

1 Einleitung

Der Tunnelbau gehört zu den faszinierendsten, interessantesten, aber auch schwierigsten Aufgaben des Bauingenieurs. Im Tunnelbau bestehen zwischen Gebirge, Konstruktion und Bauvorgang direkte Beziehungen.

Das Gebirge wirkt als tragendes Element und als Belastung; gleichzeitig dient es als Baustoff. Durch zahlreiche Einflüsse und Wechselwirkungen zwischen Gebirge und Hohlraumbauwerk unterscheidet sich der Tunnelbau massgeblich von anderen Baukonstruktionen.

Im Tunnelbau sind die Kenntnisse über Belastung und Materialparameter weiten statistischen Streuungen unterworfen. Meist gibt es nur wenig Aufschlüsse entlang der zukünftigen Tunnelachse. Mit Hilfe dieser Aufschlüsse sowie geologischen und heute zum Teil geophysikalischen Voruntersuchungen wird dann die Klassifizierung des Gebirges vorgenommen.

Da die meisten Gebirgsformationen, bedingt durch ihre tektonische Entstehungsgeschichte, heterogen geschichtet und gefaltet sind, sollte man bei Vor-

berechnungen die Streuung der geologischen und gebirgsmechanischen Parameter berücksichtigen. Damit kann die Bandbreite der Bauverfahren, Sicherungs- und Ausbaumassnahmen anschaulich für den Bauleiter und den Geologen unter klarer Definition der hydrologischen wie auch der petrographischen Annahmen vor Ort festgelegt werden. Besonders klar sollte dargelegt werden, wie sich die ändernden geologischen Verhältnisse auf die Berechnungsergebnisse und somit auf die zu treffenden Massnahmen auswirken.

Die Bauverfahren und Sicherungsmassnahmen müssen den weiten Variationsbreiten der geologischen und petrographischen Parameter des Projektes Rechnung tragen. Die Adaptionfähigkeit der jeweiligen Bauverfahren wie auch der Sicherungsmassnahmen ist für den wirtschaftlichen Erfolg der Projektentwicklung entscheidend.

Das Risikopotential bezüglich der Arbeitssicherheit und der bauverfahrenstechnischen Konsequenzen aus den geologischen und petrographischen Parametern, die man aufgrund der wechselnden Gebirgsverhältnisse antrifft, ist sehr hoch. Damit sind erhebliche Projektrisiken in bezug auf Termin- und Kostentreue verbunden. Für jeden Tunnelbauer ist die richtige Wahl des Bauverfahrens auf der Grundlage der Streubreite der geologischen und petrographischen Parameter sowie des Querschnittes Voraussetzung für den technischen und wirtschaftlichen Erfolg.

Durch diese Merkmale unterscheidet sich der Tunnelbau von den anderen anspruchsvollen Bauingenieurdisziplinen wie Brücken-, Tief-, Industrie- und allgemeinem Hochbau. Die materialtechnischen Parameter wie auch die probabilistischen Werte für die Belastungen unterliegen hier nur engen statistischen Streuungen. Das liegt daran, dass die künstlich hergestellten Baumaterialien strengen Qualitätssicherungsmassnahmen unterliegen und die Belastungen, z. B. im Brückenbau, aufgrund der Maximalgewichte pro Fahrzeug und der

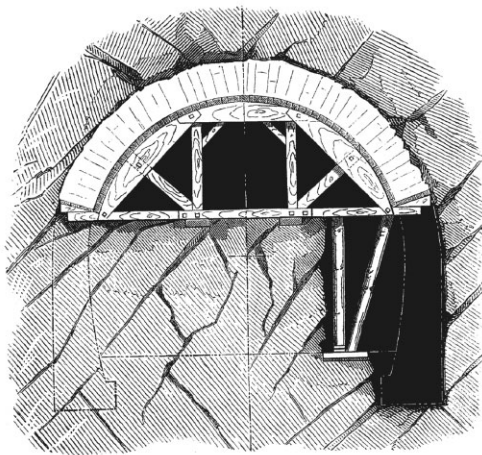


Bild 1-1 Belgische Bauweise nach Rziha [1-1]

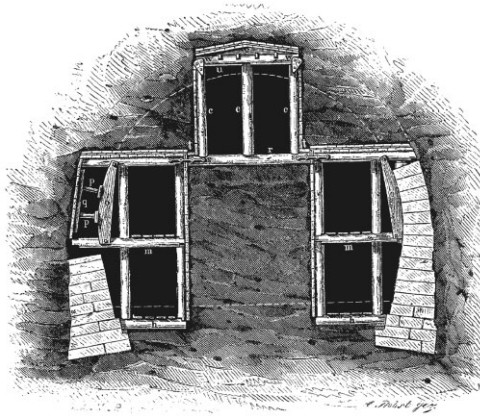


Bild 1-2 Deutsche Bauweise nach Rziha [1-1]

statistischen Verteilung sehr genau bekannt sind. Das sieht beim Gebirge, das durch natürliche geologische und tektonische Vorgänge entstanden ist, ganz anders aus. Noch immer gilt der Ausspruch der Tunnelbauer: „Vor der Ortsbrust ist es schwarz“.

Prof. Maidl formuliert kurz und treffend [1-2] die Bedeutung des Tunnelbaus wie folgt: „Der Tunnelbau vereinigt Theorie und Praxis zu einer eigenen Ingenieurbaukunst. Bei Wichtung der vielen Einflüsse steht je nach dem Stand der eigenen Kenntnisse einmal die Praxis, das andere Mal mehr die

Theorie im Vordergrund. Der Ingenieur-tunnelbau wird heute weitgehend von Bauingenieuren betrieben, doch sollte sich jeder bewusst sein, dass Statik- und Massivbaukenntnisse allein nicht ausreichen. Geologie, Geomechanik, Maschinentech-nik und insbesondere Bauverfahrenstechnik gehören gleichwertig dazu.“

Die Bauverfahrenstechnik im Tunnelbau ist ein interaktives Fach, das die Einflüsse der Ausführung auf die Konstruktion mit der Erfassung der Bauzu-stände berücksichtigen muss.

Der Untertagebau ist eng mit der Entwicklung der Kulturvölker verbunden (Bild 1-3). Schon in der Vergangenheit wurden unterirdische Stollen und Verteidigungssysteme gebaut. Ferner wurde von alters her Bergbau betrieben. Der Tunnelbau hat seine Wurzeln im Bergbau. Die Abbautechnik, Maschinentech-nik und Sicherungsmassnahmen des Hohlraums waren lange Zeit dem Bergbau entlie-hen. Noch heute ist das Abbauvolumen im Bergbau um Zehnerpotenzen höher als im Ingenieurver-kehrstunnelbau. Zwischen beiden besteht eine technologische Wechselbeziehung, die auch in Zukunft im Rahmen des Know-how-Transfers intensiv genutzt werden sollte. Der Untertagebau ist jedoch erst in neuer Zeit eine Ingenieurdisziplin geworden.

Nachfolgend sollen chronologisch die wichtigsten Untertagebauwerke aufgelistet werden.

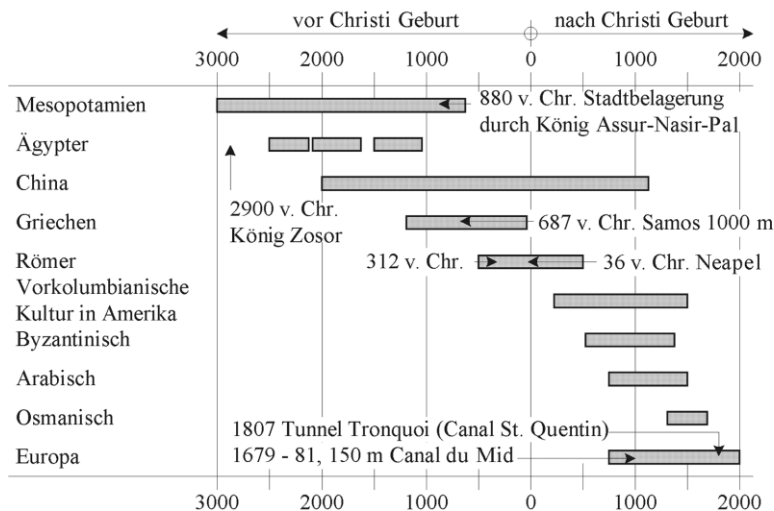


Bild 1-3 Tunnelbau in den vergangenen 5000 Jahren



2500 v. Chr.	Die Königin Semiramis soll in Babylon unter dem Euphrat einen 1 km langen Tunnel vom Königspalast zum Baalstempel errichtet haben
1200 v. Chr.	Mykene: Stollen von der Quelle in die Stadt
1000 v. Chr.	Jubsiter leiten die Quelle von Gihon unter die Stadt Jerusalem
700 v. Chr.	Wasserversorgungsstollen in Jerusalem; Länge 540 m, Volumen 20'000 m ³ (mit Schlägel und Eisen gelöst!)
600 v. Chr.	1.6 km langer Trinkwasserstollen auf Samos
700 – 550 v. Chr.	Die Etrusker bauen unter ihren Städten ganze Stollensysteme zur Wasserversorgung und Kanalisation, aber auch Bergwerke
36 v. Chr.	Vom römischen Kaiser Octavian werden die ersten Strassentunnel bei Cumae und zwischen Neapel und Puteoli (Pozzuoli) durch Felsrücken, die bis zum Meer reichen, gebaut (690 m lang, 9 m breit und 25 m hoch; sie können heute noch benutzt werden)
Nach Chr. Im Mittelalter	Katakombenbauten in Rom Stollen für Verteidigungszwecke und Bergwerke zur Salz- und Metallgewinnung; in der Schweiz z. B. das Silberbergwerk in Obersaxen
1679	Tunnel am Languedoc-Kanal, wo zum ersten Mal Schiesspulver im Tunnelbau angewendet wurde (im Bergbau schon 1627)
1708	Tunnel Urner Loch bei Andermatt: Pietro Morettini hatte die Felswand mit dem Meissel durchschlagen, um die schwankende Brücke durch einen sicheren Weg zu ersetzen. Damit begann die Durchbohrung des Gotthards

Der Tunnelbau erlebte als Verkehrstunnelbau seine erste grosse Blüte in der Neuzeit durch den Beginn des Eisenbahnbaus. In Europa und der Schweiz entstanden bis heute die folgenden wichtigen Bauwerke:

1826	Erster Eisenbahntunnel auf der Strecke Liverpool-Manchester
1857 – 1870	Mont-Cenis-Tunnel: Eisenbahntunnel durch die Alpen zwischen Frankreich und Italien. Zuerst wurden noch Bohrlöcher in Handarbeit hergestellt, dann wurden hydraulische und zuletzt pneumatische Bohrmaschinen verwendet. Sprengung mit Schwarzpulver
1864	Erfindung des Dynamits (Nobel)
1872 – 1878	St. Gotthard-Eisenbahntunnel, Länge 14990 m, Ausbruch 1110000 m ³
1898 – 1905	Simplon-Tunnel I, mit Parallelstollen, Länge: 19110 m
1908 – 1913	Lötschberg-Tunnel, Länge 14605 m
1912 – 1921	Simplon-Tunnel II, Länge 19110 m

Dies setzt sich durch die neuen Eisenbahntechniken bis in die Gegenwart fort: Bahn 2000, Hoch-

geschwindigkeitsverbindungen zwischen Städten usw.

Das Arbeitsfeld des Bauingenieurs im Tunnelbau ist nicht auf den Eisenbahnbau beschränkt, sondern zu seinen Untertageaufgaben gehören auch Stollen und Kavernen beim Bau von Wasserkraftanlagen, besonders nach dem 2. Weltkrieg, wie z. B.:

1955 – 1960	Kraftwerk Grande Dixance, 150 km Stollenlänge, 1500000 m ³ Ausbruch
1950 – 1958	Kraftwerk Niagara-Fälle, 3350000 m ³ Ausbruch
1961 – 1964	Pumpspeicherwerk Vianden, Luxemburg, Kavernenzentrale, 160000 m ³ Ausbruch
und einige Strassentunnel:	
1961 – 1967	San Bernardino-Tunnel, 6600 m
1969 – 1980	St. Gotthard-Strassentunnel, 16322 m
1974 – 1978	Arlberg-Strassentunnel, 13972 m, 1450000 m ³ Ausbruch

Das Zusammenwachsen Europas zu einem gemeinsamen Wirtschaftsraum erfordert die Verknüpfung der nationalen Verkehrsnetze zu einem transkontinentalen Netz (West-Ost und Nord-Süd). Für diese



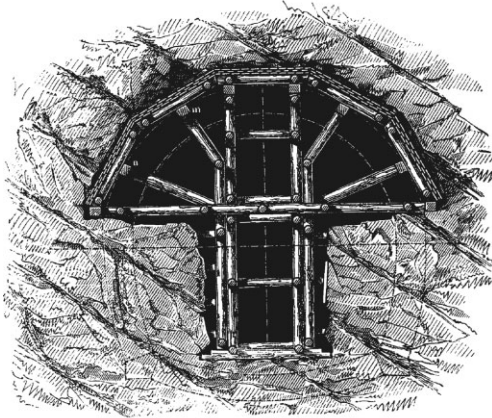


Bild 1-4 Oesterreichische Bauweise nach Rziha (Querschnitt) [1-1]

Netze der Strassen und Schnellbahnen sind in den nächsten zwanzig Jahren Investitionen in Höhe von 350 bis 600 Milliarden sFr. (ca. 220 bis 375 Milliarden €) vorgesehen. Bei den Hochgeschwindigkeitsstrecken der Bahnen sind nur geringe Steigungen und grosse Kurvenradien möglich. Das erfordert auch in den Mittelgebirgsregionen sehr viele Tunnelbauwerke. Zur Verbesserung des Güter- und Personentransports werden im Rahmen des Ausbaus der europäischen Nord- und Südverbindungen wie auch zur Verminderung der Umweltbelastung zahlreiche Tunnelbauwerke in der Schweiz realisiert bzw. projektiert.

Der bergmännische Tunnelbau wird weltweit, besonders in den sich entwickelnden Ländern Asiens und Südamerikas, im Rahmen der Verbesserung der Infrastruktur ein sehr grosses Volumen einnehmen. Für die Städte Bangkok, Taipeh, Manila, Kuala Lumpur sowie die Städte Indiens und Chinas wird dies von zentraler Bedeutung sein, um die gewaltigen Verkehrsprobleme wirtschaftlich zu lösen. Möglicherweise wird der Personenverkehr (Pendler, Geschäftsbesprechungen) mittelfristig durch die neuen zentrumslosen Informations- und Kommunikationsmittel sowie die mögliche Telearbeit in virtuellen Unternehmen abnehmen und sich damit umwelt- und energieschonend entwickeln.

Dieses Fachbuch befasst sich mit der Planung des Herstellungsprozesses von Tunnelbauwerken in Locker- und Festgestein unter Beachtung folgender Aspekte:

- Ausbruch- und Sicherungsmethoden in Abhängigkeit von geologischen und hydrologischen Randbedingungen, der Abbaubarkeit des Gesteins und der Umweltauswirkungen
- Schutter- und Transportsysteme
- Personal- und Geräteeinsatz
- Leistungsermittlung
- Baustelleneinrichtung und Logistik

Diese oben genannten Aspekte dienen gleichzeitig als Grundlage zur Ermittlung der Kosten der Untertagebauwerke.

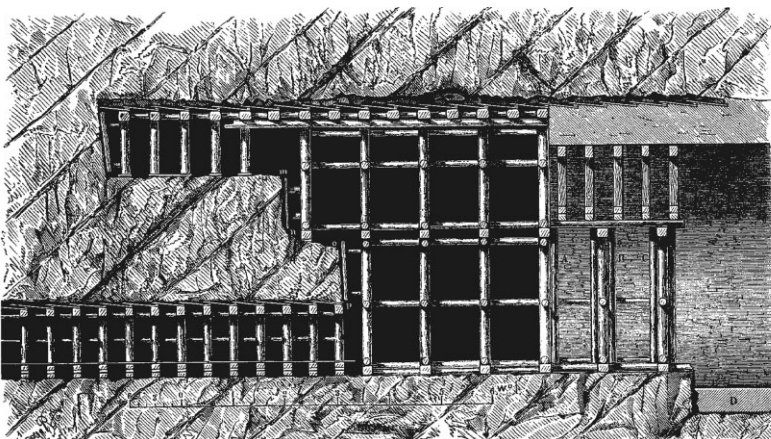


Bild 1-5 Oesterreichische Bauweise nach Rziha (Längsschnitt) [1-1]

2 Geologische Vorerkundung

2.1 Geologische Begriffe

Der Tunnel wird wie kein anderes Ingenieurbauwerk in seiner Bauvorbereitung, -ausführung und -überwachung durch das Gebirge bestimmt. Um diese komplexe Aufgabe unter dem Gesichtspunkt der Risikominimierung in bezug auf eine technisch und wirtschaftlich erfolgreiche Projektumsetzung zu lösen, ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Planenden (Projektverfassern, Geologen, Geotechnikern, Geophysikern, Messtechnikern etc.) und Ausführenden (Bauunternehmern, Maschinenherstellern, Materialherstellern) unumgänglich. Der Projektverfasser muss die Ergebnisse dieser interdisziplinären Zusammenarbeit zusammenfassen.

Die Kenntnisse der Geologie sind ganz entscheidend für die Klassifizierung des Gebirges und die Bestimmung der Ausbruchklassen. Der Bauingenieur sollte die Entstehung des Gebirges und deren Auswirkung auf petrographische Eigenschaften kennen. Dies ist Voraussetzung für eine Kommunikation mit den Geologen sowie für die eigene phänomenologische Deutung.

Die Gesteine unterscheidet man nach den gebirgsbildenden Vorgängen [2-1] wie folgt:

- **Magmatite** oder magmatische Gesteine entstehen aus schmelzflüssigem Magma durch Erstarrung. Ihre Struktur ist durchgehend kristallin und gleichmässig körnig.
- **Metamorphite** oder metamorphe Gesteine entstehen durch Umwandlung aus anderen Gesteinen.
- **Sedimente** (unverfestigt oder verfestigt) entstehen durch Ablagerungen von durch Verwitterung zerstörtem Gestein und/oder organische Ablagerungen (im Meer). Die Verfestigung und Verklebung erfolgt meist durch tektonische Bewegungen der Erdkruste.

Sedimente bedecken rund 75 % der Erdoberfläche, und nur 25 % sind Magmatite und metamorphe Gesteine, obwohl die Erdkruste insgesamt nur zu 5 % aus Sedimenten besteht (unverfestigt \approx Lockergestein, verfestigt \approx Sedimentgestein).

Die **Geologie** befasst sich mit dem Aufbau der Erdkruste. Die **Petrographie** befasst sich mit dem Aufbau, der Zusammensetzung und der Klassifikation der Gesteine.

Die wichtigsten gesteinsbildenden **Mineralien** sowie deren Anteile in der Erdkruste sind die folgenden (Bild 2.1-1):

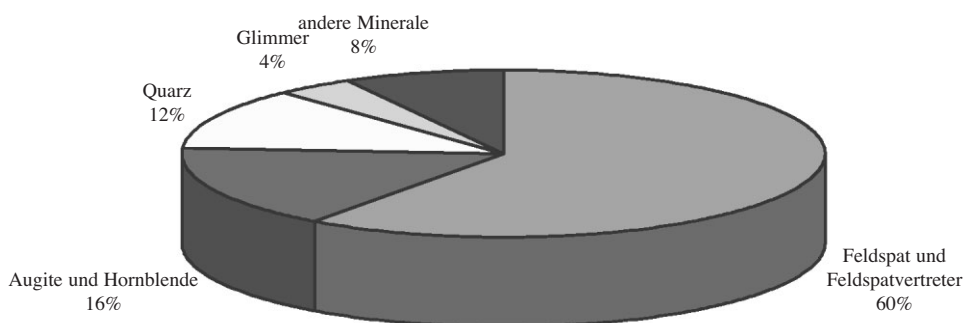


Bild 2.1-1 Verteilung der Minerale in der Erdkruste [2-1]

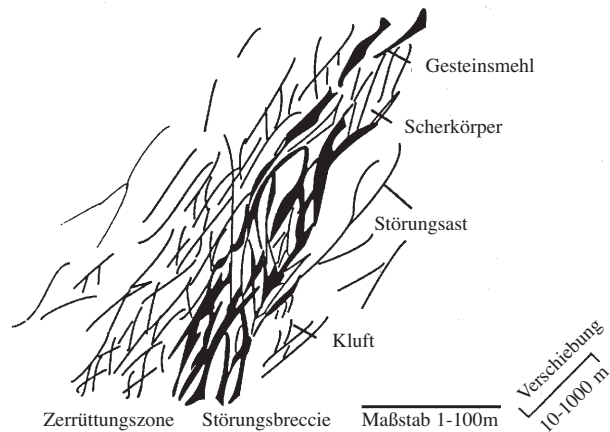


Bild 2.2-1 Strukturelemente und Homogenbereiche in kataklastischen Störzonen [2-2]

- Die **Feldspäte** zeichnen sich durch ihre vollkommene Spaltbarkeit aus und sind im wesentlichen kristallin. Diese Mineralien findet man in Granit, Porphyr, etc.
- Die **Hornblende** ist ein dunkles Mineral.
- Die **Quarzite** sind meist klar und durch das Fehlen der Spaltbarkeit charakterisiert. Man findet Quarzite in Magmatiten, Metamorphiten sowie in Sedimenten.
- Die **Glimmerminerale** zeichnen sich durch eine sehr vollkommene Spaltbarkeit aus. Diese Mineralien sind u. a. in Gneisen, Glimmerschiefern etc. vorhanden.

2.2 Problem- und Störzonen im Tunnelbau

Durch gebirgsbildende Prozesse und Erosion gelangen Sedimentgesteine, Metamorphite und Magmatite wieder an die Erdoberfläche. Dadurch verändern sich die Gesteine bzw. ihre Eigenschaften [2-2], die sich durch:

- primäre gesteinsbildende Prozesse
- sekundäre tektonische Veränderungen

ausgebildet haben. Dabei besitzen einige Gesteine problematische Eigenschaften für den Tunnelbau (Tabelle 2.2-1). Geologische Problemzonen im Tunnelbau lassen sich jedoch nicht nur auf die Gesteine mit kritischen primären und sekundären Eigenschaften zurückführen, sondern folgende Faktoren sind zudem ausschlaggebend:

- Überlagerung
- Geländetopographie
- Tiefenlage der Felsoberfläche

- Primärspannungen
- Orientierung der Trennflächen und Schichtgrenzen zur Tunnelachse
- Vortriebsmethode

Im Gebirgstunnelbau haben Lockergesteinszonen oft nur eine untergeordnete Bedeutung. Ausnahmen bilden glazial übertiefe quartäre Erosionsrillen.

Störzonen sind durch Deformationen des Gebirges entstanden (Bild 2.2-1). Die Gesteine in den Störzonen sind durch die tektonischen Deformationen zerbrochen und zerschert. Die Gesteinsfragmentierung kann so weit gehen, bis nur noch feinkörniges Gesteinsmehl vorliegt. Man bezeichnet solche Gesteinsfragmente in den Störzonen als:

- Kakirite
 - kohäsionsloses Gesteinsmehl
 - kohäsionslose Brekzien (grobe, kantige Komponenten)
- Kataklasite
 - kohäsives Gesteinsmehl
 - kohäsive, tektonische Brekzien

Diese Störzonen können eine Mächtigkeit von einigen Dezimetern bis zu 100 Metern aufweisen. Aus der Mächtigkeit, dem Einfallwinkels zur Tunnelachse, der Häufigkeit und Art der Gesteinsfragmente und deren Verkittung sowie den hydrologischen Verhältnissen ergibt sich die Problematik für den Tunnelbau.

2.3 Phasen der Gebirgsvorerkundung

Die ingenieurgeologischen, fels- und bodenmechanischen Erkundungen [2-3] sind um so umfangreicher und sorgfältiger durchzuführen,