

# Gotthardtunnel: Gebirgsdruckprobleme beim Bau des Strassentunnels

Autor(en): **Lombardi, Giovanni**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **94 (1976)**

Heft 13

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-73073>

## **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.

# Gotthardtunnel: Gebirgsdruckprobleme beim Bau des Strassentunnels

Von Giovanni Lombardi, Locarno<sup>1)</sup>

DK 624.192

## Vorbemerkung

Das Thema der heutigen Tagung heisst «Aktueller Tunnelbau in nicht standfestem Gebirge». Ich möchte mir vorerst eine Bemerkung bezüglich des Ausdrucks «standfestes Gebirge» erlauben, obschon es sich hier um eine alteingebürgerte Ausdrucksweise handelt. In Wirklichkeit ist ein Gebirge an sich weder «standfest» noch «nicht standfest».

Erscheinungen, die mit diesen Begriffen in Verbindung gebracht werden, kommen nur anlässlich der Ausführung eines Bauvorhabens vor. Sie sind nicht nur von den physikalischen Eigenschaften des Gebirges, sondern auch von der Überlagerungshöhe, der Grösse und der Form des Hohlraumes und nicht zuletzt vom verwendeten Bauvorgehen abhängig. Die Verwendung der Ausdrucksweise «standfestes Gebirge» lässt sich vielleicht dadurch erklären, dass man bei auftretenden Schwierigkeiten gerne dem Gebirge die ganze Schuld zuschreibt, als ob dieses die Ursache der Schwierigkeiten und nicht allein eine der vorgegebenen Randbedingungen darstellen würde.

Als eigentliche Ursache von Standfestigkeits- oder von Nicht-Standfestigkeitserscheinungen im Tunnelbau ist tatsächlich die Bauausführung zu bezeichnen. Man sollte deshalb richtigerweise von «standfestem» oder «nicht standfestem» Hohlraum, bzw. Gewölbe, bzw. Brustbereich anlässlich der Erstellung eines Untertagebaus in einem durch seine vorgegebenen felsmechanischen Eigenschaften bestimmten Gebirge sprechen.

Im gleichen Sinne ist auch zu verstehen, dass man in der SIA-Norm 198 nicht mehr von «Felsklassen», sondern von «Ausbruchsklassen» spricht, während man das Gebirge durch seine vom Bauwerk unabhängigen felsmechanischen Eigenschaften zu beschreiben versucht.

<sup>1)</sup> Nach einem Vortrag, gehalten an der FGU-Studentagung über «Aktueller Tunnelbau in nicht standfestem Gebirge» in Zürich (5. Dezember 1975). Die übrigen Vorträge werden von der Fachgruppe für Untertagebau des SIA demnächst veröffentlicht.

Beim Problem der Standfestigkeit im Tunnelbau kann es sich um einen echten Gebirgsdruck oder aber um Erscheinungen der Auflockerung bzw. der Ablösung von einzelnen Fels teilen vom Gewölbe oder von der Brust handeln. Als *echten Gebirgsdruck* sollte man eine Stabilitätsform bezeichnen, bei welcher Brucherscheinungen vorkommen, die mindestens einen beträchtlichen Teil des Hohlraumumfanges betreffen und die nicht nur auf die lokale Schwereeinwirkung zurückzuführen sind. Ferner sollen die Verformungen so gross sein, dass man sie nicht ungehindert zulassen kann. Ich möchte im folgenden nur von solchen echten Gebirgsdruckerscheinungen im Gotthard-Strassentunnel sprechen.

In der Tat sind bis zum jetzigen Zeitpunkt – und dies dürfte sich bis zur Fertigstellung des Tunnels kaum ändern – nur zwei Gebirgsdruckzonen vorgekommen; eine erste von etwa 300 m Länge im Los Süd in den Paragneisen und eine zweite im Los Nord, die man schlechthin als «Mesozoikumstrecke» bezeichnet hat. Wenn man die Druckzonen zusammenfasst, die man im strengen Sinne als solche bezeichnen darf, so kommt man auf eine Gesamtlänge von etwa 200 m, die nicht ganz 1,3 Prozent der Tunnellänge ausmacht. Es handelt sich somit um einen sehr kleinen Prozentsatz, der sich natürlich in den Baukosten und in den Bauzeiten verhältnis-

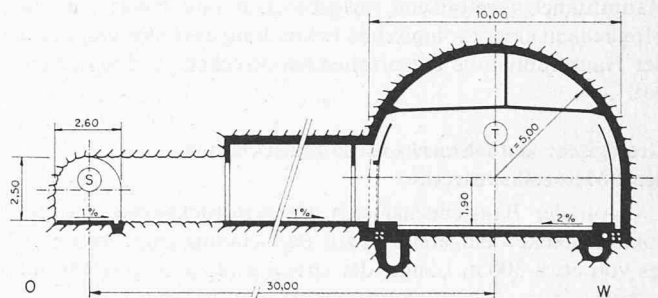


Bild 2. Querprofil Tunnel (T) und Sicherheitsstollen (S)

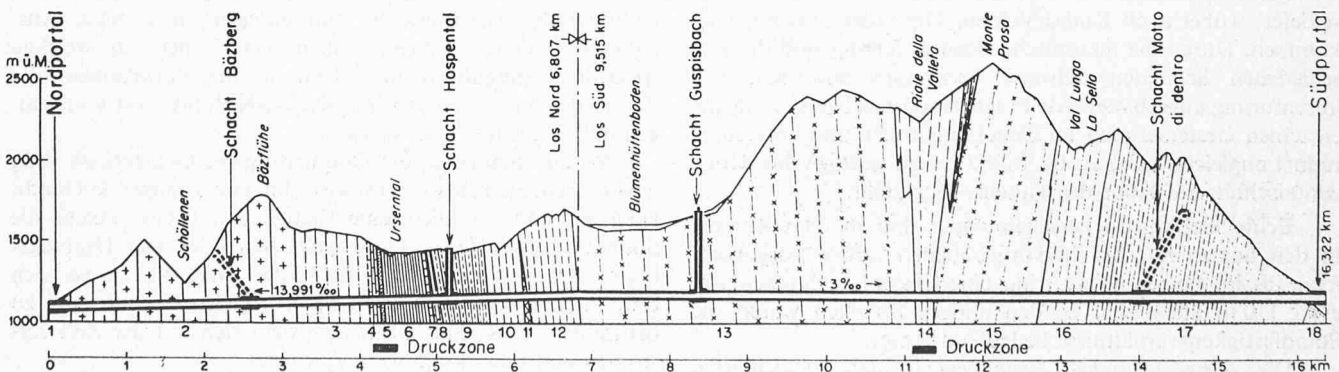


Bild 1. Geologisches Längenprofil

Aaremassiv	Gotthardmassiv mit Sedimenthülle	7 Marmore	12 Paragneise
1 Aufschüttung	4 Jura	8 Permokarbon	13 Gamsboden – Granitgneis
2 Aaregranit	5 Trias	9 Sericitschiefer	14 Paragneise
3 Gneise südlich des Aaregranites	6 Permokarbon	10 Paragneise	15 Fibbi granite bis Granitgneis
		11 Serpentin	16 Soresciagneise
			17 Tremolaschiefer
			18 Trias

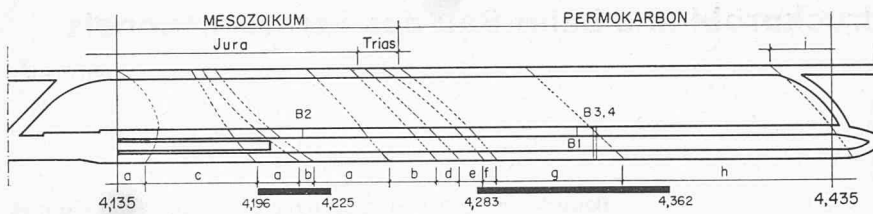


Bild 3. Geologischer Horizontalschnitt im Bereich des «Mesozoikums»: a) Kalken, b) Tonschiefer mit Kalken, c) Kalk- und Tonschiefer mit Quarzlinzen, d) Dolomit mit Tonschiefern und Kalken, e) Dolomit mit Gips und Tonschiefern, f) Massiger Gips, g) Mylonitisierte Serizitschiefer mit Quarzlinzen, h) Serizitschiefer bis Phyllite mit Quarzlinzen, i) Chlorit-Serizitschiefer. B 1: Messbogen 1 im Paramentstollen, B 2: Messbogen 2 im Paramentstollen, B 3, B 4: Messbogen in der Kalotte. Dicke, schwarze Balken: Druckzonen

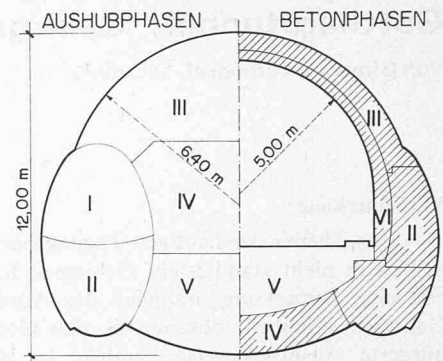


Bild 4. Tunnelprofil im Bereich des «Mesozoikums»

mässig stärker auswirkt. Im geologischen Längenprofil (Bild 1) sind diese zwei Strecken zu sehen.

Da man im Bereich der *Mesozoikumstrecke* über mehr Messwerte verfügt als anderswo im Gotthard-Strassentunnel, will ich allein über den im Los Nord gelegenen Abschnitt berichten. Die Überlagerungshöhe beträgt an dieser Stelle etwa 300 m.

Aus Bild 2 ist die Disposition des normalen Tunnelquerschnitts ersichtlich. Auf der westlichen Seite ist die erste Tunnelröhre mit einem theoretischen Ausbruchquerschnitt von 68 m<sup>2</sup> vorgesehen. 30 m östlich davon wird der sogenannte *Sicherheitsstollen* ausgehoben, der sich, mindestens nach dem jetzigen Stand der Projektierung, in der Axe einer künftigen zweiten Tunnelröhre befindet. Der Sicherheitsstollen wird dem Haupttunnel vorauseilend ausgebrochen und bietet u.a. die Möglichkeit einer geologischen Erkundung des Gebirges, bevor der Haupttunnel die entsprechenden Strecken zu durchörteren hat.

#### Geologische und felsmechanische Eigenschaften der «Mesozoikumstrecke»

Auf der Baustelle hat sich die Ausdrucksweise «Mesozoikumstrecke» eingebürgert zur Bezeichnung eines Abschnittes von etwa 300 m Länge, der streng geologisch gesehen nur teilweise zum Mesozoikum gehört, im übrigen aber dem Permokarbon (Erdmittelalter) zuzuweisen ist.

Man trifft in dieser Strecke eine komplizierte Folge von nahezu vertikal stehenden, einen Winkel von rund 45 Grad mit der Tunnelaxe bildenden Gesteinsschichten, die zu verschiedenen geologischen Formationen gehören.

Meistens handelt es sich um dünne Ton- und Serizitschiefer, wobei auch Kalkschichten, Gips und Dolomit vorkommen. Durch die tektonische Beanspruchung sind die verschiedenen Schichten teilweise verschuppt und zum Teil linsenförmig ausgebildet. Als Folge davon ergeben sich für die einzelnen Gesteinszonen im Sicherheitsstollen und im Haupttunnel ungleiche Längen. Im Bild 3 ist ein geologischer Horizontalschnitt auf Höhe des Tunnels dargestellt.

Echte Gebirgsdruckerscheinungen sind im Haupttunnel in den beiden schwarz hervorgehobenen Zonen vorgekommen, die im ganzen gesehen nur eine Gesamtmächtigkeit von etwa 110 m aufweisen. In den andern Strecken waren die Standfestigkeitsverhältnisse bedeutend besser.

Die *felsmechanischen Kennwerte* in den schlechtesten Zonen sind etwa die folgenden: Als wichtigster Kennwert ist der Reibungswinkel zu bezeichnen, der Schwankungen zwischen 28 und 32 Grad aufweist. Die Kohäsion ist als bescheiden zu werten und beträgt nur wenige Tonnen pro m<sup>2</sup>. Die Definition eines Elastizitätsmoduls ist in solchem Material eher schwierig. Man kann indessen von einem Verfor-

mungsmodul in der Grössenordnung von etwa 100000 kg/cm<sup>2</sup> im ungestörten Gebirge und von etwa der Hälfte in der Bruchzone um den Hohlraum sprechen.

Wegen des Vorkommens von verschiedenen Tonmaterialien wurde auch die Frage geprüft, ob nicht *Quellerscheinungen* zu erwarten sind. Entsprechende Untersuchungen haben indessen gezeigt, dass quellende Mineralien nur in sehr beschränktem Prozentsatz vorhanden sind und dass Quelldruck sowie Quellmass jedenfalls sehr bescheiden sind. Eigentliche Quelldruckerscheinungen sind somit nicht zu befürchten.

Interessant ist auch ein Hinweis auf den *Feuchtigkeitsgehalt* der Tonschichten. Es ergaben sich Werte von 5 bis 15 Prozent. Für diese Schichten besteht daher die Möglichkeit, noch eine gewisse Wassermenge aufzusaugen, bevor sie zu fließen beginnen. Selbstverständlich ist die Wasserdurchlässigkeit der Tonschiefer äusserst klein und eine eigentliche Wasserwegigkeit hat man nur in den steiferen, kalkhaltigen Gesteinen zu verzeichnen. Von vornherein klar ist indessen, dass bei solchen Materialien die mit dem Wasser im Zusammenhang stehenden Fragen eine grosse Rolle spielen können.

Man darf wohl behaupten, dass die im «Mesozoikum» angetroffenen Probleme in erster Linie mit dem Wasservorkommen, der Durchnässung des Gebirges und der Drainage desselben zusammenhängen.

#### Bemessung des Tunnelgewölbes

Aus diesen Erkenntnissen heraus und aufgrund von felsmechanischen Berechnungen und Überlegungen ergab sich für die Mesozoikumstrecke das im Bild 4 gezeigte Tunnelprofil.

Grundsätzlich ist beim Gotthard-Strassentunnel dem Prinzip der *Drainierung* des Gebirges gegenüber einer *Abdichtung* des Gewölbes der Vorzug gegeben worden. Ausnahmen bilden selbstverständlich jene Zonen, in welchen spezielle Bedingungen herrschen, so die Portalzonen, die Zonen der unterirdischen Ventilationszentralen sowie diejenigen mit grossem Wasserandrang.

Voraussetzung für die Drainierung des Gebirges ist aber, dass es sich auch entwässern lässt, d.h. eine genügende Durchlässigkeit und vor allem eine Festigkeit aufweist, welche die Stabilität von offenen Drainageflächen oder von Drainagebohrungen gewährleistet. Eine solche Garantie ist bei den erwähnten tonigen Schichten nicht gegeben und es wäre zu befürchten, dass jedes Drainagesystem sich mit der Zeit verstopfen und unwirksam werden würde.

Deshalb wurde in der Mesozoikumstrecke, wo Wasser vorkam, eine *Abdichtung* angebracht. Jedenfalls war es nötig, die Betonauskleidung vorwiegend für die Aufnahme des Wasserdruckes und erst sekundär gegen den Gebirgsdruck zu bemessen. Ich möchte diesen Punkt besonders hervorheben, damit sich bei der Betrachtung des Normalprofils nicht der Eindruck

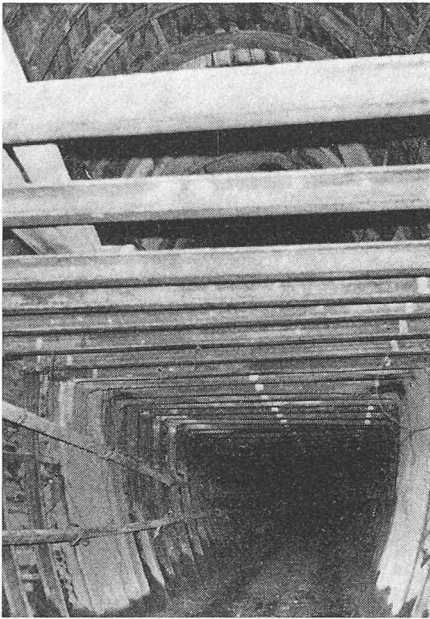


Bild 5. Zweiteiliger Paramentstollen des Haupttunnels



Bild 6. Ansatzstelle des Kalottenvortriebes mit Messerschild im Haupttunnel im Norden des «Mesozoikums». In der Achse ist die Kalotte des Sondierstollens ersichtlich

einstellt, hier seien enorme Gebirgsdrücke zu erwarten gewesen. In der Tat rechnete man bei der Bemessung mit einem Wasserdruck in der Grössenordnung von 200 m Wassersäule, was etwa  $\frac{2}{3}$  der Überlagerungshöhe entspricht, und mit einem Gebirgsdruck von nur  $70 \text{ t/m}^2$  im Endzustand.

Der Gebirgsdruck bildet daher nur etwa den vierten Teil des gesamten Bemessungsdruckes. In Wirklichkeit wird es noch weniger sein. Die Rechtfertigung für einen so hohen Wasserdruck erhielt man aus einigen Messungen in Bohrungen, in denen Drücke bis  $30 \text{ atü}$  in etwa 5–10 m Tiefe ab der Stollenwand festgestellt wurden.

Hervorzuheben ist, dass wegen der recht bescheidenen zufließenden Wassermengen der Wasserdruck sich nur längere Zeit nach dem Herstellen der Tunnelröhre einstellen wird und dass er jedenfalls bei der Bauausführung nicht zu berücksichtigen ist, da ihm bis zur Betonierung keine dichte oder abgedichtete Fläche entgegengesetzt wird. In der Tat entsteht während des Bauvorgangs um die Tunnelröhre eine ausgedehnte Bruchzone, welche naturgemäss durchlässiger ist als das Grundgebirge. Somit findet der Abbau des Wasserdruckes in grösserer Distanz vom Hohlraum statt und wirkt sich auf den provisorischen Einbau kaum aus.

Es ist jedoch anzunehmen, dass nach längeren Perioden, wegen der Druckumlagerung, die um den Tunnel stattfindet, das Gebirge mindestens zum Teil sich wieder verdichten und abdichten wird. Somit muss angenommen werden, dass die Zone des Druckabbaues in der hydraulischen Strömung sich dem Tunnel nähern wird; damit wirkt sie sich direkt oder indirekt über das Gebirge auf die Auskleidung aus. Sollte durch eine perfekte Isolation die Wasserströmung gänzlich unterbrochen werden können, so würde sich mit der Zeit der natürliche hydrostatische Wasserdruck wieder aufbauen.

Wie aus Bild 4 ersichtlich, beeinflusste auch der gewählte Bauvorgang die Querschnittsform. Insbesondere sind die zwei Paramentstollen deutlich erkennbar.

### Bauvorgang

Aus dem Vorangegangenen und Bild 4 geht bereits hervor, dass für die Mesozoikumstrecke im Haupttunnel die deutsche Bauweise mit Stahleinbau gewählt wurde. Von den zwei Paramentstollen wurden zuerst die oberen Kalottenabschnitte aus-

gehoben. Anschliessend folgten die Strossen derselben (Bild 5). Als dritte Bauetappe wurde die Tunnelkalotte, im nördlichen Abschnitt des «Mesozoikums» im Schutze eines Messervortriebes, im südlichen Drittel mit normalem Stahleinbau, ausgehoben (Bild 6).

In Wirklichkeit gestaltete sich der Bauvorgang etwas komplizierter, wie man aus der Darstellung des Bauablaufes (Bild 7) entnehmen kann. Im Monat Oktober 1971 traf von Norden her nach 4,135 km ab Portal Göschenen der Vortrieb des Sicherheitsstollens auf das Mesozoikum auf. Nun ging es auf der Baustelle etwas empirisch zu, was ich weder als Lob

Bild 7. Ablauf der Bauarbeiten im Bereich des «Mesozoikums»

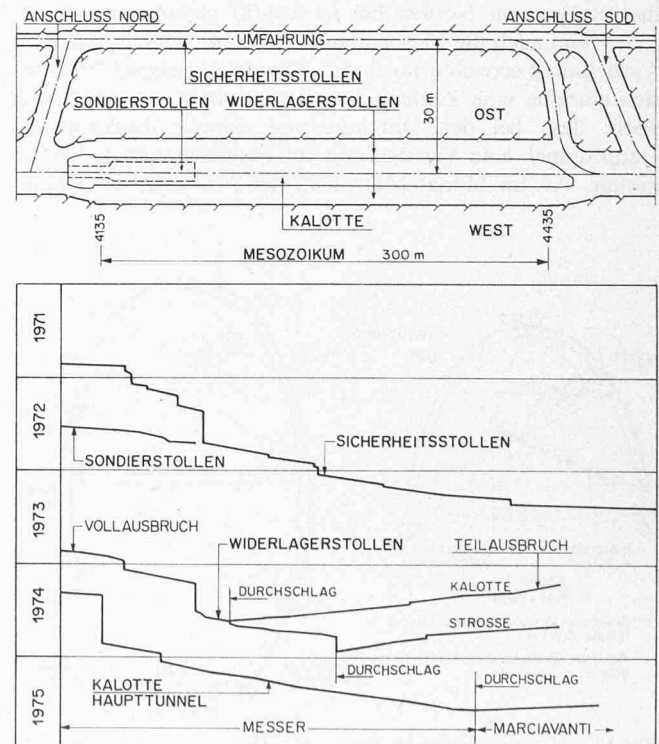




Bild 8. Drückerscheinungen im Sondierstollen im Nordabschnitt des «Mesozoikums»

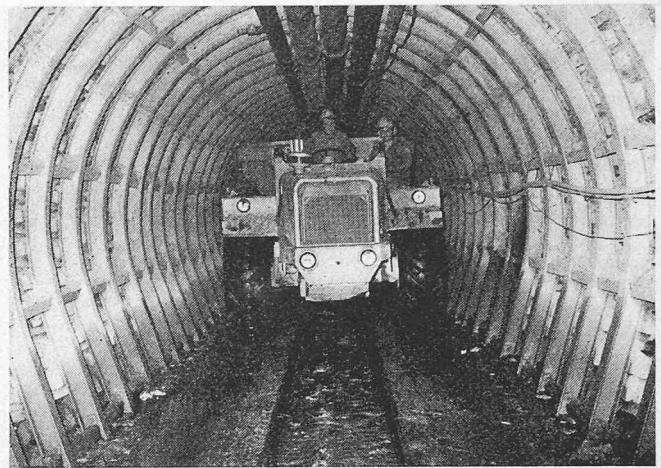


Bild 9. Umfahrung des «Mesozoikums» durch den erweiterten Sicherheitsstollen

noch als Tadel auffassen möchte. Tatsache ist, dass man häufig zuerst zusehen muss, bevor man einseht. Die *Experimentierphase* dauerte fast ein Jahr, bis der Vortrieb wieder einigermaßen normal weiterging. In der Zwischenzeit war der Bau des Sicherheitsstollens auch vom Schacht Hospental aus, d.h. von Süden her, aufgenommen worden. Dieser zweite Vortrieb erwies sich als äusserst nützlich, schränkte er doch bald die Ausdehnung der vermuteten «schlechten» Gebirgsstrecke, die früher in ihrer Länge reichlich überschätzt worden war, wesentlich ein. Eine Zeitlang war sogar von der Notwendigkeit die Rede, auf eine Länge von 1500 m einen Vollschild einzusetzen. In der Tat betrug, wie bereits erwähnt, die wirklich druckhafte Strecke, in guter Übereinstimmung mit der geologischen Prognose, kaum mehr als 100 m, und vom Einsatz eines Schildes ist zum guten Glück Abstand genommen worden.

Mitte 1972 wurde durch einen *Zwischenangriff* vom Sicherheitsstollen aus ein Sondierstollen in der Axe der Tunnelröhre vorgetrieben, der eine gewisse Drainagewirkung hatte (Bild 8). Gegen Ende 1973 konnte der Vortrieb der Paramentstollen von Norden her in Angriff genommen werden.

Wenn auch die Mesozoikumstrecke bei weitem weder die Ausdehnung erreichte noch den Schwierigkeitsgrad bot, den sich einzelne eine Zeitlang vorgestellt hatten, so zeigte sich doch, dass bei der Durchquerung dieses Abschnitts im Haupttunnel eine Verzögerung im Bauprogramm entstehen könnte. Als im Monat März 1974 der Ausbruch des Haupt-

tunnels von Norden her auf die fragliche Zone auftraf, wurde daher die «Mesozoikumstrecke» umfahren, um den Vortrieb des Haupttunnels im Süden derselben fortzusetzen. Dies bedingte eine örtliche Ausweitung des Sicherheitsstollens (Bild 9). Sie machte es möglich, die Mesozoikumstrecke von beiden Seiten her in Angriff zu nehmen.

Ohne auf weitere Einzelheiten einzugehen, seien die folgenden Daten erwähnt: Im Monat Juni 1974 fand der Durchschlag der Kalotte der Paramentstollen statt; dann traf der Kalottenausbruch des Tunnels mit einer Vortriebsleistung von 1,43 m/AT von Norden her im Monat Juni 1975 auf den entsprechenden Vortrieb von Süden, der eine mittlere Leistung von 2,60 m/AT zu verzeichnen hatte.

Die Betonierung des äusseren Betonrings wurde unmittelbar nach dem Ausbruch vorgenommen. Der Abbau des Kernes und die Erstellung des Sohlengewölbes folgten kurze Zeit nach dem Kalottenausbruch von Norden, so dass im Monat Juli 1975 die Mesozoikumstrecke als durchschlagen gelten konnte.

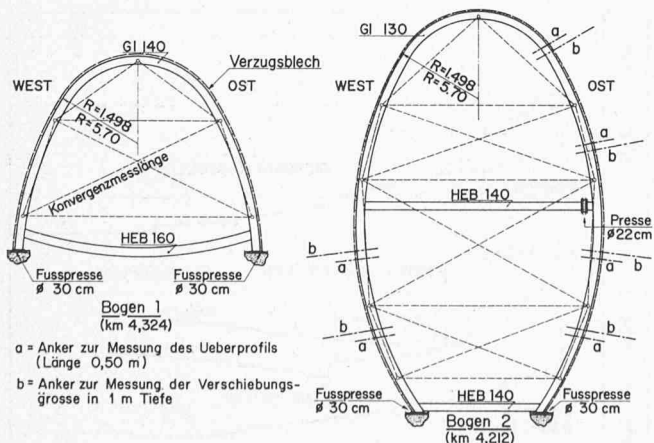


Bild 10. Messeinrichtung im Paramentstollen

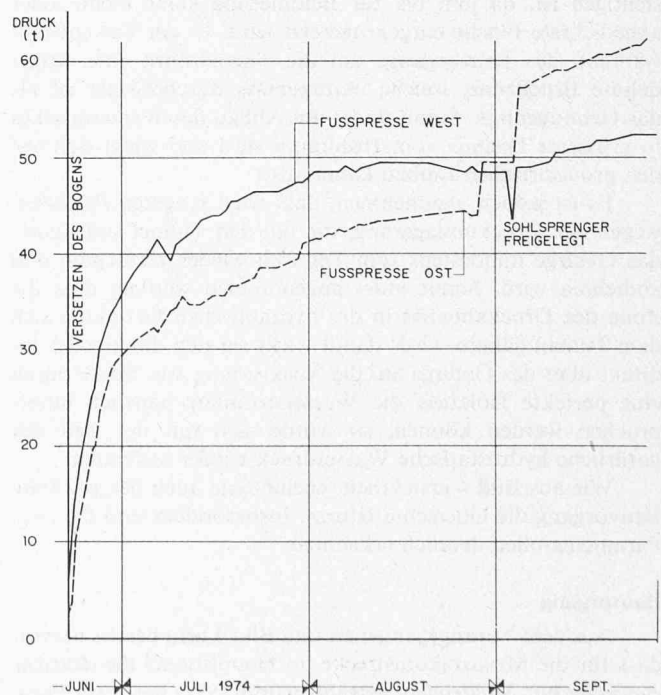


Bild 11. Druckmessungen im Bogen 1 (km 4,324)

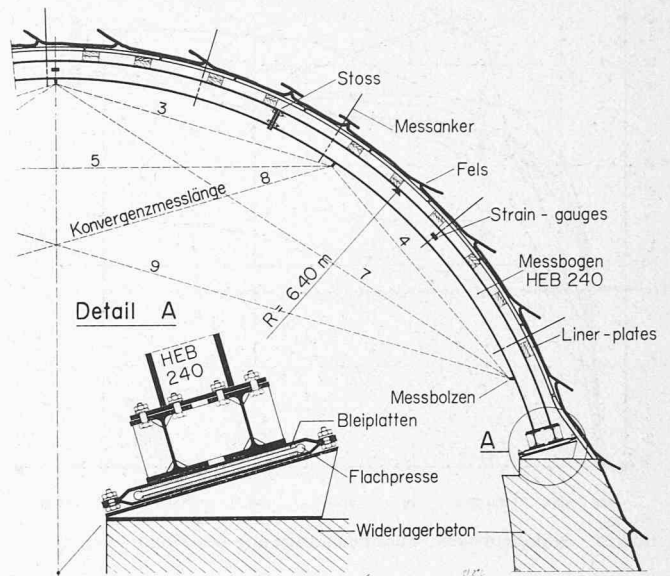
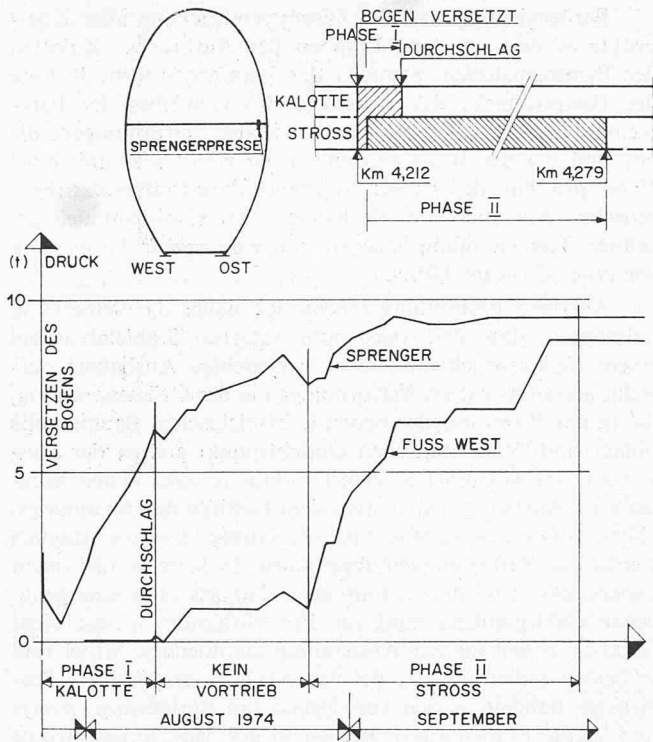


Bild 13 (oben). Messeinrichtung in der Kalotte

Bild 12 (links). Druckmessungen im Bogen 2 (km 4,212)

### Messungen

Die Frage nach dem sich in der Mesozoikumstrecke einstellenden Gebirgsdruck war selbstverständlich von grösstem Interesse. Aus diesem Grund wurden in diesem Abschnitt verschiedene Messungen durchgeführt.

Es handelt sich vorwiegend um die Messung der *Beanspruchung der Einbaubogen* mittels hydraulischen Pressen, die Messung der *Konvergenz* sowie um *Dehnungsmessungen in den Stahlbogen* selbst. Im linken Teil des Bildes 10 sind die Druckmeseinrichtungen in der Kalotte eines Paramentstollens dargestellt.

Unter den Füßen des Einbaubogens wurden *hydraulische Flachpressen* versetzt, so dass man mit Leichtigkeit den gesamten, vertikal wirkenden Gebirgsdruck sozusagen wägen

konnte. Im rechten Teil des Bildes ist eine entsprechende Messeinrichtung im gesamten Profil eines Sohlstollens zu sehen. Hier wurden nicht nur die Auflagerdrücke, sondern auch die Drücke in der Horizontalstrebe durch hydraulische Pressen gemessen. Ich weise noch auf die Messbolzen hin, die über den ganzen Umfang versetzt wurden und auf die ich später noch zurückkommen werde.

Aus Diagramm 11 ist die zeitliche Entwicklung der Pressenkräfte in der Kalotte des Stollens ersichtlich; nach 17 Wochen z.B. entsprachen die Gebirgsdrücke etwa 35 t/m<sup>2</sup> (Messbogen B1). In gleicher Art wurde für den gesamten Paramentstollen vorgegangen (Bild 12) (Messbogen B2). In einem entsprechenden Messquerschnitt in der Kalotte wurden in einer späteren Etappe zwei Einbaubogen auf die in den Paramentstollen betonierten Widerlager auf hydraulische Kissen versetzt (Bild 13) (Messbogen B3 und B4). Auch hier wurden die Auflagerkräfte, d.h. die Normalkräfte der Einbaubogen, gemessen, die etwa 100 t/Bogen, entsprechend einer Auflast von etwa 15 t/m<sup>2</sup>, erreichten. Der sehr regelmässige zeitliche Verlauf des Druckaufbaus wird aus Bild 14 ersichtlich.

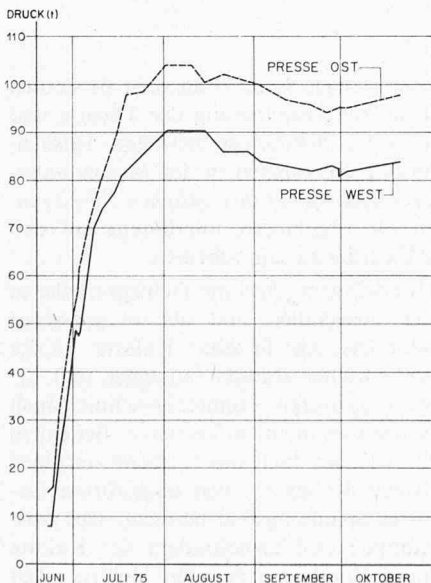


Bild 14. Kalottenbogen: Auflagerkräfte eines Bogens

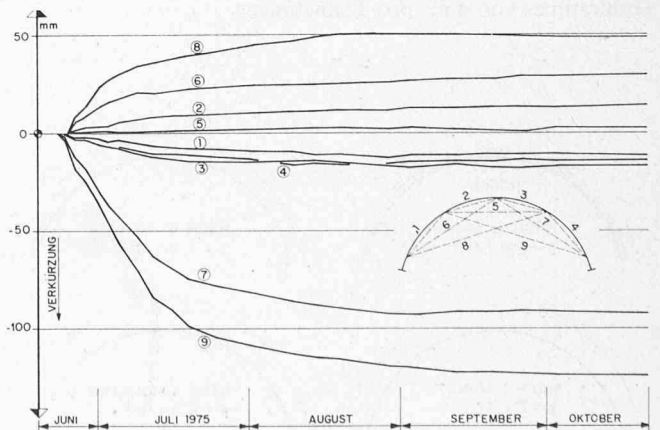


Bild 15. Kalottenbogen: Konvergenzmessungen

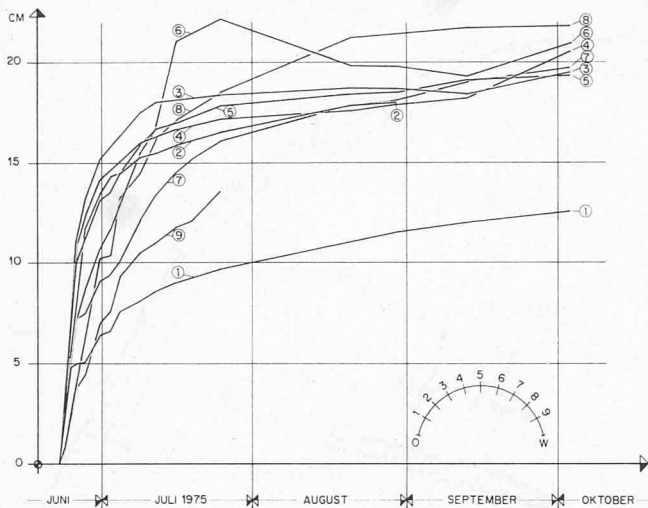


Bild 16. Kalottenbogen: Zusammendrückung des Hohlraumes

Man kann bereits an dieser Stelle festhalten, dass die Drücke in der Tunnelkalotte kleiner ausgefallen sind als in den Paramentstollen. Einen ähnlichen regelmässigen Verlauf wie die Drücke zeigen auch die Konvergenzmessungen im Querschnitt (Bild 15). Es ist zu bemerken, dass die Verformungen recht unsymmetrisch ausgefallen sind. Wie man später sehen wird, sind hingegen die Gebirgsdrücke fast symmetrisch. Diese Tatsache ist auf die sehr kleine Biegesteifigkeit der Bogen zurückzuführen.

Sehr wichtig zur Deutung der Druckerscheinungen war die Messung der Stärke des Überprofils um die Stahlbogen herum. Zu diesem Zwecke wurden am Umfang der Sohlstollen und der Tunnelkalotten kurze, bereits erwähnte Felsbolzen versetzt, welche die Messung der Zusammendrückung des um die Lanzen verbleibenden Hohlraumes gestatteten. Das Ergebnis ist dem Diagramm 16 zu entnehmen. Danach hat eine sehr regelmässige Zusammendrückung von etwa 20 cm stattgefunden. Sie setzt sich zusammen aus dem Überprofil, das bei den Lanzen spitzen ausgebrochen wird, aus der Grösse der Absätze auf der Lanzenaussenseite, aus der Dicke des Lanzenschwanzes, aus dem Schliessen des Hohlraumes ausserhalb der Linerplates durch Zerdrückung der Felsspitzen, aus der Durchbiegung des Verzuges und aus der Zusammendrückung der Holzkeile, worauf dieser aufliegt. Nicht erfasst werden die Verformungen, die an der Front vor dem Versetzen der Bolzen, d.h. vor und sofort nach der Brust, stattfinden. Die Zusammendrückung des Profilrandes um 20 cm in der Kalotte allein entspricht einem Mehrvolumen des Hohlraumes von  $4 \text{ m}^3$  pro Tunnelmeter.

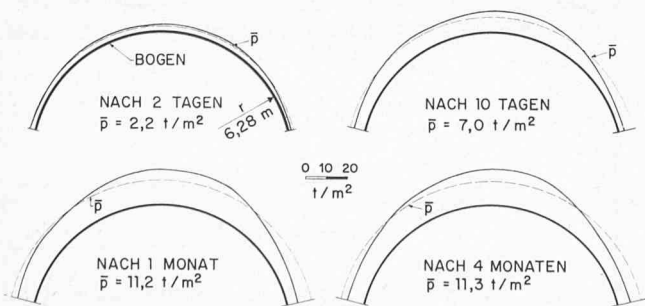


Bild 17. Kalottenbogen: den Messungen entsprechende Belastungen

Berücksichtigt man die Zusammendrückung aller Überprofile in den einzelnen Etappen des Ausbruchs: Kalotten der Paramentstollen, Strossen der Paramentstollen, Kalotte des Haupttunnels, das Absenken des Gewölbes der Paramentstollen beim Unterfangen sowie die Verformungen, die vor und bei der Brust stattfinden, so erhält man mit etwa  $17 \text{ m}^3$  pro Tm. den ganzen Mehraushub gegenüber der theoretischen Ausbruchlinie. Es handelt sich somit auf den gesamten Tunnelumfang bezogen, um eine *radiale Verformung von etwa 42 cm im Mittel*.

An diese Feststellung möchte ich daher die Bemerkung anknüpfen, dass der sogenannte «starre» Stahleinbau bei einem Teilausbruch eine recht nachgiebige Ausbautart darstellt, gestattet er doch Verformungen in der Grössenordnung, die in der Regel mit der neuen österreichischen Baumethode üblich sind. Vom statischen Gesichtspunkt aus ist der Bauvorgang im wesentlichen derselbe. Durch einen ersten nachgiebigen Ausbau gestattet man dem Gebirge den Spannungsabbau auf eine bestimmte zulässige Grösse. Erst nachträglich werden die Verformungen abgebremst. Es kann ja auch nicht anders sein, denn der Aushub eines Tunnels ohne eine genügende Gebirgsspannung um den Hohlraum ist gar nicht denkbar. Allein die zur Anwendung kommenden Mittel sind in beiden Fällen anders. Bei der *neuen österreichischen Baumethode* handelt es sich vorwiegend um Spritzbeton, Anker und leichte Einbaubogen. Bei der in der Mesozoikumstrecke verwendeten deutschen Bauweise sind es Stahlbogen mit Stahlverzug. Beiden kommt das Vorgehen in Teilausbrüchen zugute. Die Gründe, die zur Wahl der einen oder der anderen Methode führen, können technischer Art sein, wie etwa die effektive Möglichkeit einer Haftung der Ankerstäbe, oder aber organisatorischer bzw. wirtschaftlicher Art.

Aufgrund der gemachten Messungen kommt man nachträglich zum Schluss, dass im «Mesozoikum» etwas *zu schwer* eingebaut wurde. In diesem Sinne kann daher eine Ankerung vielleicht als «elastischer» bezeichnet werden, indem man sie eher anpassen und bei Bedarf auch verstärken kann als ein Stahleinbau, obschon auch dies gar nicht unmöglich ist.

Bild 17 zeigt Aufbau und Verteilung des Druckes auf einen der Messbogen im Laufe der Zeit. Die Last wurde durch einen gewogenen Ausgleich aus den Verformungen des Bogens und den Pressendrücken unter den Auflagern ermittelt. Trotz der unsymmetrischen Verformung ist die Verteilung des Gebirgsdruckes natürlich recht symmetrisch ausgefallen.

#### Flächenkennlinien

Messungen haben erst einen Sinn, wenn man sie deuten kann und wenn sie etwas zur Verfeinerung der Theorie und zum besseren Verständnis der Phänomene beitragen. Tatsächlich haben die ausgeführten Messungen in der Mesozoikumstrecke eine *glänzende Bestätigung der theoretischen Überlegungen* gebracht, obschon die Ergebnisse, mindestens auf den ersten Blick, etwas merkwürdig zu sein scheinen.

Es könnte nämlich erstaunen, dass die Gebirgsdrücke in den Sohlstollen grösser ausgefallen sind als im grösseren Querschnitt des Haupttunnels, d.h. in seiner Kalotte. In der Tat hat man bei sonst identischen Randbedingungen und Arbeitsmethoden bei einem grösseren Tunnelquerschnitt auch grössere Drücke zu erwarten als in einem kleineren. Bei einem Teilausbruch hingegen, wie der hier beschriebene, erfolgen die Ausbrüche der kleinen Stollen im fast ungestörten Gebirge, wo noch ein grosses Spannungsfeld herrscht. Der Ausbruch der späteren Etappen und insbesondere der Kalotte findet hingegen in einem bereits entspannten Gebirge statt und kann somit viel leichter vor sich gehen. Erfolgt der Ausbruch eines Tunnels in Teilabschnitten, muss der erste Teil-

querschnitt, d.h. die Kalotte des ersten Paramentstollens, eigentlich im Vollausschub ausgehoben werden darf. Andererseits – und das braucht ja kaum wiederholt zu werden – darf die sehr erwünschte Entspannung des Gebirges ein bestimmtes Mass nicht überschreiten, da sich sonst Auflockerungserscheinungen einstellen können.

Die erwähnten Verhältnisse sind kurz in der *Kennlinie* des ganzen Tunnelprofils dargestellt (Bild 18), wobei zwischen den drei Bauphasen unterschieden wird. Je mehr die Arbeiten fortschreiten, um so grössere Verformungen finden statt und um so kleinere Drücke wirken sich auf den gewählten kreisförmigen Ersatzquerschnitt aus. Die im Bild dargestellten Ergebnisse wurden nach der Bauausführung errechnet. Doch sind die Verhältnisse etwas komplexer. Man muss nämlich verschiedene Kennlinien für die einzelnen Bauetappen berücksichtigen. Sie sind aus Bild 19 ersichtlich, worin die Berechnungsergebnisse dargestellt sind, die aufgrund von leicht verschiedenen felsmechanischen Kennwerten vor der Bauausführung ausgeführt wurden.

Es handelt sich hier um Querschnitt- oder Flächenkennlinien. In der Ordinate sind nicht radiale oder Umfangsverformungen, sondern Querschnittreduktionen dargestellt. Als Abszisse ist entweder ein charakteristischer Stabilisierungsdruck oder die Normalkraft in einem Querschnitt des Einbaubogens aufgetragen. Im ersten Teil des Bildes sind die Kennlinien für die Brust des oberen Teiles des Sohlstollens Nr. (0) ersichtlich. Von diesen springt man auf die Kennlinie (2) des Kalottenprofils und beim Unterfangen desselben auf die Kennlinie des ganzen Sohlstollens (3) über.

Auf der theoretischen künftigen Ausbruchlinie des Gesamttunnels wirken sich die lokalen Verformungen um die beiden Sohlstollen in dem Sinne aus, dass sie Verschiebungen in der Gebirgsmasse bedingen, die in Felsvolumen umgerechnet werden können, die ins Profil eindringen. Der entsprechende funktionelle Zusammenhang ist in Bild 19 angegeben (oben, Mitte im Bild).

Beim Ausbruch der Kalotte vollzieht sich schliesslich ein Übergang von der Kennlinie der Sohlstollen zu der Kennlinie des gesamten Tunnelprofils (4). Wie aus Bild 19 ersichtlich, ergibt sich bei jeder Ausbruchetappe eine Reduktion des Gebirgsdruckes.

Es ist nicht möglich, an dieser Stelle auf Einzelheiten einzugehen. Es genügt zu sagen, dass die Berechnung, die vor dem Bau ausgeführt wurde, eine Belastung der Paramentstollen von  $32 \text{ t/m}^2$  und eine solche der Tunnelauskleidung von  $20 \text{ t/m}^2$  ergeben hatte. Gemessen wurden tatsächlich  $35 \text{ t/m}^2$  bzw.  $15 \text{ t/m}^2$ .

### Schlussfolgerungen

1. Bei echten Gebirgsdruckproblemen darf man sich in der Bemessung der Auskleidungen und Einbauten sowie in der Wahl des Bauvorganges *nicht Mehr durch Gefühle* leiten lassen. Es stehen heutzutage *rechnerische Methoden* zur Verfügung, die mindestens ein gutes Abschätzen der zu erwartenden Gebirgsdrücke gestatten.

2. Diese Drücke – ich wiederhole es nochmals – sind nicht von der Natur gegebene Grössen, sondern sie stellen das Ergebnis des Zusammenwirkens von natürlichem Spannungszustand, von Gebirgseigenschaften, dem Bauvorhaben, der Baumethode und der Steifigkeit der Einbauten dar. Dass der Bauvorgang eine ausschlaggebende Rolle spielt, indem er das Mass der Gebirgsentspannung und schliesslich die Grösse des Gebirgsdruckes bestimmt, wird glänzend sowohl durch die Ergebnisse der neuen österreichischen Bauweise als auch durch die Messungen, die im «Mesozoikum» des Gotthard-Strasentunnels ausgeführt worden sind, bestätigt.

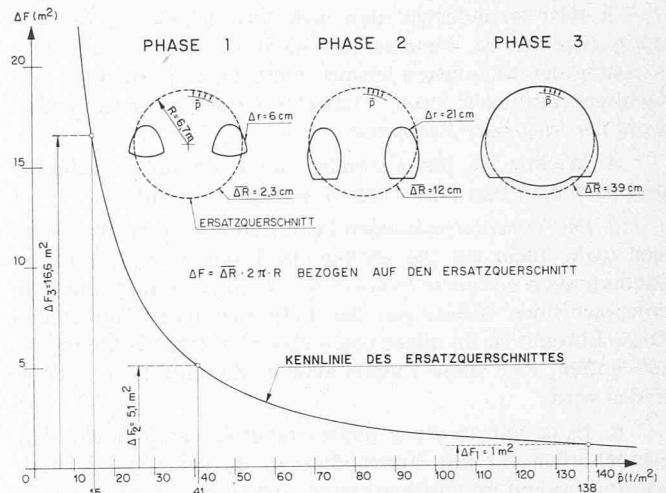


Bild 18. Zusammenhang zwischen Ausbruchphasen und Verformung. Berechnungsannahmen:

Reibungswinkel:  $\varphi_{pl} = 28^\circ$   $\varphi_{el} = 30^\circ$   
 Kohäsion:  $c_{pl} = 0$   $c_{el} = 2 \text{ t/m}^2$   
 Verformungsmodul:  $M_{pl} = 500\,000 \text{ t/m}^2$   $M_{el} = 1\,000\,000 \text{ t/m}^2$   
 Volumenzunahme im plastischen Bereich  $0,1\%$   
 Spezifisches Gewicht des Felsens  $\gamma = 2,6 \text{ t/m}^3$   
 Überlagerungshöhe  $H = 300 \text{ m}$

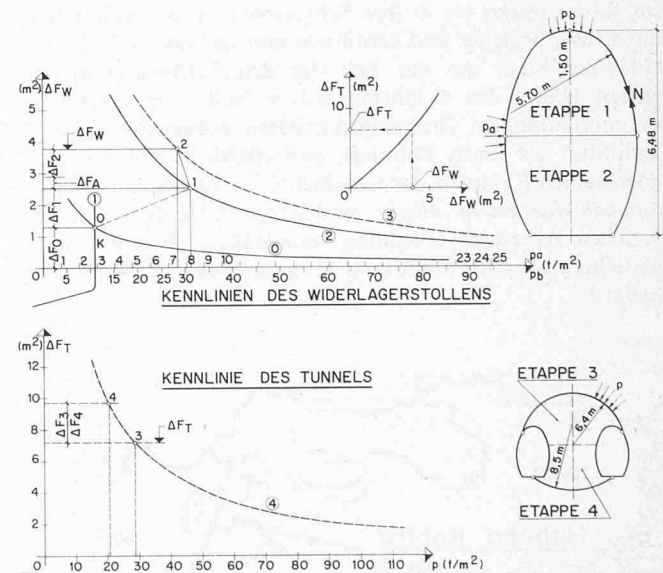


Bild 19. Nachgiebigkeit der Einbauten in den verschiedenen Bauetappen und Stabilisierungsdrücke. Berechnungsannahmen:

Reibungswinkel:  $\varphi_{pl} = \varphi_{el} = 29^\circ$   
 Kohäsion:  $c_{pl} = c_{el} = 2 \text{ t/m}^2$   
 Verformungsmodul:  $M_{pl} = M_{el} = 500\,000 \text{ t/m}^2$   
 Volumenzunahme im plastischen Bereich  $0,1\%$   
 Spezifisches Gewicht des Felsens  $\gamma = 2,7 \text{ t/m}^3$   
 Überlagerungshöhe  $H = 300 \text{ m}$

$\Delta F_A$  Flächengewinn infolge Absenkung der Kalotte während des Vortriebes des Strosses  
 $\Delta F_O$  Flächengewinn vor der Brust  
 $\Delta F_{1, 2, 3, 4}$  Flächengewinn infolge Überprofil von 10 cm in den Etappen 1, 2, 3 und 4



3. Klar ist indessen, dass jede felsmechanische Berechnung zwecklos ist, wenn sie sich nicht auf die experimentelle Messung der wichtigsten felsmechanischen Eigenschaften des Gebirges abstützen kann. Darunter ist der *Reibungswinkel* wohl der *wichtigste Parameter*.

4. Wichtig ist, das Verhalten des Hohlraumes während und nach dem Bau durch Messungen zu kontrollieren.

5. Die Voruntersuchungen beim Bau eines Tunnels sollten sich nicht allein auf die geologische Prognose beschränken, sondern auch *geeignete felsmechanische Studien* aufgrund von entsprechenden Messungen der Felseigenschaften umfassen. Diese Einsicht ist im allgemeinen eher neu. Ich möchte indessen hoffen, dass diese Empfehlung in Zukunft mehr Gehör finden wird.

6. Es ist mir an dieser Stelle eine angenehme Pflicht, den Baubehörden für das Verständnis zu danken, das sie dem Messprogramm im Gotthardtunnel entgegengebracht haben.

#### Literaturverzeichnis

- G. Lombardi: Der Einfluss der Felseigenschaften auf die Stabilität von Hohlräumen. «Schweizerische Bauzeitung» 87 (1969), Heft 3.  
 G. Lombardi: Zur Bemessung der Tunnelauskleidung mit Berücksichtigung des Bauvorganges. «Schweizerische Bauzeitung» 89 (1971), Heft 32.  
 G. Lombardi: Quelques remarques au sujet de la pression sur les revêtements. Congrès SSMSR de Lucerne, 1972.  
 G. Lombardi: Die Probleme des Tunnelleinbaues. ISRM 3e. Kongress. Denver, 1974.  
 W. Diethelm: Geologie und Felsmechanik im Untertagebau, SGBFT-Herbsttagung 1974 Biel (Mitteilung Nr. 90).  
 M. Bourquin: Saint-Gothard 1974, Travaux du lot Nord, chantiers. No 10, 1974.  
 M. Bourquin: Le franchissement de la zone du mésozoïque par le tunnel routier du Saint-Gothard. Tunnels et ouvrages souterrains. Revue AFTES No 11, 1975.

Adresse des Verfassers: Dr. G. Lombardi, Ingenieurbüro, 6601 Locarno.

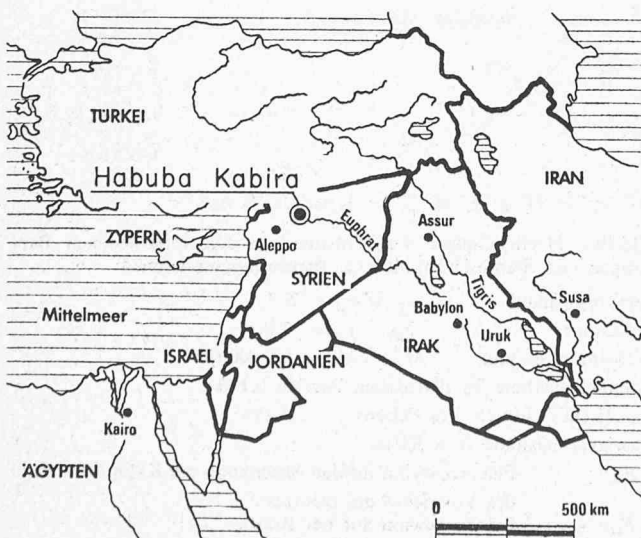
## Habuba Kabira, die älteste befestigte Wohnstadt

### Abschluss der Ausgrabungen im syrischen Euphrattal

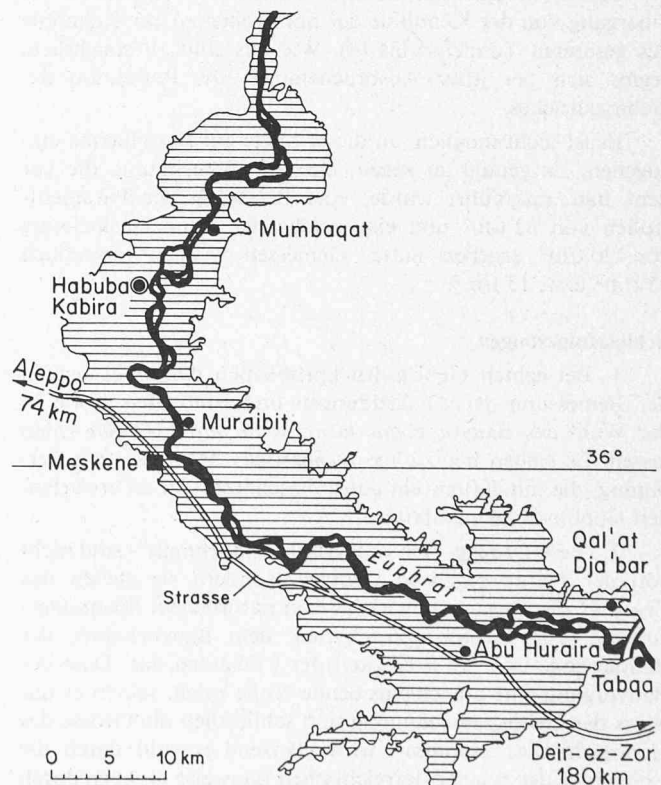
DK 935

Der Bau eines Staudamms bei *Tabqa* (heute: *ath Thaura*) hatte in den letzten Jahren zahlreiche Expeditionen verschiedener Staaten in das bis dahin fast unerforschte *syrische Euphrattal* geführt. Mit zunehmender Füllung des Stausees müssen die Ausgrabungen seit 1974 dem jeweiligen Wasserstand entsprechend eingestellt werden. Vor kurzem wurden die Grabungsarbeiten der *Deutschen Orient-Gesellschaft* südlich des heutigen Orts *Habuba Kabira* (Syrien), die von der *Stiftung Volkswagenwerk Hannover* mit rund 1,5 Mio Mark gefördert wurden, beendet. Die deutschen Grabungen in diesem Raum waren bis in ihre Schlussphase von überraschendem Erfolg begleitet und vermitteln nun das fast vollständige Bild einer Stadt aus der Zeit der Schrifterfindung in der zweiten Hälfte des 4. Jahrtausends v. Null. Die Ergebnisse der internationalen Grabungsaktivitäten weisen das syrische Euphrattal als einen kulturell, wirtschaftlich und politisch bedeutsamen Raum in der Geschichte Vorderasiens aus. (Im *National-Museum in Aleppo* wird gegenwärtig eine von der Syrischen Altertumsverwaltung veranstaltete Gemeinschaftsausstellung aller im Euphrattal tätig gewesener Expeditionen gezeigt.)

Die am Westufer des Euphrat gelegene Stadt aus der Zeit der Sumerer verfügte über ein ausgefeiltes Befestigungssystem, das jetzt – soweit seine Reste die Jahrtausende überdauert haben – auf ganzer Länge erforscht ist. Die Stadtbefestigung ist mit ihrer turmbewehrten Hauptmauer und der Vormauer die älteste ihrer Art und offensichtlich Vorbild jüngerer Anlagen, wie z.B. der im *Epos Gilgamesch* erwähnten Mauer des Königs von Uruk gegen Anfang des 3. Jahrtausends v. Null. War zunächst nur eine Stadttor freigelegt worden, so wurde schliesslich noch ein zweites gefunden. Beide Tore sind gemeinsam mit der Stadtmauer einheitlich geplant worden. Die Mauer selbst verläuft in einer makellosen Geraden über mehr



Situation der Grabungsstelle



Der Grabungsplatz Habuba Kabira und die maximale Grösse des Stausees