Südseite des Simplontunnels kennt die Geschichte des schweizerischen Tunnelbaues keinen «berühmt› gewordenen Drucktunnel, wie das Ausland sie kennt. Je rascher ein Tunnel fortschreitet, desto länger müssen die einzelnen Arbeitsstrecken werden, um zu verhindern, dass sie einander stören. In solchen Fällen kann man, um sie nicht zu lang werden zu lassen, die Arbeitsstrecke unterteilen und nach dem in Abb. 8 gezeigten Schema arbeiten.

Nach dem Gesagten ist es nun erklärlich, warum im Gotthardtunnel der Firststollen ein Fehler war. Wenn an einer Stelle um den Stollen oder im Vollausbruch Bewegung auftritt, so sollte sie möglichst rasch ausgebaut werden, auch etwa ausser der Reihe. Das ist bei Firststollen aber erst möglich, wenn der Strossenabbau nachgerückt ist, was oft sehr lange gehen kann. Ein kontinuierlicher Fortschritt ist auch ausgeschlossen, weil der Überhang von der Kalotte auf die Sohle, der für die Materialförderung und die Wasserableitung besonders eingerichtet werden muss, nur von Zeit zu Zeit ruckweise vorwärts verlegt werden kann.

Der Bau eines einigermassen bedeutenden Tunnels erfordert eine Reihe h y g i e n i s c h e r Massnahmen, auf die wir hier nicht im einzelnen eintreten können. Wir müssen uns darauf beschränken, nur die wichtigste zu erwähnen, die L ü f t u n g. Sobald ein Stollen weiter als 100-200 m in das Gebirge eindringt, müssen die Arbeitsorte belüftet werden. Mit den heutigen Mitteln und Kraftquellen ist das eine selbstverständliche und leichte Angelegenheit. Der Luftbedarf richtet sich nach der Zahl der gleichzeitig im Tunnel beschäftigten Arbeiter, die ihrerseits vom Bauprogramm abhängt. Die lange in Lehrbüchern nachgeschleppten Zahlen betreffend den Luftbedarf sind für moderne Verhältnisse erheblich zu niedrig. Im Simplontunnel wurde

vom Chefarzt für die Nordseite der Unternehmung, Dr. med. D. POMETTA, festgestellt, dass für die blosse Lufterneuerung (also ohne die Bedürfnisse der Abkühlung) die Einführung eines Luftvolumens von 0,5 m^3/min (gleich 0,0083 m^3/s) pro Mann mit Lampe notwendig ist'[7]). Dazu muss noch das für die Erneuerung der durch die Explosionsgase verdorbenen Luft notwendige Volumen gerechnet werden, nämlich etwa 300-400 m^3 pro kg verbrauchten Sprengstoff.

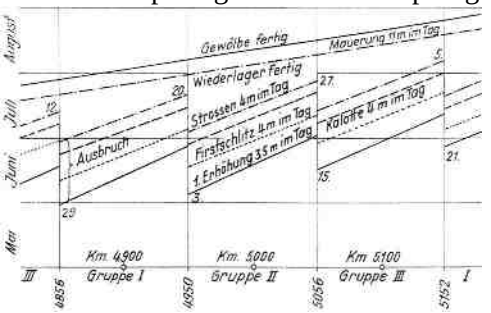

Abb. 8

Aus dem Bauprogramm des Simplontunnels II

Zur Zeit der Erstellung der ersten längern Tunnel waren die verfügbaren Mittel noch primitiv und auch die Kraftbeschaffung nicht so einfach wie heute. Man behalf sich daher für die Lüftung oft mit Schächten, an deren Fuss zur Verstärkung der Kaminwirkung ein Feuer unterhalten wurde. Beim Bau des alten Hauensteintunnels fing dabei die Zimmerung eines solchen Lüftungsschachtes Feuer. Der Schacht stürzte ein und verschüttete 53 Mann. Weitere 11 Mann kamen bei den Rettungsarbeiten ums Leben!

3. Die grossen Alpendurchstiche

Den grössten Beitrag zur Entwicklung des Tunnelbaues lieferte die Schweiz durch den Bau ihrer grossen Alpendurchstiche. Gotthard, Simplon und Lötschberg sind bis jetzt die drei längsten Eisenbahntunnel, die nur von beiden Mundlöchern aus vorgetrieben wurden. (Der 18,5 km lange Apennintunnel der direkten Linie Bologna—Florenz wurde auch von einem Mittelschacht aus vorgetrieben und liegt nicht tief. Er bot auch erhebliche Schwierigkeiten. Es handelte sich aber dabei um andere Probleme als bei unsern Alpendurchstichen.) Simplon und Gotthard sind auch die am tiefsten unter die Erdoberfläche dringenden Durchstiche, wobei der Simplontunnel heute noch der

[7] D. POMETTA: Sanitäre Einrichtungen und ärztliche Erfahrungen beim Bau des Simplontunnels. Winterthur 1906.

längste und tiefste ist. Seine grösste Überlagerung beträgt 2200 m. Beim Gotthardtunnel ist sie 1700 m, beim Lötschbergtunnel 1570 in (Mont-Cenis 1600 m).

Der Bau dieser langen, tiefliegenden Gebirgstunnel stellte Ingenieure und Geologen vor besondere Probleme, die zu neuen Erkenntnissen führten, besonders der Simplontunnel. Es waren einerseits technische Probleme, auf die hier nicht näher eingetreten werden soll. Wir begnügen uns damit, sie anzudeuten. Da war vor allem das Problem der Absteckung, d. h. der Richtungs-, Höhen- und Längenbestimmung, das am Gotthard durch C. KOPPE, am Simplon durch M. ROSENMUND gelöst wurde. Im Lötschbergtunnel mussten infolge des Einbruches unter dem Gasterntal drei Kurven eingeschaltet werden, ein Problem, das zum erstenmal bei einem langen Durchstich auftrat. Die unter Leitung, von Prof. Dr. F. BAESCHLIN durchgeführte Absteckung führte hier zu einem bemerkenswerten Ergebnis. Die Durchschlagsfehler betrugen nur: In der Richtung 257 mm, in der Höhe 102 mm und in der Länge 410 mm[8]). Der Mont-Cenis brachte, wie wir sahen, die für den gesamten Tunnelbau wichtige Mechanisierung der Bohrung. Die Entwicklung der Bohrmaschine haben wir bereits kurz angedeutet. Wenn der Vorteil der mechanischen Bohrung sich rationell auswirken soll, so sind auch Probleme der Förderung und Organisation zu lösen; denn die ausgesprengten «Berge» müssen vorzu entfernt werden, sonst nützen die besten Bohrmaschinen und Sprengstoffe nichts. Das sind Aufgaben, die beim Bau der langen Durchstiche, besonders beim Ausbau des zweiten Simplontunnels, technisch und organisatorisch interessante Lösungen fanden, auf die näher einzutreten wir uns hier versagen müssen[9]).

Drei mit der Tiefenlage der grossen Alpendurchstiche zusammenhängende Erscheinungen beschäftigten anderseits Ingenieure und Geologen ganz besonders: der Gebirgsdruck, die Wärmeverhältnisse und die Wasserverhältnisse.

a) Der Gebirgsdruck

Das Auftreten von Druck, oder genauer, von Bewegung in lockerem Gebirge ist eine im Tunnel- und Bergbau von jeher bekannte, bei jeder Überlagerungshöhe auftretende Erscheinung, die in der Regel durch die Kohäsions- und Lagerungsverhältnisse des Gebirges bedingt ist. Wir sprachen bereits davon. Bewegungen dieser Art kamen auch in allen drei genannten Durchstichen vor. Im Simplontunnel traten solche auf 70 m Länge in den stark zerdrückten Kalkschiefern der Eistenmulde bei km 4 der Nordseite auf, sowie namentlich in der bekannten Druckstrecke km 4,450-4,500 der Südseite, wo der Tunnel nasse, kaolinige Glimmerschiefer unter einer Überlagerung von etwa 1200 m

---

[8] F. BAESCHLIN: über die Absteckung des Lötschbergtunnels. SBZ, Bd. LVIII, 1911.

[9] F. ROTHPLETZ und C. ANDREAE: Der Förderbetrieb beim Ausbau des II. Simplontunnels. SBZ, Bd. LXXI, 1918.

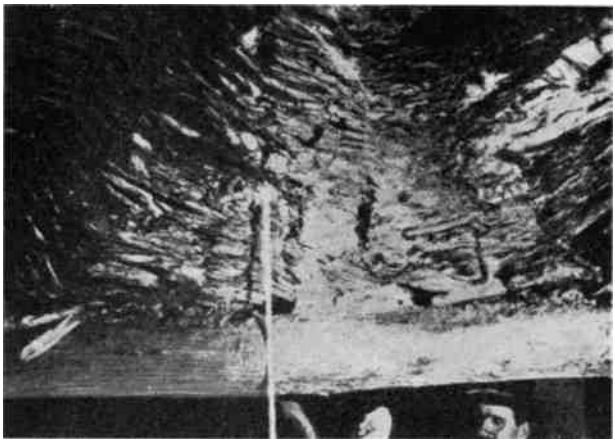

Abb. 9
Simplontunnel II, Gebirgsdruck im Lebendungneis km 6,130 ab SP

durchfährt. Ausserdem traten im spröden Antigoriogneis ab km 1,5 der Südseite unter einer Überlagerung von nur 700 in einige «Bergschläge» auf. Solche Bergschläge unter geringer Überlagerung kamen seinerzeit auch im Granit des Pfaffensprungtunnels der Gotthardbahn und später im Stollen des Amsteger Kraftwerkes vor. Sie waren verursacht durch die Freilegung von Spannungen, die noch von der Gebirgsbildung herrührten. Als jedoch der Tunnel, auf der Nordseite bei km 7,2, auf der Südseite bei km 5,3, eine Tiefe von 1500-1600 m unter der Erdoberfläche erreichte, machten sich auf beiden Seiten Druckerscheinungen bemerkbar, die zwar nicht grösser waren als die, die auch bei seichter gelegenen Tunneln auftreten, und jedenfalls weit schwächer als in den beiden oben erwähnten Druckstellen, die aber für das betreffende Gestein, das sonst als standfest zu betrachten ist (Gneis, Granit, kompakter Kalk u. a.), doch auffallend intensiv und besonders auffallend fortlaufend waren und unverkennbar mit der Höhe der Überlagerung zusammenhingen.

Auf der Nordseite traten zunächst im Monte-Leone-Gneis, der auf etwa 900 in durchfahren wird, wieder Bergschläge auf, und zwar kontinuierlich. Parallel zu den Stollenflächen, hauptsächlich an den Ulmen, aber auch an First und Sohle, lösten sich in kompakten, spröden Gesteinsarten Schalen ab, meistens unter Knistern. Sie wurden mitunter mit grosser Gewalt und unter heftigem Knall in den Hohlraum hinausgeschleudert, handgross, auch kleiner, bis mehrere Quadratmeter messend. Die Ränder solcher Bergschlagschalen sind meistens messerscharf. Eine Eigentümlichkeit ist, dass die Stücke nicht mehr auf die Abbruchstelle passen, indem ihre Krümmung abgenommen hat. Sie sind von elastisch zusammengepresstem Gebirge abgesprungen und haben sich dabei gestreckt. Im darauffolgenden, stärker ge-

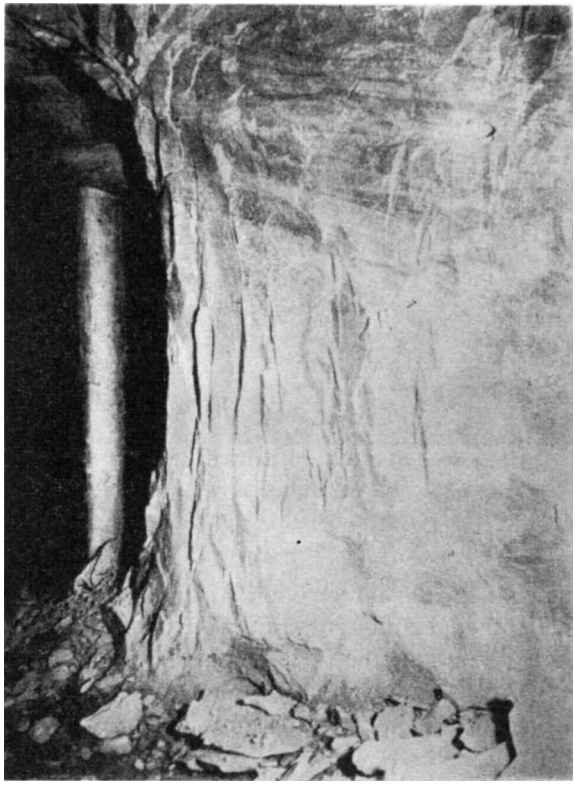

Abb. 10
Simplontunnel 11, Beginnender Bruch der westlichen Ulme, km 9,760 ab NP
(km 10,043 ab SP) (Jura)

schichteten und zerklüfteten Val-Grande-Gneis traten die Bergschläge schwächer auf, vermischt mit Bewegung nach Schichtung und Rutschflächen.

Auf der Südseite durchfährt der Simplontunnel von km 5,3-9,2 ab SP beinahe horizontal geschichtete und dünngeschieferte Lebendungneise und Kalkphyllite, in denen typischer, mitunter recht intensiver S e i t e n d r u c k auftrat. Über der First und unter der Sohle wurden die Schichten von der Seite zusammengestaucht (Abb. 9). Dadurch wurde die Sohle gehoben. Aber selbst hier war der Druck kein ausserordentlicher, wenn nach den früher erwähnten Regeln gearbeitet wurde und die Mauerung nicht lange auf sich warten liess. Von km 9,2-10,1 ab SP ist der Kalk kompakter. Die Bewegung änderte hier wieder ihren Charakter. Abb. 10 zeigt, wie sich dort das unter der Überlagerung elastisch zusammengepresste Gebirge nach dem durch den Tunnelvortrieb geschaffenen Hohlraum hin allmählich entspannt. Es lösten sich hier, langsam nach der Tiefe fortschreitend, Schalen ab, wie bei einem Probewürfel unter der Druckpresse. Der Stollen, wenn sich selber über-

lassen, strebte in dem kompakten Gestein allmählich einen kreisförmigen Querschnitt an (Abb. 11).

In stark geschichtetem, geschiefertem und zerklüftetem Gebirge erfolgte die Bewegung nicht als elastische Entspannung, sondern als Schub der Schichtköpfe in den Hohlraum, aber immer handelte es sich hauptsächlich um

Abb. 11
Simplontunnel II, Druckerscheinungen in der Trias km 9,672 ab NP
(Überlagerung ca. 2000 m) Gewölbe in sog. «Hunzikersteinen» 35: 17:7 cm

S e i t e n d r u c k , also um die Wirkung, von zur Vertikallast senkrechten Spannungen (Abb. 12).

Die Druckfestigkeit eines Körpers ist eine Funktion seiner Querdehnungsmöglichkeit. Je grössere Kräfte dieser entgegenstreben, desto grösser wird die Druckfestigkeit. Im Innern des Gebirges ist das Gestein von allen Seiten durch seine Umlagerung an der Querdehnung gehindert. Wie aber durch den Stollenvortrieb Flächen freigelegt werden, setzt diese ein, die Druckfestigkeit der Ulmen nimmt entsprechend ab, und diese brechen unter dem Einfluss

Abb. 12
Simplontunnel II, seitlich zusammengedrückter Stollen km 7,7 ab SP (Kalkschiefer)

der horizontalen Zugspannungen. Wird durch rasches Einziehen einer satt anliegenden Mauerung mit Sohlgewölbe dieser Dehnung rechtzeitig entgegengewirkt, so gelingt es auch hier, wie das Beispiel des Simplontunnels zeigt, der Bewegung Einhalt zu gebieten. Bei richtiger Ausführung genügen dabei wirtschaftlich durchaus tragbare Mauerwerkstärken. In den Gebirgsdruckstrecken des Simplons genügten Gewölbestärken von 0,70 m.

Ingenieur R. MAILLARD hat aus den Festigkeitsversuchen unter allseitigem Druck von KARMAN sowie aus solchen von CONSIDERE mit umschnürtem Beton das Verhältnis des Umschnürungsdruckes und der Druckfestigkeit zu bestimmen versucht, um daraus die notwendige Stärke bzw. Verstärkung der Mauerung infolge des Gebirgsdruckes zu berechnen[10]). Er fand:

$$\sigma_s = \frac{\sigma^2 - \sigma_0^2}{\alpha(1+\sigma_0)^2} \quad \text{t/cm}^2\text{, wobei}$$

[10] R. MAILLARD: über Gebirgsdruck. SBZ, Bd. 81, 1923.

σ_s = Seitendruck (Umschnürungsdruck), der die Druckfestigkeit σ des Körpers entspricht;

σ_0 = Druckfestigkeit des sich frei ausdehnenden Körpers;

a = von der Gesteinsart abhängige Konstante (3 bis 6, je nach Gesteinsart).

Die Mauerstärke d will er nach der Röhrenformel berechnen:

$$d = \frac{\sigma_s \cdot \rho}{\sigma_m}$$, wobei

σ_m = zulässige Druckspannung des Mauerwerkes;

ρ = Krümmungsradius des Mauerungsquerschnittes an der betrachteten Stelle.

Über die Konstante *a* liegen zurzeit noch zu wenig Versuchserfahrungen vor, um über den praktischen Wert der von MAILLARD vorgeschlagenen Berechnungsmethode endgültig urteilen zu können. Immerhin steht sie — im Gegensatz zu andern Erklärungen und Bestimmungsvorschlägen — mit den Erfahrungen und Beobachtungen im Simplontunnel in keinem Widerspruch. Es ergeben sich aus ihr Verkleidungsstärken, die denen, die sich dort praktisch bewährten, entsprechen.

ALB. HEIM versuchte in seinem Buche «Mechanismus der Gebirgsbildung> (1878) sowie in den geologischen Nachlesen der Vierteljahrsschrift der NGZ, Nr. 14 (1905) und Nr. 19 (1908), die Gebirgsdruckerscheinungen als Folge eines latent plastischen Zustandes der Gesteine in der Tiefe zu erklären, wobei sich der Druck nach den Gesetzen des hydrostatischen Druckes äussere. Diese Theorie, die auf den zur Zeit ihrer Entstehung noch wenig entwickelten Kenntnissen des Verhaltens fester Körper unter Druck beruhte, stand jedoch in Widerspruch mit der praktischen Erfahrung. Wenn übrigens im tiefstgelegenen Punkt des Tunnelhorizontes ein der Überlagerungshöhe entsprechender hydrostatischer Druck herrschen würde, so müsste er es auch in den andern, weniger belasteten. Es bestünde nicht Gleichgewicht.

b) Die Wärmeverhältnisse

Das schwierigste und wichtigste Problem, das unsere Alpendurchstiche aufwarfen, und mit dem sich Technik und Wissenschaft auseinandersetzen mussten, ist das der Gebirgswärme.

In der wassergesättigten Tunnelluft nimmt erfahrungsgemäss die Arbeitsleistung ab, wenn die Lufttemperatur 25° C wesentlich übersteigt. Höhere Temperaturen wirken in der feuchten Luft des Tunnels auf die Dauer schädlich auf die Gesundheit der im Tunnel arbeitenden Menschen ein. Bei 35-36° C hört die Arbeitsleistung auf. Hohe Temperaturen erfordern eine möglichst kräftige Lüftung. Bei sehr hohen genügt aber auch diese nicht, um erträgliche oder gar günstige Arbeitsverhältnisse zu schaffen. Die Luftmenge,

die durch die Arbeitsstrecken geführt werden kann, hat Grenzen; denn die Luftgeschwindigkeit darf im Stollen 4-5 m/s nicht überschreiten, ansonst der Luftzug unerträglich, störend und schädlich wird. Die spezifische Wärme der Luft ist auch zu klein, um die dem Gesteine entströmende Wärmemenge vorzu abzuführen. Die Luft vor dem Eintritt in den Tunnel zu kühlen, nützt nichts; denn sie nimmt sofort Wärme vom Gestein auf, bevor sie die Arbeitsstrecken erreicht hat. Vom 4. km an hatte die Luft im Simplontunnel das ganze Jahr eine konstante Temperatur, die sich in der Tiefe immer mehr der Gesteinstemperatur näherte. Der Luft muss, unmittelbar bevor sie die Arbeitsstrecken bestreicht, die Wärme durch kaltes Wasser entzogen werden, wozu man die abzuführende Wärmemenge wenigstens angenähert kennen sollte.

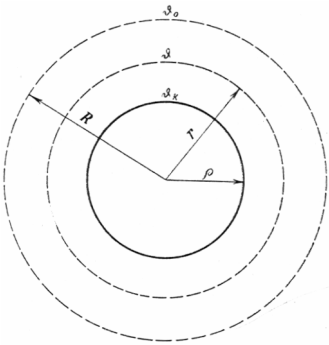

Abb. 13

Dieses Problem wurde zum erstenmal im Simplontunnel untersucht. Dort war, gestützt auf die Beobachtungen STAPFFS im Gotthardtunnel, wo die höchste Gesteinstemperatur 30,7° C betrug (geothermische Tiefenstufe 47 m), eine Höchsttemperatur von 42-45° C angenommen worden. In Wirklichkeit überstieg sie auf über 2 km Länge 50° C und erreichte ein Maximum von 55,4° C (Tiefenstufe 37 m!). Als auf der Nordseite die Temperatur in besorgniserregender Weise über die Voraussage anstieg, beauftragte die Unternehmung mit jener Aufgabe Dr. F. HEERWAGEN, Ingenieur der Firma Gebr. Sulzer, dessen Verfahren und Ergebnisse hier nur kurz angedeutet werden können:

Der Tunnel mit seiner Umgebung kann für die Bedürfnisse der Praxis genau genug als ein Hohlzylinder betrachtet werden, in dessen Hohlraum eine gleichbleibende, niedrige Temperatur δ_K erhalten bleibt, und der infolgedessen Wärme an diesen Hohlraum abgibt, d. h. sich gegen den Tunnel hin abkühlt. Die Wärmemenge, die in der Zeiteinheit durch eine mit dem Hohlraum konzentrische Zylinderfläche mit Radius r > ρ (Abb. 13) und der Länge 1 strömt, ist bei stationärem Zustand:

$$q = 2\pi r k \frac{d\delta}{dr}$$

wobei k die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins, d. h. die durch eine Flächeneinheit in der Zeiteinheit strömende Wärmemenge und δ die Temperatur in irgendeinem Punkt bedeutet. $\frac{d\delta}{dr}$ ist das Temperaturgefälle in der Richtung des Halbmessers. Es herrscht aber bei Beginn der Abkühlung, d. h. beim Auffahren des Stollens, nicht stationärer Zustand, dem sich die Temperaturverhältnisse erst weiter hinten nähern. Dort folgen aber bald die ersten Ausweitungsarbeiten. Der Hohlraum grenzt wieder an eine wärmere Gesteinszone, das Temperaturgefälle ändert sich wieder, und so mehrere Male nacheinander.

HEERWAGEN führte zunächst in seitlichen Bohrlöchern Temperaturmessungen in verschiedenen Tiefen und in auseinanderliegenden Zeitpunkten durch. So erhielt er das Temperaturgefälle sowohl nach der Entfernung r vom Mittelpunkt des Stollenquerschnittes, wie nach der Zeit in den einzelnen Tiefen. Die seitlichen Bohrlöcher konnten nur geringe Tiefe haben (max. 4 m). HEERWAGEN musste daher vorerst eine theoretische Methode aufstellen, um aus den Messergebnissen den ganzen Verlauf der Temperaturkurven bis zur Tiefe R zu konstruieren, in der momentan noch die ursprüngliche Temperatur δ_0 herrschte, und hierauf aus den zeitlich auseinanderliegenden Temperaturkurven die zwischen ihnen bzw. seit Beginn der Abkühlung abgeflossene Wärmemenge Q zu berechnen und die Veränderungen des stündlichen Wärmestromes q nach der Zeit zu bestimmen. Hiezu ging er von der Gleichung von FOURIER für die Wärmebewegung in einem Hohlzylinder aus, der ursprünglich eine gleichmässige Temperatur hatte und nun durch Haltung des Hohlraumes auf einer niedrigeren, ständigen Temperatur eine beständige Abkühlung erfährt:

$$\frac{\partial\delta}{\partial t} = \frac{k}{w}\left(\frac{d^2\delta}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial\delta}{\partial r}\right)$$

wobei t = Zeit, w= Wärmekapazität des Gesteins. Bei Eintritt des stationären Zustandes wird

$$\left(\frac{d^2\delta}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial\delta}{\partial r}\right) = 0$$

Im praktisch stationären Zustand, d. h. eine gewisse Zeit nach dem Auffahren des Stollens, wird die Temperatur eine lineare Funktion des natürlichen Logarithmus von r. Die seit Beginn der Abkühlung aus der Stollenlänge 1 abgeflossene Wärmemenge ergibt sich aus

$$Q = 2\pi w \int_{\delta}^{R} r(\delta_0 - \delta)dr$$

Durch wiederholte Messungen und ihre Auswertung fand HEERWAGEN schliesslich für stationären Zustand, wie er praktisch in einiger Entfernung hinter vor Ort bzw. nach Beginn eines neuen Ausbruchquerschnittes ange-

nommen werden kann, für einen ideellen Stollenradius ρ = 1,8 m einen stündlichen Wärmestrom für eine Stollenlänge von 1 m:

$$q_1 = \frac{20(\delta_0 - \delta)}{\log t - 0.185} \text{ kgCal,}$$

wobei t = Zeit in Tagen seit dem Auffahren, und für beliebigen Stollenradius ρ:

$$q = \frac{20(\delta_0 - \delta)}{\log \frac{1.8^2 t}{\rho^2} - 0.185} \text{ kgCal}$$

Diese beiden Formeln gelten nur für grosses *t*. Für die Strecke unmittelbar hinter vor Ort, wo der Wärmezustand vom stationären noch sehr verschieden ist, konnte HEERWAGEN den Wärmestrom dadurch feststellen, dass er weiter hinten, wo sich der Zustand dem stationären näherte, durch Messungen und nach obiger Methode die ganze Wärmeabgabe Q für 1 m Länge seit Beginn der Abkühlung bestimmte. Dieses Q ist gleich dem stündlichen Wärmestrom q in der ganzen Strecke von der Meßstelle bis vor Ort [11]).

Im vorliegenden Falle handelte es sich um eine durch die Kühleinrichtungen abzuführende Wärmemenge von etwa 3 Millionen kgCal auf jeder Seite ohne die durch die warmen Quellen zugeführte zusätzliche Wärme.

Beim Temperaturproblem handelt es sich, sobald die Temperatur ein gewisses Mass (etwa 35° C) auf grössere Länge erreicht oder gar übersteigt, nicht nur um die Bemessung der Lüftungs- und Kühlungseinrichtungen, sondern, wie noch gezeigt werden soll, auch um den ganz fundamentalen Entscheid über das anzuwendende Tunnelsystem. Es ist daher von ausserordentlicher Wichtigkeit, die zu erwartenden Gesteinstemperaturen mit möglichster Sicherheit und Genauigkeit zu kennen. Die Überschreitung der Voraussage der Temperaturen im Simplon beschäftigte daher in der Folge Ingenieure und Geologen sowohl aus praktischem wie aus wissenschaftlichem Interesse. über die Zunahme der Temperatur unter Ebenen war man orientiert. Man kannte schon längst den dort bei normalen Verhältnissen geltenden Wärmegradienten von 0,031-0,033° C bzw. die geothermische Tiefenstufe von 32-30 m. Man wusste auch, dass in gebirgiger Gegend der Gradient unter den Tälern grösser, die Tiefenstufe kleiner ist, während unter den Höhenzügen das Verhältnis umgekehrt ist. Aber über die Gesetzmässigkeit des Verlaufes der Geoisothermen unter Gebirgen und Tälern herrschte zur Zeit der ersten grossen Durchstiche noch Unklarheit. Die ersten systematischen Beobachtungen und Untersuchungen über die Wärmeverhältnisse bei einem Tunnelbau und Versuche, den Zusammenhang zwischen der topographischen Gestaltung der Oberfläche und den gefundenen Werten festzustellen, wurden

---

[11] Der Bericht HEERWAGEN'S wurde seinerzeit nicht veröffentlicht. Ausführlicheres darüber in der unter Mitwirkung von BRANDAU bearbeiteten 4. Auflage des Bandes «Tunnelbau» des Handbuches der Ingenieurwissenschaften, Leipzig 1920, sowie in C. ANDREAE: «Der Bau langer, tiefliegender Gebirgstunnel›, Berlin 1926, und «Les grands souterrains transalpins», Zürich 1948.

beim Bau des Gotthardtunnels durch J. STAPFF durchgeführt. Aus den teils gemessenen, teils durch Interpolation berechneten Bodentemperaturen über der Tunneltrasse und den im Tunnel gemessenen Gesteinstemperaturen stellte er jedoch für die Temperaturzunahme nach der Tiefe Formeln auf, die weder die physikalische Gesetzmässigkeit des Einflusses der Oberflächengestalt abklärten, noch weitere, wichtige Faktoren, wie die verschiedene Leitfähigkeit der Gesteine je nach Lagerung und Struktur und den Einfluss von Wasser, berücksichtigten. Es waren Formeln, die nur für den Einzelfall des Gotthards zutrafen, aber nicht auf andere Verhältnisse übertragen werden konnten. Überhaupt können Erfahrungen in einem Tunnel nicht ohne weiteres auf einen andern übertragen werden, sondern jedesmal muss das Problem neu untersucht werden.

Theoretisch wurde seither das Problem der Beeinflussung der Isothermen durch die Form der Oberfläche in einer durch die Erfahrungen im Simplon angeregten Arbeit von Dr. E. THOMA im mathematisch-physikalischen Institut der Universität Freiburg i. Br. (Prof. J. KÖNIGSBERGER) im Jahre 1905 untersucht. Betrachtet man einen vertikalen Schnitt durch die Erdoberfläche, der die Tunnelachse enthält, so lautet die Differentialgleichung für die Wärmeverteilung in diesem Schnitt bei stationärem Zustand:

$$\left(\frac{d^2\delta}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial\delta}{\partial r}\right)=0$$

E. THOMA wies in seiner Arbeit nach, dass

$$\delta = C_1 \lg\left(A+\sqrt{A^2-1}\right)+C_2$$

eine Lösung dieser Gleichung für eine wellenförmige obere Abgrenzung des Schnittes ist, wobei

$$A = e^{\frac{2x}{b}} + \sqrt{1-\left(2\cos\frac{2y}{b}-e^{\frac{2x}{b}}\right)e^{\frac{2x}{b}}}$$

$b\pi$ ist dabei die Periode der Funktion. C_1 und C_2 sind Konstanten. Die δ-Linien (Isothermen) sind Wellenlinien (Abb. 14). Unter den Bergkämmen ist

$y=\left(n+\frac{1}{2}\right)b\pi$ und der Wärmegradient:

$$\frac{d\delta}{dx}=\frac{2C_1}{b}\cdot\frac{e^{\frac{x}{b}}\left(e^{\frac{x}{b}}+\sqrt{e^{\frac{2x}{b}}+1}\right)}{e^{\frac{x}{b}}\left(e^{\frac{x}{b}}+\sqrt{e^{\frac{2x}{b}}+1}\right)+1}$$

Mit wachsender Tiefe (wachsendem x) wird der Wärmegradient immer grösser und nähert sich dem Maximum $\frac{2C_1}{b}$ während die geothermische

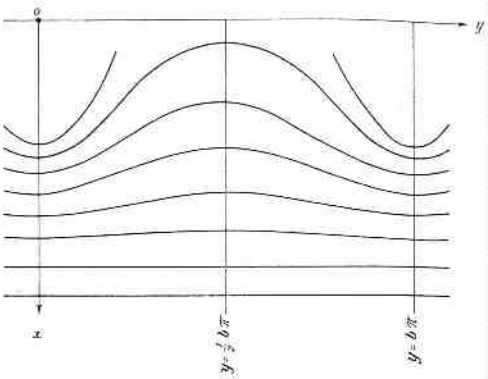

Abb. 14

Tiefenstufe dabei entsprechend kleiner wird, bis sie das Minimum b 2(1 erreicht.

Unter den Tälern ist y=nb7r. Der Wärmegradient wird:

$$\frac{d\delta}{dx} = \frac{2C_1}{b} \cdot \frac{e^{\frac{x}{b}}\left(e^{\frac{x}{b}} + \sqrt{e^{\frac{2x}{b}} - 1}\right)}{e^{\frac{x}{b}}\left(e^{\frac{x}{b}} + \sqrt{e^{\frac{2x}{b}} - 1}\right) - 1}$$

Hier wird der Wärmegradient mit wachsender Tiefe immer kleiner und nähert sich dem Minimum $\frac{2C_1}{b}$. Die geothermische Tiefenstufe wird dabei b immer grösser und nähert sich dem Maximum $\frac{b}{2C_1}$.

$\frac{2C_1}{b} = \left(\frac{d\delta}{dx}\right)_{x=\infty}$ ist der normale Wärmegradient. b

Sobald wir diesen für die im Einzelfall in Betracht kommende Gesteinsart und Schichtneigung kennen, ergibt sich daraus C_1

Die Amplitude der δ-Linien ist :

$D = b \lg \frac{e^{\delta} + e^{-\delta}}{e^{\delta} - e^{-\delta}}$ entspricht: b lg coth(δ)

Mit wachsendem δ nähert sich D allmählich 0, d. h. die Isothermen verflachen sich.

$$\delta = C_1 \lg \frac{e^{\frac{D}{b}} + 1}{e^{\frac{D}{b}} - 1} + C_2$$

Daraus lässt sich für δ konstant C_2, berechnen. Aus den obigen Gleichungen ergibt sich für $y = b\pi$:

$$x = b \lg 1/2 \, (e^{\delta} + e^{-\delta})$$

woraus die Lage der y-Achse festgelegt ist, sobald eine Isotherme bekannt ist.

Wichtig für die Bestimmung des Temperaturverlaufes ist die möglichst genaue Feststellung der Bodentemperaturen durch direkte Messung in verschiedenen Punkten des Längenprofils, und zwar in einer Tiefe, in der die Schwankungen der mittleren Jahrestemperatur keinen störenden Einfluss mehr haben. Für die bereits erwähnte Prognose für den Splügentunnel wurde sie z. B. in Bohrlöchern von 11 m Tiefe gemessen. Wie SCHARDT in einer Schrift über die geothermischen Verhältnisse des Simplongebirges (1914) nachwies, war die Temperaturbestimmung für den Simplontunnel von zu niedrigen Bodentemperaturen ausgegangen.

Der Temperaturverlauf im Innern eines Gebirges ist jedoch nicht nur durch die Bodenform bestimmt, sondern auch abhängig von der Leitfähigkeit der Gesteine. Wie KÖNIGSBERGER in mehreren Veröffentlichungen[12]) gezeigt hat, spielt die verschiedene Leitfähigkeit der einzelnen Gesteinsarten praktisch keine grosse Rolle, wohl aber die Lage der Gesteine. Die Leitfähigkeit der Gesteine ändert mit dem Winkel, den die Richtung der Wärmeströmung mit derjenigen der Schichtung, und Schieferung einschliesst. Die Wärmeleitfähigkeit, als Strecke von einem Punkt aus in den verschiedenen Richtungen aufgetragen, bildet ein Rotationsellipsoid, dessen kleine Achse Rotationsachse ist und senkrecht zur Schieferung steht. Nach KÖNIGSBERGER ist z. B. das Verhältnis der beiden Achsen bei Antigoriogneis 1,44, bei Schiefern 2,79. Sekundär wird die Wärmeverteilung im Innern des Gebirges hauptsächlich durch das Wasser beeinflusst. Wasserdurchtränktes Gebirge hat eine grössere Leitfähigkeit als trockenes.

Die fehlerhafte Prognose für den Simplontunnel rührte daher, dass sie, wie bereits erwähnt, von zu niedrigen Bodentemperaturen ausging, und dass sie nicht berücksichtigte, dass im Gotthardmassiv die Schichten steil stehen, was grössere Leitfähigkeit ergab und Wasserinfiltrationen begünstigte, während im Simplon die Schichten zum grossen Teil flach liegen. Der Wärmestrom fliesst hier beinahe senkrecht zur Schichtrichtung. Die Nordseite ist sehr trocken. Nur auf der Südseite traten bis Tunnelmitte Quellen auf, die das Gestein abkühlten. Es sei diesbezüglich auf die verschiedenen Arbeiten von

---

[12] Vide Ecl. geol. helv. 1906 und 1908, sowie neues Jahrb. für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, Stuttgart 1911.

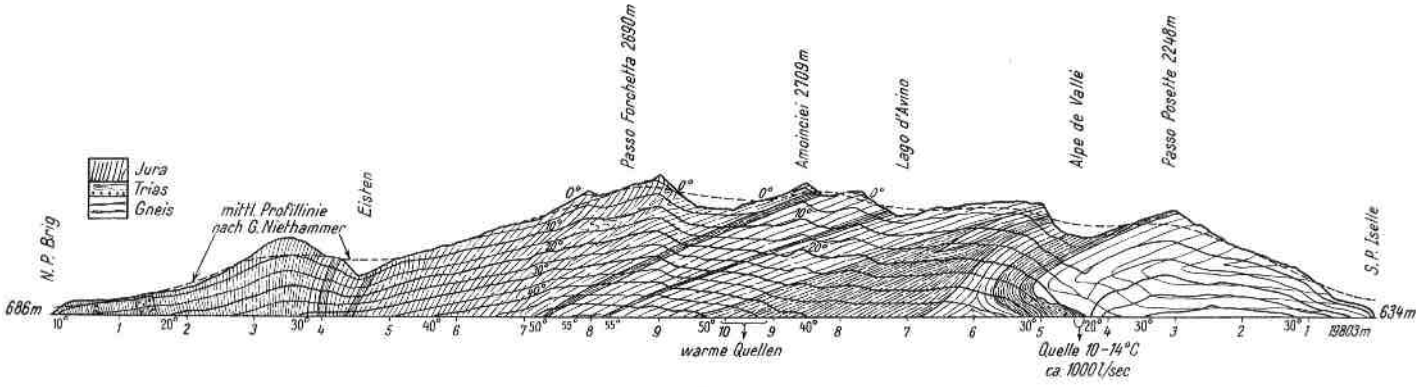

Abb. 15
Simplontunnel, Geologisches Profil mit Isothermen nach G. NIETHAMMER

SCHMIDT, SCHARDT, NIETHAMMER, LUGEON, V. WILLMANN u. a. verwiesen (Abb. 15).

Die Arbeiten von THOMA, KÖNIGSBERGER und dessen weiteren Mitarbeitern haben die Frage der Wärmeverteilung im Innern des Gebirges physikalisch abgeklärt. Sie vermitteln eine richtige Vorstellung davon. Bei der praktischen Anwendung ihrer Methode sind jedoch so viele zum Teil willkürliche Annahmen und Annäherungen zu machen, dass es fraglich erscheint, ob man mit den einfacheren, mehr empirischen Methoden der oben erwähnten Geologen nicht ebensoweit kommt. Das müsste die Erfahrung lehren. Leider ist der einzige grosse Tunnel, für den die Prognose nach der Methode KÖNIGSBERGER-THOMA ausgearbeitet wurde, nicht ausgeführt (Splügen).

e) Die Wasserverhältnisse

Zu den geologischen Vorerhebungen, die der Ingenieur vor der Inangriff. nahme eines grossen Tunnels anregen wird, gehört die Frage nach dem voraussichtlich anzutreffenden Gebirgswasser. Nach der zu erwartenden Menge ist der Tunnelkanal zu bemessen. Nachträgliche Erweiterungen sind stets sehr teuer. Der Ingenieur sollte wenigstens über die Grössenordnung und die ungefähre Lage der Quellen orientiert sein. Quellen wirken auf das Gestein kühlend. Sinkende oder der Überlagerung nicht entsprechende, niedrigere Temperatur im Stollen deutet darauf hin, dass er sich einer Wasserader nähert. Beim Bau soll daher der Verlauf der Temperaturen durch regelmässige Messungen genau verfolgt werden. Je nach den geologischen Verhältnissen ist aber auch auf das Wasser selbst zu achten. Trübes Wasser ist z. B. ein Zeichen dafür, dass irgendwo Gebirgsmaterial mitgerissen wird und mit der Zeit ein Hohlraum entsteht, dessen Einsturz den Tunnel oder das darüberliegende Gelände gefährden kann.

In grossen Tiefen nimmt das Wasser Wärme auf, die es dem Gestein entzieht. Der Tunnel, als hydrostatisch druckloser Raum, saugt das Wasser von weither an. Das gewärmte Wasser dringt in den Tunnel und gibt ihm von seiner Wärme ab. Im Simplontunnel traten bekanntlich an mehreren Stellen warme Quellen auf, die für die Arbeit sehr hemmend waren. Prof. C. SCHMIDT schätzte, dass durch sie das Gebirge auf etwa 2 km um 8° C abgekühlt worden sei, was für die Unternehmung von Vorteil gewesen sei. Eine um 8° C höhere Temperatur hätte eine Vermehrung der stündlich abzuführenden Wärmemenge um etwa 600 000 kgCal verursacht. Die warmen Quellen, von denen eine auf der Nordseite 100 1/s von 47° C, eine andere auf der Südseite 320 1/s von 46° C führte, hätten, die eine 7,9, die andere 24,2 Millionen kgCal/Std an die Tunnelluft abgegeben, wenn es nicht gelungen wäre, sie in den Parallelstollen abzuleiten und dort zu isolieren. Immerhin gaben sie noch 6-7° C ab, was für die erste 2,1, für die andere 6,9 Millionen kgCal/Std ausmacht, also ein Mehrfaches der Erleichterung durch die Verminderung der Gesteinstemperatur (Abb. 16).

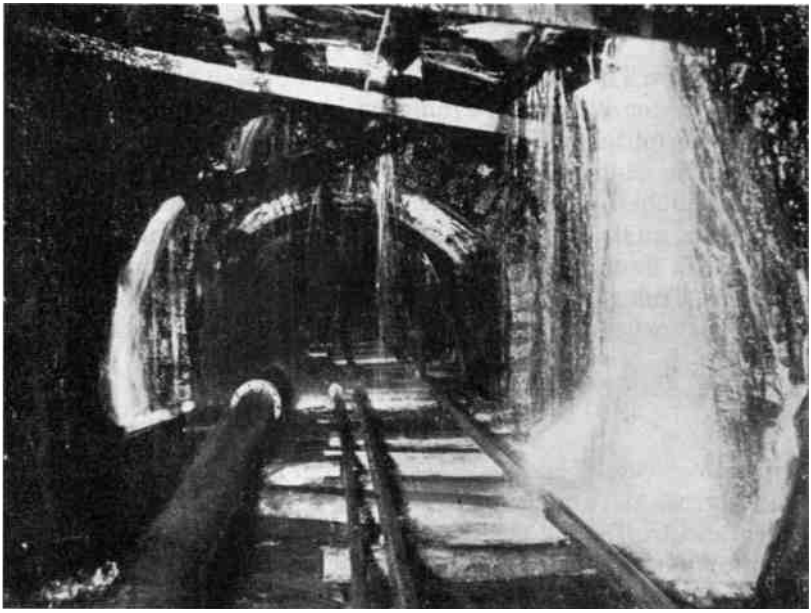

Abb. 16
Simplontunnel II, warme Quelle km 10,625 ab NP

d) Das Zweitunnelsystem

Die Luftmenge, die für die reine Lüftung während des Baues in einen Tunnel eingeführt werden muss, also bloss für die Lufterneuerung, ohne Rücksicht auf die Kühlung, und die, je nach der Grösse der Belegschaft, bei einem nicht tiefen Tunnel 4-6 m:'/s sein wird, kann ohne weiteres durch Röhren bis vor Ort und in die Arbeitsstrecken gebracht werden. Luftmengen wie sie die im Simplon erwarteten und sogar weit überschrittenen Temperaturen erforderten, können jedoch so nicht gefördert werden. In der fertigen Strecke kann ein Rohr von 0,80-1,00 m Durchmesser gelegt werden; durch die Arbeitsorte jedoch nur ein solches von höchstens 0,40-0,45 m Durchmesser. Dabei würde für ein Luftvolumen von 25-35 m^3/s der Leitungswiderstand so gross, dass die Luft mit einem Überdruck von 5-6 at eingeführt werden müsste. Bei einem Energiepreis von nur 0,05 Fr./kWh würden die Kosten für die Erzeugung dieser Druckluft bei einem Tagesfortschritt von 8 m auf etwa 1,3 Millionen Franken für den Kilometer zu stehen kommen. Im Simplontunnel stieg die Temperatur auf einer Länge von 16 km über 25° C. Die Energiebeschaffung allein für die Lüftung wäre somit auf etwa 21 Millionen Franken gekommen, ohne die Kosten der entsprechenden Maschinen, Röhren usw. Mit diesen hätte die Ventilation allein etwa 30 Millionen gekostet.

Hauptsächlich aus diesem Grunde wurde für den Bau des Simplontunnels das Zweitunnelsystem gewählt, das darin bestand, statt einen zweispurigen, zwei einspurige Tunnel nebeneinander zu erstellen, wovon, aus Ersparnisgründen, zunächst nur einer (der östliche), Tunnel I, sogleich fertig ausgebaut wurde, während vom andern, Tunnel II, nur der Richtstollen als Parallelstollen zum Haupttunnel aufgefahren wurde (Abb. 17). Beide Stollen

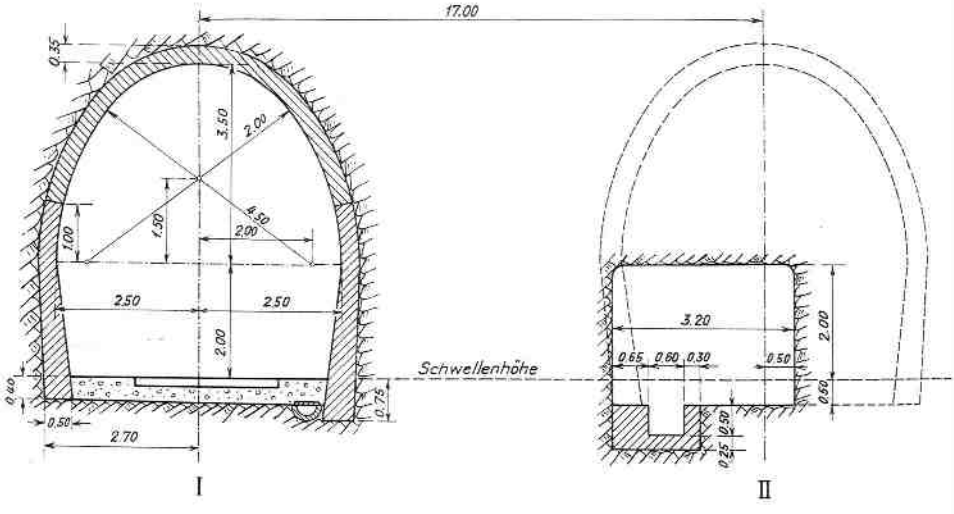

Abb. 17
Simplontunnel, Querschnitt

wurden alle 200 m durch einen Querschlag verbunden. Durch das Mundloch von Stollen II wurde die Frischluft eingeführt. Diese strich bis zum vordersten Querstollen, der jeweilen einzig offen blieb, während die andern durch gemauerte Wände und Holztüren abgeschlossen wurden, durch diesen nach Tunnel 1 hinüber und dort durch die Arbeitsorte der Ausweitung und der Mauerung, wo die meisten Arbeiter beschäftigt waren, wieder zurück durch Portal 1 ins Freie. Bei A (Abb. 18) wurde durch kleinere Ventilatoren, später durch Strahlgebläse, die für vor Ort notwendige kleine Luftmenge (1-2 m^3/s) angesaugt und als sekundäre Ventilation durch Blechröhren nach vorn gebracht. Infolge des grossen Querschnittes des Stollens — 6 m^2 in seinem vordersten Teil und 8 m^2 in der fertig hergerichteten Strecke —erforderte die Einführung der Luft nur einen Überdruck von etwa 350 mm WS (rund 200 kW). Vor dem Bestreichen der einzelnen Arbeitsstellen wurde die Luft jeweilen durch einen mit Strahldüsen erzeugten Wasserschleier gekühlt. Die Materialförderung wurde dadurch nicht gestört, da die Materialzüge des Vortriebes durch Stollen II verkehrten. Wo es notwendig erschien, wurde Stollen II provisorisch mit einer Mäuerung versehen.

Diese Anordnung hat sich am Simplon bewährt. Sie erleichterte auch die Überwindung der Druckstrecken, sowie die bereits erwähnte Ableitung des Wassers, besonders der warmen Quellen. Dem System wurden gelegentlich hohe Kosten vorgeworfen. Doch ist zu bedenken, dass die Ersparnis an der Ventilation den grössten Teil der Kosten von Tunnel II aufwog, und dass alle andern Lösungen, die nachträglich vorgeschlagen wurden, den primären Luftkreislauf nicht wie beim Zweitunnelsystem vor , sondern hinter die Hauptarbeitsorte bringen. Die hohen Temperaturen hätten damit kaum überwunden werden können, auch andere Schwierigkeiten nicht. Die warmen Quellen hätten sich katastrophal ausgewirkt. Der Lötschbergtunnel wurde wieder als einfacher, zweispuriger Tunnel ausgeführt. Die Temperatur stieg dort auf kurzer Strecke nur auf 32° C, wobei sich bereits Schwierigkeiten abzuzeichnen anfingen.

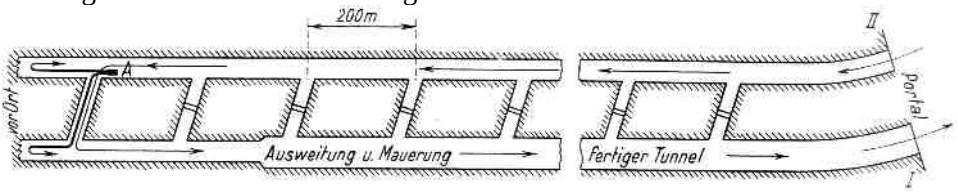

Abb. 18
Simplontunnel, Situation

Bedenken technischer Art erweckte hauptsächlich die Nachbarschaft zweier Tunnel mit Rücksicht auf ihre Standfestigkeit, besonders beim Ausbau von Tunnel II, das heisst mit Rücksicht auf den Gebirgsdruck. Die diesbezüglichen Erfahrungen beim Ausbau des zweiten Tunnels können folgendermassen kurz zusammengefasst werden: In Tunnel II traten im allgemeinen die gleichen Erscheinungen auf, wie früher in Tunnel I. Die Vorgänge, wie sie zum Beispiel BRANDAU 1909 in der SBZ beschrieb, konnten wieder genau verfolgt werden und wurden bestätigt. Dabei kamen zwei typische Abweichungen vor: Die Druckstrecke der Südseite (km 4,5) war immer noch stark drückend, aber nicht mehr so wie seinerzeit in Tunnel I, teils weil sie unterdessen etwas drainiert worden war, zum Teil aber auch infolge Anwendung einer rationelleren Bauweise. Ferner kamen im Monte-Leone-Gneis die Bergschläge nur noch an der von Tunnel 1 abgekehrten Ulme vor. Firstdruck blieb auch hier unbekannt, bis auf einige kurze Strecken, in denen der Felskern zwischen beiden Tunneln etwas zu schwach war und leicht nachgab. Das waren die Strecken, in denen Tunnel II belgisch abgebaut wurde (Abb. 5). Also wieder, abgesehen von den beiden Druckstrecken in verdrücktem Gestein von zusammen 120 m Länge, lange Strecken ohne Druck, dann Druckzunahme gegen das Tunnelinnere (bei gleichzeitigem Flacher-werden der Schichtneigung). Nirgends schwerer Druck, aber immer allge-

meiner werdender Ulmendruck (Seitendruck), je mehr sich der Ausbau der grössten Überlagerung näherte.

Worauf man allgemein gespannt war, das waren die Einwirkungen des Ausbaues auf den nahen Tunnel I. Allgemein kann gesagt werden, dass sie geringer ausfielen, als man befürchtet hatte. Ein direkter Einfluss der Sprengschüsse konnte nicht beobachtet werden. In der Druckstrecke der Südseite war die Wirkung auf Tunnel I nur schwach. Nur der nördliche Anschlussring, der noch nach normalem Profil gemauert war, wurde stärker beschädigt. Dies zeigt, dass dort immerhin eine erhebliche Druckvermehrung nach Tunnel I stattfand. Auf der Nordseite war der gegenseitige Einfluss gering. Nennenswerte Beschädigungen von Tunnel I kamen nur in der Eistenmulde (km 4) auf etwa 70 m Länge, sowie auf etwa 100 m im Val-Grande-Gneis bei km 8 vor. Die Wechselwirkung äusserte sich durchweg dadurch, dass die Widerlager etwas zusammengingen und das Gewölbe im Scheitel Abbrennungen zeigte, also typischer Seitendruck. Auf der Südseite trat die Wechselwirkung, gleich wie der einfache Druck im Einzeltunnel, von km 5,2, das heisst vom Eintritt in die dünnen horizontalen Schiefer an, kontinuierlicher auf. Während auf der Nordseite gebrochene Widerlager in Tunnel I eine seltene Ausnahme waren, wurden diese auf der Südseite infolge der allgemeinen Bewegung häufiger in Mitleidenschaft gezogen. (Vielleicht spielte hier auch der für die Mauerung verwendete spröde Antigoriogneis eine Rolle.) Die stärkste und unangenehmste Erscheinung trat auf der Südseite bei km 3,250 auf. Dort erfolgte am Zwischenpfeiler ein heftiger Bergschlag, der in Tunnel II selbst keine sichtbaren Folgen hatte. Aber in Tunnel I wurde das Widerlager auf 23 m Länge in den Tunnel hineingeschoben, maximal 0,42 m. Die Stelle liegt im harten, spröden Antigoriogneis. Das Gewölbe litt keinen Schaden. Von dieser Stelle abgesehen, stand der Einfluss auf Tunnel I stets im Verhältnis zum Druck im Einzeltunnel. Alle diese Erscheinungen wären ausgeblieben, wenn der Achsabstand grösser gewesen wäre. Aus den praktischen Beobachtungen im Simplontunnel, besonders beim Ausbau des zweiten, kann geschlossen werden, dass bei einer Achsentfernung von 25 m Wechselwirkungen zwischen den beiden Tunneln kaum mehr vorgekommen wären. Wo nicht besondere Umstände entgegenstehen, wird man sicherheitshalber in Zukunft die Entfernung noch grösser, etwa 40-50 m, wählen. Die festgestellten Mängel sind nicht ein Fehler des Systems.

4. Die grossen Juradurchstiche

Im Schatten der grossen Alpendurchstiche treten die Juradurchstiche, selbst die beiden grössten, Hauensteinbasis- und Grenchenbergtunnel, etwas zurück. Und doch gehören sie zum Bild des schweizerischen Tunnelbaues und seines Zusammenwirkens mit der Naturwissenschaft, besonders der Geologie; denn sie gaben wertvolle Aufschlüsse und vermehrten die beidseitigen

Erfahrungen. Schon der Weissensteintunnel hatte die Doppelfalte der Weissensteinkette erkennen lassen. Besonders viel Neues brachten jedoch die beiden erwähnten Basisdurchstiche. Professor BUXTORF hat darüber berichtet[13"]).

Eine wertvolle Bereicherung der Wissenschaft waren sowohl die Aufschlüsse, die der Hauensteinbasistunnel über die Bildung des Tafeljura gab, wie ganz besonders auch die Entdeckung eines eingeschachtelten Gewölbes im Kern des Grenchenberges. Diese war so überraschend und unvorsehbar, dass sie BUXTORF veranlasste, seinem Bericht den Vers von Wilhelm Busch voranzusetzen:

«Aber hier und überhaupt
Kommt es anders als man glaubt.»

Die unangenehmste Überraschung für die Erbauer brachten die Wassereinbrüche der Strecke km 1,400-1,615 der Südseite des Grenchenbergtunnels. Zuerst wurden bei km 1,413 grössere Quellen angeschlagen, welche das Versiegen des Dorfbaches von Grenchen zur Folge hatten. Endlich wurde bei km 1,615 ein grosses Wasserbecken angeschlagen, das die Form eines grossen Spaltes zeigte, der quer zur Tunnelachse lag und den Zugang zu einer grossen Höhle bildete, über deren Inhalt die Tatsache einen Begriff gibt, dass in der Zeit vom 27. Januar bis 20. Juni 1913 im ganzen 6 000 000 m3 Wasser aus dem Tunnel abflossen, was ungefähr dem Inhalt des Seelisberger- oder Amsoldingersees entspricht[14].
Zu jener Zeit ereigneten sich sogar drei lokale Erdbeben, deren Schüttergebiet nur gerade die nächste Umgebung von Grenchen umfasste, die aber hier ungewöhnlich stark in Erscheinung traten, und die Dr. A. DE QUERVAIN auf die grossen Wasserverluste zurückführte[15]).

5. Schlusswort

Wir dürfen diesen Rückblick nicht abschliessen, ohne kurz derer zu gedenken, deren Leben die beschriebenen Werke forderten. Ein ähnliches Schicksal wie Louis FAVRE ereilte auch ALFRED BRANDT, den Erfinder der nach ihm benannten Bohrmaschine und Mitglied der Simplonbaugesellschaft. Er starb während des Baues des Simplontunnels im Jahre 1899 in Brig. Durch Unfälle forderte das Gebirge das Leben mancher Ingenieure, Vorarbeiter und namentlich zahlreicher Arbeitssoldaten. Es waren dies grösstenteils

---

[13] Verhandlungen der N.F.G. Basel, Band XXVII, 1916.

[14] S. SBZ, 15. 11. 1913; betr. Wasserverhältnisse in Kalkgebirge s. auch L. WENDEL, SBZ, 13.6. 1942.

[15] Jahresbericht 1915 des Schweiz. Erdbebendienstes.

Söhne unseres Nachbarlandes Italien, das uns in der ganzen Bauzeit unserer grossen Tunnel jene fleissigen, geborenen Mineure sandte, ohne die wir uns deren Ausführung nur schwer vorstellen können. Schon allein die drei grossen Alpendurchstiche erforderten grosses Blutopfer: Gotthard 177, Simplon (1 und 11) 80, Lötschberg 64 Leben. Dazu kommen die Opfer der kleinem Tunnel (Hauenstein I!).

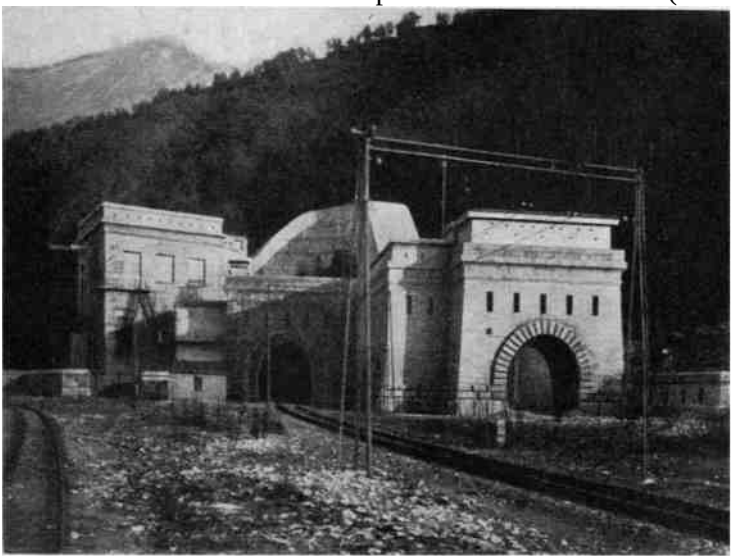

Abb. 19
Simplontunnel, Nordportal mit Ventilationsanlage (Brig)

Formales
15.7 x 22.5 cm
Dicke Gesamt 2.39 mm, Papierdicke: 0.079 mm, 24 Blätter (etwa 90 g/m^2), gut gestrichen, weiss.
(Umschlag Halbkarton blaugrün 0.21 mm.dick) Gesamtgewicht 88 g
Leim-Fadenbindung
Serifenschift etwa Times, Bleisatz, Rasterclichées + Strichclichées
Umbruch Seitentreu aber nicht Zeilentreu