

Gebirgsdruck und Tunnelbau

Autor(en): **Andreae, C.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **74 (1956)**

Heft 8

PDF erstellt am: **19.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-62578>

Nutzungsbedingungen

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

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

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

Haftungsausschluss

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

Gebirgsdruck und Tunnelbau

DK 624.191:622.831

Von Prof. Dr. C. Andreae, Zollikon bei Zürich

Vortrag im Rahmen des Fortbildungskurses der ETH und G.E.P., gehalten am 19. Oktober 1955

I. Der Gebirgsdruck

Gebirgsdruck ist eine im Tunnel- und Stollenbau häufige Erscheinung. Er kann, unabhängig von der Ueberlagerungshöhe, in lockeren oder schwellenden (blähenden) Gebirgen als Lockerungs- oder als Schwelldruck auftreten, oder, von der Ueberlagerungshöhe abhängig, in grosser Tiefe als Folge der Belastung durch das übergelagerte Gebirge als sog. «echter Gebirgsdruck».

1. Der Lockerungsdruck und die Art seines Auftretens

Lockerungsdruck kann hauptsächlich in Alluvium, Moräne, tertiären Ablagerungen und Trias, aber auch in festen Felsformationen entstehen, wenn diese durch den Schub und die Faltungen der Gebirgsbildung gelockert sind, was oft der Fall ist. Sie sind dann von zahlreichen Schicht- und Klüftfugen durchzogen, nach denen sich Gesteinsstücke unter dem Einfluss der Schwerkraft lösen, sobald ihnen durch den Stollenbau der Halt entzogen wird. Der Lockerungsdruck tritt hauptsächlich als *Firstdruck* auf.

2. Die Grösse des Lockerungsdruckes

In einigermaßen homogenen, lockeren, erdigen Gebirgen unter kleinen Ueberlagerungen können die auf den Tunnel (die Verkleidung) wirkenden Kräfte nach der Erddrucktheorie berechnet werden. Mit diesem Problem beschäftigten sich besonders *Wilh. Ritter* [1], *A. Bierbaumer* [2] und *O. Kommerell* [3]. Wenn die Höhe der Ueberlagerung ein bestimmtes Mass übersteigt, das mit der Beschaffenheit des Gebirges veränderlich ist, dann nimmt nicht mehr die ganze Ueberlagerungshöhe am Drucke teil. Es bildet sich über dem Hohlraum ein natürliches Gewölbe, und nur was darunter liegt (spannungsloser Körper) lastet auf dem Einbau (Bild 1). Von dieser Tiefe an bleibt der Firstdruck von der Höhe der Ueberlagerung unabhängig. Die Höhe des so auf dem Tunnel lastenden Druckkörpers abzuschätzen, ist recht unsicher. *Kommerell* berechnet diese Höhe nach der Formel $h = 100 a/p$, wobei a die Senkung der First, p die bleibende Auflockerung des betreffenden Gebirgsmaterials in Prozent bedeuten. Diese beiden Grössen sind etwas problematisch. Immerhin gibt diese Formel einen Anhaltspunkt für die Schätzung.

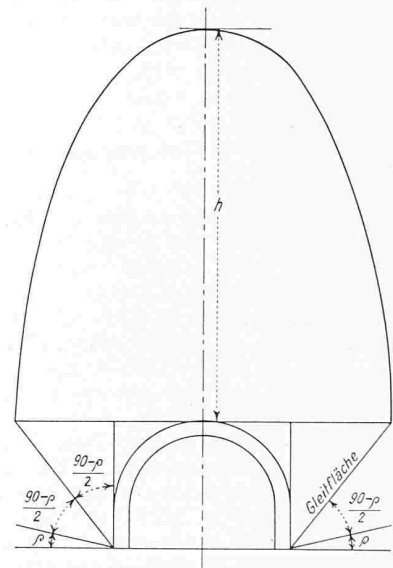
In gebräuchem Fels wird die Berechnung noch problematischer. Mit diesem Problem beschäftigte sich *K. Terzaghi*,

dessen Angaben [4] praktische Winke für den Bauvorgang geben. Als solche sind alle Berechnungsarten für den Gebirgsdruck zu betrachten; denn ihre *quantitativen* Ergebnisse beruhen auf zu vielen zum Teil willkürlichen Hypothesen, und sie sind mit zu vielen Fehlerquellen behaftet, als dass dabei von einer wirklichen Berechnung gesprochen werden könnte. Immerhin geben solche Untersuchungen ein *qualitatives* Bild des Kräftespieles, was für die Bauausführung wichtig sein kann.

3. Der Schwell- oder Blähdruck

Solcher entsteht durch Volumenvergrösserung infolge Wasseraufnahme aus dem Innern des Gebirges oder aus der Luft, z. B. in Ton- und Kalkmergeln [5]. Seine Stärke lässt sich nur durch Versuche im Laboratorium schätzen. Am bekanntesten ist die Erscheinung bei der Verwandlung von Anhydrit in Gips, die sehr verschieden sein kann. Im Simplon

Bild 1. Druckkörper nach Kommerell



Die Bilder 2 und 3 beziehen sich auf den Simplontunnel

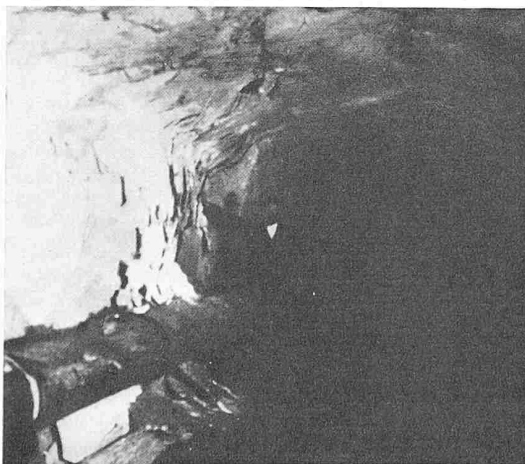


Bild 2. Bergschläge im Monte-Leonegneis

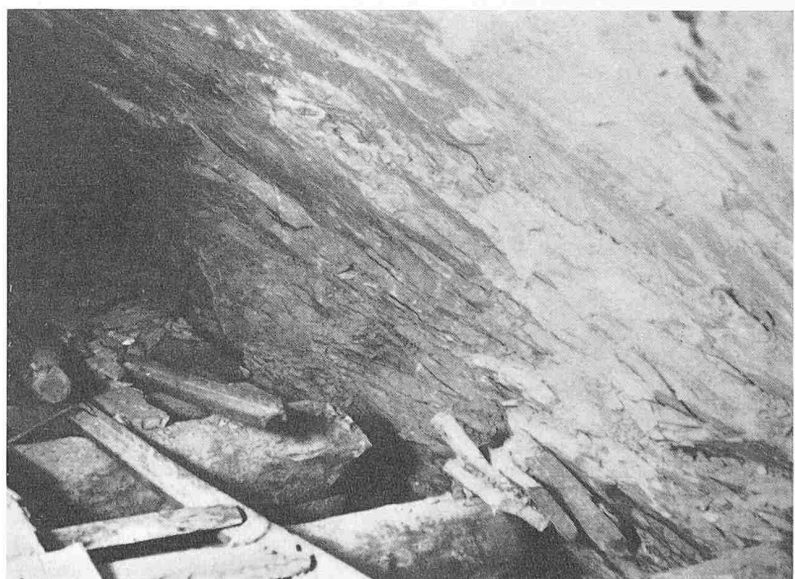


Bild 3 (rechts). Stollenerhöhung Km 9,712÷9,733 ab Nordportal. Natürliche, in Bild 4 sichtbare Gewölbebildung durchschnitten

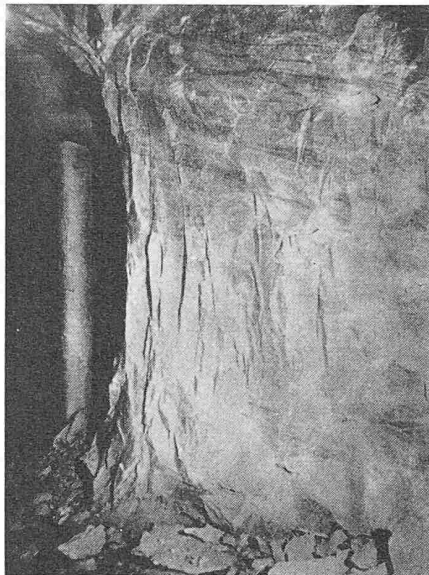


Bild 4. Beginnender Bruch der westl. Ulme
Km 9,760 ab Nordportal

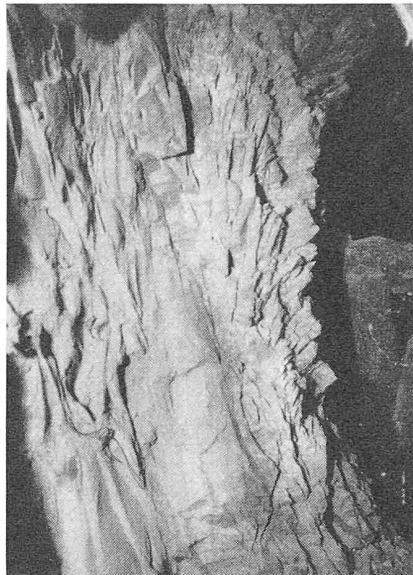


Bild 5. Fortschreitender Bruch der westl.
Ulme nach der Stollenerhöhung, Km 9,743 ab
Nordportal

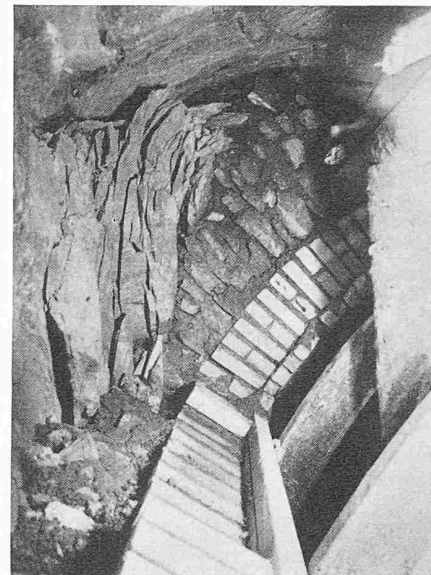


Bild 6. Entspannung (Bergschläge) im Vollausbruch, Km 9,672 ab Nordportal

zum Beispiel, blieb Stollen II in Anhydrit bei Km. 9,7 ÷ 9,8 ab Nordportal etwa 10 Jahre lang unverkleidet, ohne Schwellen, obschon die Luft dort sehr wassergesättigt war (es war in der Nähe der warmen, dampfenden Quellen). Auch im vor wenigen Jahren aufgefahrenen Stollen Isère-Arc [6] in den savoyischen Alpen, blieb der angetroffene Anhydrit, selbst bei direktem Wasserzutritt, ruhig, während im Hauensteinstuntunnel durch den Uebergang von Anhydrit in Gips sehr starke Blähungen entstanden.

4. Der echte Gebirgsdruck

Die Tiefe, in der solcher auftritt, hängt vom Gebirge und seiner Festigkeit ab. In den Alpen, im Gotthard, Simplon, Lötschberg und neulich auch im Durchstich Isère-Arc wurde er von einer Ueberlagerung von etwa 1500 m an beobachtet. Besonders charakteristisch waren die Gebirgsdruckerscheinungen im Simplontunnel [7, 8], dessen Ueberlagerung auf rd. 9 km Länge 1500 m übersteigt. Der Druck war in Erscheinung und Wirkung vom Lockerungsdruck verschieden, indem hier, im Gegensatz zum Lockerungsdruck in geringer Tiefe, *Seitendruck vorherrschte*. Die Erscheinung nahm mit der Tiefe an Regelmässigkeit und Intensität zu.

Hartes, kompaktes Gebirge war zunächst durch die Last der Ueberlagerung noch unter der Elastizitätsgrenze beansprucht. Sobald durch den Stollenvortrieb ein Hohlraum geschaffen wurde, erfolgte an den Ulmen eine Entspannung, die sich durch Ablösung von Schalen, wie bei Probekörpern unter der Druckpresse, äusserte, z. T. in Form heftiger «Bergschläge». Typisch war dabei, dass der Stollen das Bestreben hatte, nach und nach einen kreisähnlichen Querschnitt anzunehmen. Durch Bildung eines zylindrischen Gewölbes erstrebte das Gebirge wieder eine Gleichgewichtslage (Bilder 2 bis 6). Das war im Simplon die Erscheinung in bankigen Gneisen, in Marmor und Anhydrit unter Ueberlagerungen von 1500 bis etwa 1750 m. In den steilgestellten kristallinen Schiefern des Mont Bellachat, die der Stollen Isère-Arc durchfuhr, hielt diese Erscheinungsart des Gebirgsdruckes bis zur grössten Ueberlagerung durch, die dort 1950 m betrug. Hier schien allerdings die Grenze des elastischen Bereiches erreicht zu sein.

Als dann im Simplon die Ueberlagerung allmählich noch höher wurde (sie erreichte beinahe 2200 m), besonders in weniger harten, durch die Gebirgsbildung stärker verarbeiteten Gebirgsarten, trat das Gestein in den plastischen Verformungsbereich. Es lösten sich nicht mehr Entspannungsschalen (Bergschläge) ab, sondern das Gebirge drängte sich plastisch in den Hohlraum. Die Ulmen wichen der Last durch Vordrängen in den Stollen aus, das «Dach» des Stollens wurde durch den Seitendruck herausgequetscht (Bilder 7, 8), die Sohle ebenfalls durch Seitendruck nach oben gedrückt (Bild 9).

5. Die Grösse des echten Gebirgsdruckes

Wirkung und Grösse des echten Gebirgsdruckes sind immer noch Gegenstand intensiver Forschung, besonders im Bergbau, der allmählich in immer grössere Tiefen gelangt. Der erste, der sich mit diesem Problem wissenschaftlich befasste, war Prof. Alb. Heim. Er betrachtete den (echten) Gebirgsdruck, wie er im Gotthard und später im Simplon beobachtet wurde, als «hydrostatischen» Druck des unter der Ueberlagerungslast (latent) plastisch gewordenen Gesteines. Dem widersprachen jedoch die Erfahrungen der Praxis. Heim schätzte diesen «hydrostatischen» Druck nämlich so hoch ein, dass nach ihm schon in einer Tiefe von 500 m Sohlgewölbe nötig gewesen wären, und bei einer Ueberlagerung wie die des Simplontunnels ein Durchstich nur unter Anwendung prohibitiver Baustoffe und Dimensionen für seine Verkleidung Bestand hätte haben können. Zudem hatte die ganze Erscheinung nicht den Charakter hydrostatischen Druckes [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 16]. Heim stützte seine Theorie auf die damals mit der Druckpresse der Materialprüfung festgestellte Würfel Festigkeit der Gesteine. Man entdeckte erst später, dass die Druckfestigkeit eines festen Körpers auch eine Funktion des Verhältnisses seiner Höhe zu seiner Grundfläche ist, und erst die Versuche von Karman und Considère [14] zeigten, wie weit höher die Druckfestigkeit umschnürter und allseitig gepresster Körper ist. Als solcher ist das Gestein im Berginnern zu betrachten. Hierauf machte besonders Maillart in den Jahren 1922 und 1923 aufmerksam [15]. Jüngere Forscher dehnen ihre Betrachtungen nicht nur auf den elastischen, sondern auch auf den plastischen Bereich des Gebirgsdruckes aus, so besonders Kastner [17]. Immer mehr weist die fortschreitende Erkenntnis darauf hin, dass Heims Idee grundsätzlich, qualitativ, doch nicht so abwegig war, wie es lange schien, dass er sich aber, weil die erwähnten Erkenntnisse des physikalischen Verhaltens gedrückter Körper damals noch unbekannt waren, in der Grössenordnung der Kräfte und der in Betracht fallenden Tiefen täuschte. Auch war die Bezeichnung «hydrostatischer Druck» für das betrachtete Phänomen unzutreffend. Wenn diese Annahme betreffend die Theorie Heims zutrifft, dann muss es also doch eine «kritische Tiefe» geben, von der an ein Tunnel nur noch mit prohibitiv teuren Mitteln oder überhaupt nicht mehr erstellt werden kann, nur liegt sie bedeutend tiefer als Heim annahm. Nach der von Maillart angegebenen Formel für den Gebirgsdruck [15] wäre diese «kritische Grenze» bei einer Ueberlagerung von etwa 2500 m erreicht [18]. Da aber die Materialkonstanten Maillarts für den Seitendruck im kristallinen Gebirge wohl etwas zu hoch angenommen sind, und von seiner Berechnungsart das gleiche wie von den früher angegebenen gesagt werden muss, d. h. dass sie mehr qualitative als quantitative Bedeutung haben, kann diese Grenze wahrscheinlich etwas höher angenommen werden. Jedenfalls

sollten grössere Ueberlagerungen nur sukzessive angenommen werden. Sprunghaft, ohne vorherige Erfahrung mit höheren Ueberlagerungen als den bisher erreichten, auf bedeutend höhere zu gehen, z. B. auf 3000 m, könnte zu unangenehmen Ueberraschungen führen.

Ueber die wirkliche Grösse der Kräfte, die auf den Einbau des Tunnels oder Stollens wirken, geben am besten Messungen Auskunft, wie sie heute im Bergbau üblich sind [19, 20].

II. Die Baumethoden (Bau- und Betriebsweise)

1. Grundsätzliche Bemerkungen

Naturkräfte sind nur durch Klugheit zu überwinden. Es gibt daher keine in allen Fällen «beste Baumethode». In jedem Einzelfall muss die Methode den vorliegenden Verhältnissen angepasst werden. Massgebend ist, dass die Methode am wirtschaftlichsten und raschesten zum Ziele führen muss. Das verlangt in Gebirge, das zu Druck neigt, dass die Methode gestatte, das Auslösen von Druck möglichst zu vermeiden; denn das ist immer wirtschaftlicher als wirksam gewordenen Druck zu überwinden.

Wenn ein zur Wirkung gelangter schwerer Druck auf einer längeren Strecke schliesslich glücklich überwunden wurde, so will das noch nicht heissen, dass die dabei angewandte Methode die richtige war. In manchen Fällen ist es nicht *dank*, sondern *trotz* der gewählten Baumethode gelungen, durchzukommen. Eine andere hätte den Druck wahrscheinlich vermindert oder überhaupt vermieden.

Die Erfahrungen, die guten und die schlechten — aus diesen lernt man ja am meisten — haben in der Schweiz zur Zeit der Erstellung unserer grossen Eisenbahndurchstiche immer mehr dazu geführt, die Baumethoden nach dem Grundsatz zu entwickeln, dass sie im druckhaften Gebirge ermöglichen müssen, *in kürzester Frist nach Aufschluss des Gebirges die Verkleidung fertigzustellen* [21]. Dieses Ziel kann nur durch Bauweisen erreicht werden, die eine rasche Ausführung des Vollausschlusses ermöglichen. Rasch und korrekt kann aber nur dort gearbeitet werden, wo genügender Raum dem Arbeiter grösstmögliche Bewegungsfreiheit gewährt, wo er möglichst wenig eingengt ist. Das ist die erste Bedingung für rasches und gleichzeitig auch sicheres und sauberes Arbeiten. Es ist ein Irrtum, der schon vor mehr als 80 Jahren von Rziha erkannt wurde, zu glauben, dass man in druckhaftem Gebirge mit kleinen Hohlräumen, kleinen Stollen und Aufbrüchen sicherer gehe. Das Gegenteil hat sich seither in allen unsern grossen Tunnelbauten bewährt. *In kleinen Räumen ist man bei Auftreten von Druck wehrlos.*

Druck entsteht in der Regel nicht plötzlich, sondern erst allmählich, allerdings dann immer rascher und intensiver. Diese Eigenschaft ist ausschlaggebend. Eine Methode, die mit kleinteiligen Mitteln vorgeht, beunruhigt das Gebirge immer wieder und länger. Der Druck kommt dabei stärker zur Geltung, als wenn grosszügiger vorgegangen wird. Man darf im Tunnelbau nicht etwa unvorsichtig sein, es muss im Gegenteil stets überlegt und umsichtig gehandelt werden, aber *entschlossen*. Zaghafte Arbeit führt auch hier zu Misserfolg.

Diese Grundsätze wurden zur Zeit der grossen Tunnelbauten ganz besonders in unserem Lande durch die jahrzehntelange Erfahrung mehrerer Generationen von Tunnelbauern entwickelt. Ihnen ist es grossenteils zu verdanken, dass wir

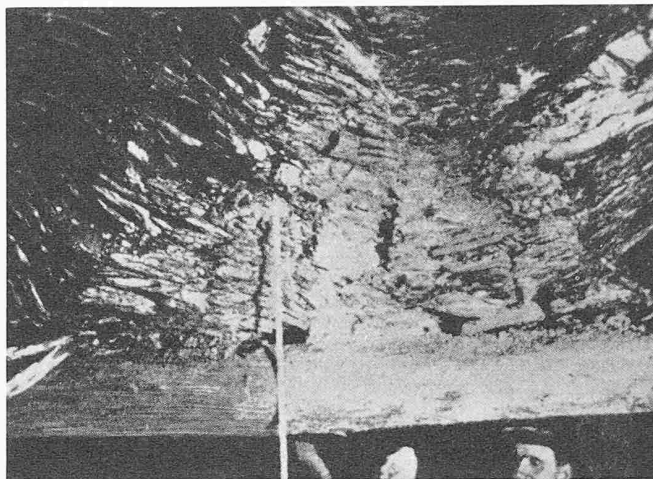


Bild 7. Stollenfrist im Lebendungeis Km 6,130 ab Südportal

in der Schweiz, mit Ausnahme der bekannten, 50 m langen Strecke auf der Südseite des Simplontunnels, keine «berühmte» Druckpartie erlebten. Um das zu erreichen, mussten schon vor 80 Jahren (schon durch Rziha) einige veraltete Baumethoden (z. B. die deutsche Kernbauweise), die den angeführten Grundsätzen nicht entsprachen und sich deshalb als untauglich erwiesen, aufgegeben werden, und es sollten diese abgestandenen Ladenhüter nicht wieder hervorgeholt und als neu angepriesen werden [8, 22, 32].

2. Der Vollvortrieb

Die Erfindung von leistungsfähigen Geräten für die mechanische Schutterung in Schweden und den USA während des letzten Krieges, womit die letzte Lücke der Mechanisierung des Tunnelbaues geschlossen wurde, führte überall, wo die geologischen, d. h. die Druckverhältnisse dies zulassen, zwangsläufig zum «Vollvortrieb», d. h. zum Vortreiben der Tunnel und Stollen mit dem ganzen Querschnitt; denn die mechanische Schutterung ist nur zweckmässig und wirtschaftlich, wenn die teuren Geräte ihre ganze Leistungsfähigkeit an einer Stelle konzentriert, also vor Ort, entfalten können.

Der Vollvortrieb hatte sich seit dem zweiten Weltkrieg in Schweden bei sehr grossen Querschnitten in den dortigen ausserordentlich standfesten Graniten bewährt. Auch in den USA werden schon seit längerer Zeit Tunnel von grossen

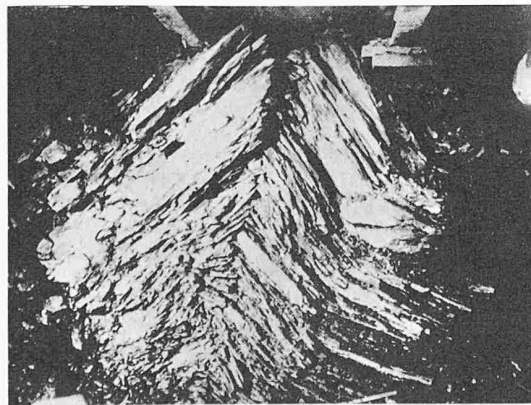
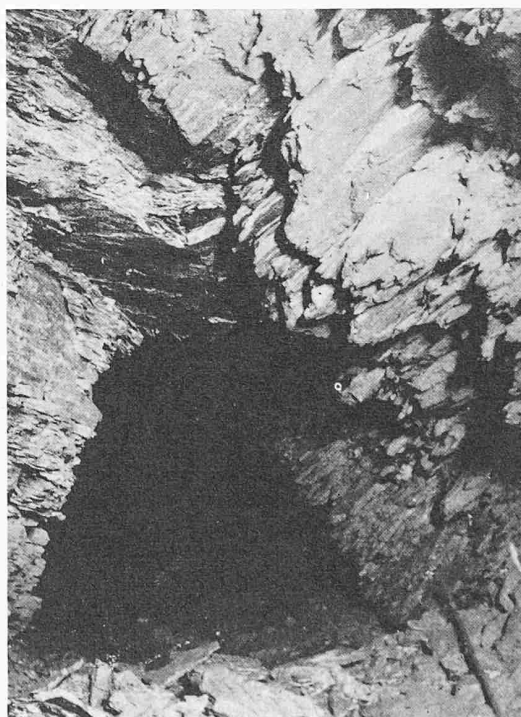


Bild 8 (links). Ausbruch für das Sohlgewölbe im Lebendungeis, Km 6,740 ab Südportal

Die Bilder 4 bis 9 beziehen sich auf den Simplontunnel

Bild 9 (rechts). Seitendruck Km 7,7 ab Südportal hat «Dach» herausgequetscht (Kalkschiefer der Vegliamulde)



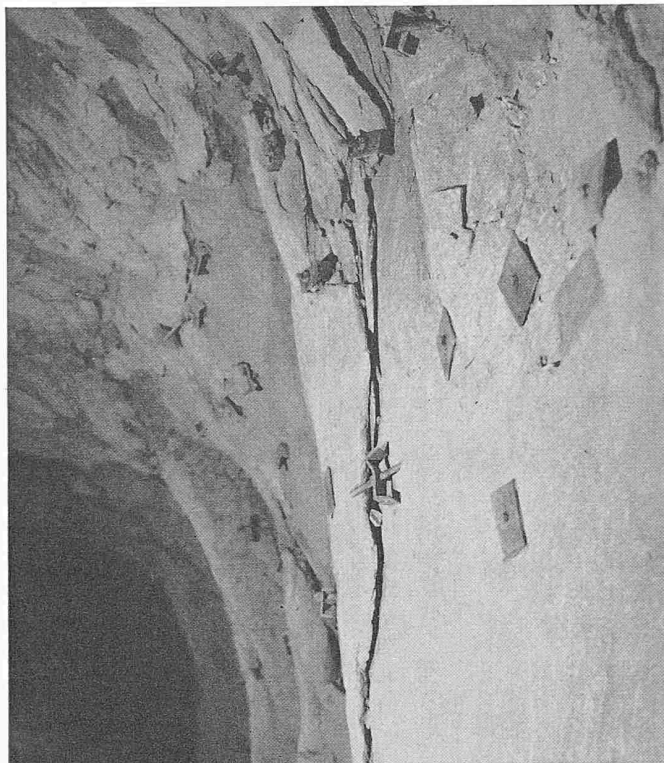


Bild 10. Stollen Isère-Arc, Verankerung einer zu Bergschlag neigenden Ulme (Phot.: H. Baranger, Paris)

Querschnitten im Vollvortrieb aufgeföhren, in gebrächen Gebirgen unter Anwendung von kostspieligen Stahlrahmen [4], und auch bei uns wurden ebenfalls schon viele Kilometer Kraftwerkstollen mit kleinen Querschnitten im Vollvortrieb erstellt. Angesichts der zahlreichen Projekte für Autostrassentunnel durch die Alpen musste man sich fragen, wie weit sich diese neue Methode für ihre Erstellung eignen würde. Von Interesse war daher für uns die Erstellung des 12 km langen Kraftwerkstollens Isère-Arc der EDF in Savoyen in den Jahren 1949 bis 1953. Die Ueberlagerung erreicht dort 1950 m, und sein Ausbruchquerschnitt von 43 m² liegt zwischen dem eines einspurigen und dem eines zweispurigen Eisenbahntunnels. Die Methode hat sich auch dort bewährt. Das Fortschrittempo übertraf das der ältern Alpendurchstiche, Simplon und Lötschberg sowie der grossen Juradurchstiche, Hauensteinbasis- und Grenchenbergstunnel nicht, aber ein ähnliches wurde mit ganz erheblich kleinerer Mannschaft erreicht. Aeusserst wichtig für uns ist, dass der Vollvortrieb sich dort auch in den Strecken bewährte, wo unter der hohen Ueberlagerung echter Gebirgsdruck herrschte. Anfänglich wurden da kräftige Stahlrahmen eingebaut, aber sehr bald ging die Unternehmung der hohen Kosten wegen zum Verfahren der *Verankerung* über, das sich schon seit einiger Zeit im Bergbau bewährt [6] (Bild 10). Diese Methode ermöglichte eine Verengung des Ausbruchprofils zu vermeiden, was bei Vollvortrieb wichtig ist, um die grossen Geräte, wie das Bohrgestell (Jumbo) usw. durchbringen zu können. Sie ist zudem eine billige Methode, die nur bei Vollvortrieb rationell anwendbar ist, wobei, umgekehrt, zu sagen ist, dass in diesem Gebirge, im elastischen Druckbereich, nur unter Anwendung dieser Methode der Vollvortrieb in grösseren Profilen noch rationell ist. Es war dieser Stollen wieder ein Beispiel dafür, dass Bauweisen mit möglichst grossen Arbeitsräumen zweckmässig sind, weil sie am schnellsten zur Sicherung des Ausbruches, nötigenfalls auch zum Einbauen der Verkleidung führen. Sie vermindern die Zahl der Arbeitsstufen, von denen jede wieder neue Bewegung auslöst.

Es darf allerdings nicht übersehen werden, dass der Stollen Isère-Arc hauptsächlich im elastischen Bereich des Gebirgsdruckes verlief, den plastischen höchstens streifte (Bild 11). Es gibt Spezialisten, die behaupten, bei Anwendung von genügend langen Ankerbolzen sei die Methode der Verankerung auch im plastischen Bereich mit Erfolg zu verwenden. In Uebergangszonen dürfte das zutreffen; ob aber auch

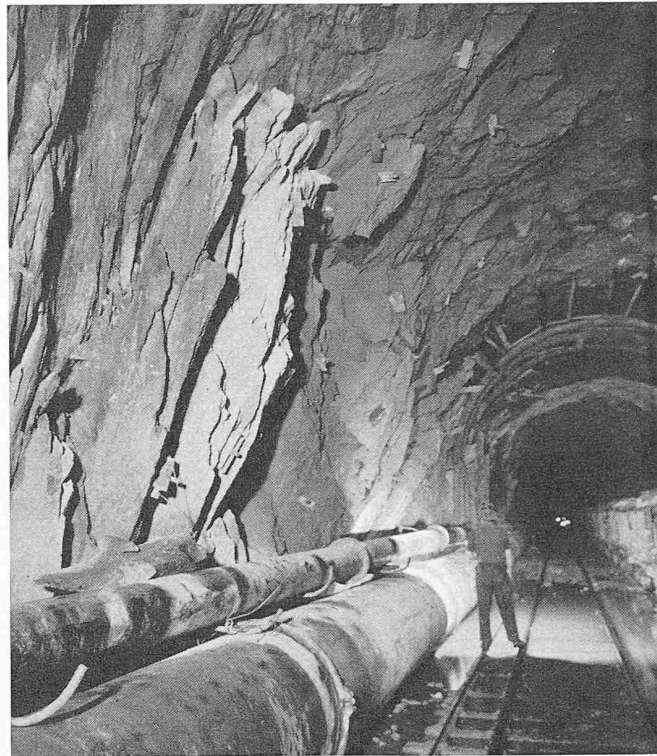


Bild 11. Verankerung einer gedrückten Ulme, Grenze des plastischen Bereiches (Phot.: H. Baranger, Paris)

in Strecken, wie sie die Bilder vom Simplon zeigten (Bilder 7, 8, 9), ist weniger sicher. Jedenfalls wird vorläufig diese Frage besser noch offen gelassen, bis darüber die Erfahrung entscheidet. Die Strecken, in denen im Simplontunnel der echte Gebirgsdruck die Elastizitätsgrenze überschritt, lagen unter Ueberlagerungen von 1750 bis etwa 2200 m. Unter höheren Ueberlagerungen könnten sich doch bedeutende Schwierigkeiten ergeben, um so mehr, als der Querschnitt eines Autostrassentunnels wesentlich grösser ist als der des Stollens Isère-Arc (Ueberlegung des projektierten Mont-Blanc-Tunnels bis 2500 m).

Schluss folgt

Die Kernenergie in der europäischen Energiebilanz der Zukunft

621.311.25:621.039.4

Der Ausschuss für elektrische Energie der Europäischen Wirtschaftskommission der Vereinigten Nationen (Commission Economique pour l'Europe, CEE) prüft die Frage ihrer Mitarbeit auf dem Gebiete der Kernenergie auf Grund eines von seinem Sekretariat ausgearbeiteten Berichtes*). Dieser Bericht enthält eine interessante Bilanz des Energiebedarfs und des natürlichen Energiedangebotes der verschiedenen europäischen Länder. Daraus ergibt sich, dass die meisten europäischen Länder nicht über genügend natürliche Energiequellen verfügen, die es ihnen gestatten würden, ihren Eigenbedarf im Verlaufe der nächsten 20 Jahre zu decken. Sie werden also gezwungen sein, sich mit namhaften Importen zu behelfen oder ihr Defizit durch Beizug von Kernenergie zu decken.

Die Vorräte an festen Brennstoffen sind zwar noch sehr gross. Die jährlichen Fördermengen lassen sich jedoch nicht beliebig steigern, weil man zu immer tieferen Schichten hinabsteigen muss und die verfügbaren Arbeitskräfte seltener werden. Die Weltvorräte an Erdöl sind schwer zu ermitteln; die wahrscheinlichen Vorkommen, die man zu etwa dem Fünffachen der nachgewiesenen annimmt, betragen in Europa nur etwa 2% derjenigen der festen Brennstoffe. Kürzlich in

*) Eine ausführliche Berichterstattung findet man im «Bulletin des SEV» 1956, Nr. 9, S. 19.