

Tunnelbau : von der Empirie zur Wissenschaft

Autor(en): **Wild, Heinz Walter**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ferrum : Nachrichten aus der Eisenbibliothek, Stiftung der Georg Fischer AG**

Band (Jahr): **80 (2008)**

PDF erstellt am: **01.07.2024**

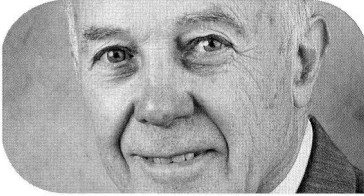
Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-378439>

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.



Prof. Dr.-Ing. Heinz Walter Wild

Studium des Bergfachs an der RWTH Aachen. Bergwerksdirektor der Zeche Osterfeld in Oberhausen. Nach Gründung der Ruhrkohle AG Hauptabteilungsleiter für Forschung und Entwicklung des Ruhrkohle-Konzerns. Honorarprofessor der TU Clausthal. Autor mehrerer Bücher sowie 250 wissenschaftlicher Abhandlungen, darunter viele zur Geschichte des Berg- und Hüttenwesens und zur Geschichte der Sprengtechnik. Vereidigter Sachverständiger für Sprengtechnik, Vortriebstechnik und Tunnelbau. Langjähriger Vorsitzender des Geschichtsausschusses der Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik (GDMB). Mitherausgeber der «Zeitschrift zur Geschichte des Berg- und Hüttenwesens».

Tunnelbau – Von der Empirie zur Wissenschaft

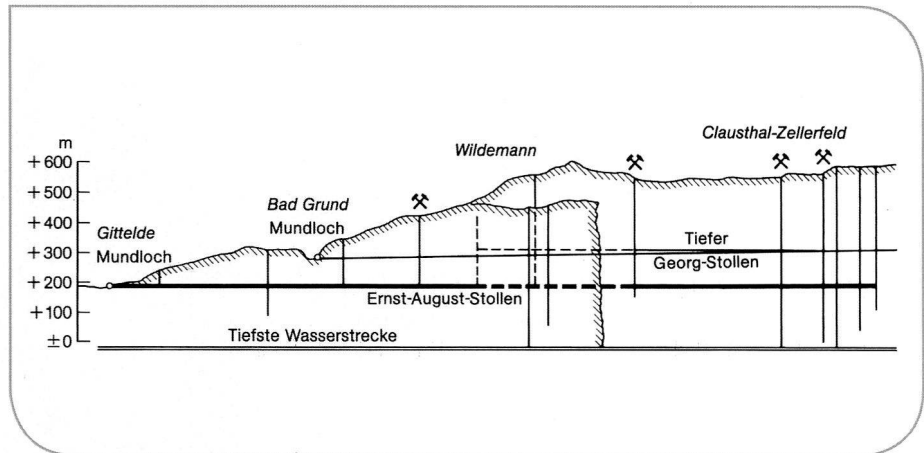


Bild 1: Vereinfachter Schnitt durch den Ernst-August-Stollen im Harz, Länge 26 km, Bauzeit 19 Jahre, fertiggestellt 1864.

Tunnel wurden schon im Altertum und in der frühen Neuzeit mit grossem Aufwand und nach handwerklichen Methoden hergestellt. Der Tunnelbau erlebte einen Aufschwung, als nach Erfindung der Eisenbahn für den wachsenden Schienenverkehr Tunnel durch Hügel und Berge aufgeföhren werden mussten. Der erste grosse Alpentunnel war der Mont-Cenis-Tunnel. Er wurde begonnen mit handgeschlagenen Sprengbohrlöchern und Verwendung von Schwarzpulver. Die Vortriebsarbeiten waren handwerklich geprägt und beruhten auf reiner Erfahrung (Empirie). Durch Einsatz von Bohrmaschinen konnte erstmals eine Mechanisierung der Bohrarbeit erreicht werden. Die Bauzeit des Tunnels wurde dadurch um 11 Jahre verkürzt. Weitere grosse Alpentunnel folgten, wobei das von Alfred Nobel entwickelte Dynamit angewandt wurde. 1867 erschien von Franz Rziha das «Lehrbuch der Gesamten Tunnelbaukunst». Er wurde der Begründer der wissenschaftlichen Lehre vom Tunnelbau. Nach dem Zweiten Weltkrieg erlebte der Tunnelbau einen neuen bis heute andauernden Aufschwung, da der steigende Kraftfahrzeugsverkehr moderne Verkehrswege forderte. Heute spielt der Tunnelbau in nahezu allen Ländern der Welt für die Verkehrsinfrastruktur eine wichtige Rolle. Der Tunnelbau ist längst ein eigenständiges wissenschaftliches Fach geworden. In Publikationen, Kongressen, Symposien werden die Erfahrungen und der Wissensstand weltweit ausgetauscht.

Even in antiquity and early modern times, tunnels were a major feat of construction and required specialized know-how. Tunnel construction experienced a boom after the invention of the railroad, when tunnels were necessary to push through hills and mountains for the expanding rail transport. The first large Alpine tunnel was the Mont-Cenis Tunnel. It began with hand-hewn blast holes filled with gunpowder. The tunnelling was manual work and relied purely on observation (empiricism). With the arrival of drills, mechanization was first introduced to tunnel construction. The construction time was thus reduced by 11 years. Other extensive Alpine tunnel projects followed, whereas dynamite, developed by Alfred Nobel, was then used. In 1867 Franz Rziha wrote «Lehrbuch der Gesamten Tunnelbaukunst», which was considered the textbook on the art of tunnel construction. After World War II, tunnel building again experienced strong growth as the increasing volume of motorized traffic demanded modern transportation routes. Today tunnel construction is an essential element of traffic infrastructure in nearly every country around the world. Tunnel construction has long become an academic science in its own right. Experiences and expertise are exchanged worldwide in technical publications, conferences and symposia.

Einführung

In der Bezeichnung der Untertagebauten herrscht eine Meinungsvielfalt, sodass zunächst Definitionen notwendig sind. Ein **Tunnel** ist ein unterhalb der Geländeoberfläche liegender horizontaler oder schwach geneigter Hohlraum, welcher an seinen *beiden Enden* ins Freie mündet. Ein **Stollen** ist ein horizontaler Hohlraum, der nur *einen Zugang* besitzt. Die im Bergbau hergestellten horizontalen Hohlräume *ohne Zugang nach draussen*, die nach den gleichen Prinzipien wie Stollen und Tunnel aufgeföhren werden, bezeichnet man als **Strecken**.

Stollen sind im Bergbau seit Jahrhunderten in Gebrauch. Die meisten Bergwerke, die im «Berg» arbeiteten, daher der Name Bergwerk, waren durch Stollen aufgeschlossen. Sie wurden auch zur Wasserlösung von Bergwerken und sogar ganzer Bergreviere aufgeföhren und erreichten dabei vielfach sehr grosse Längen. Der Rothschönberger Stollen im Freiburger Revier erreichte zum Beispiel eine Länge von 51 km und gilt als längster Stollen weltweit. Mehrere Generationen haben daran gearbeitet. Bild 1 zeigt als Beispiel einen vereinfachten Schnitt durch den ebenfalls zur Wasserlösung aufgeföhrenen Ernst-August-Stollen im Harz. Seine Bauzeit betrug bei einer Länge von 26 km 19 Jahre. Er wurde 1864 fertiggestellt. Es ist zu ersehen, dass in gewissen Abständen Schächte angelegt waren – sie wurden als Lichtlöcher bezeichnet –, um mehrere Angriffspunkte für den Vortrieb zu gewinnen.

Die Pioniere des Eisenbahn-Tunnelbaus im zweiten Drittel des 19. Jahrhunderts mussten bei ihren Tunnelvorhaben zunächst sowohl auf das fachliche Wissen als auch auf die personelle Unterstützung von Bergleuten mit deren Erfahrungen in der Vortriebstechnik zurückgreifen.

Verfahren beim Vortrieb im Tunnel- und Stollenbau

Die Gewinnung, das Herauslösen des Gesteins aus dem Gebirgsverband, ist der zentrale Arbeitsprozess des Bergbaus wie auch im Tunnel- und Stollenbau. Die Anwendbarkeit der seit Jahrhunderten bekannten handwerklichen Gewinnungsmethoden war in erster Linie von der Gebirgsfestigkeit abhängig. Die viele Jahrhunderte dominierende Schlägel- und Eisenarbeit und Keilhauenarbeit verlor an Bedeutung, nachdem die Sprengarbeit mit Schwarzpulver eingeföhrt wurde, dessen erste dokumentierte Anwendung 1627 erfolgte. Seit dieser Zeit war beim Vortrieb von Strecken, Stollen und Tunneln der Arbeitszyklus vorgegeben: Sprengen, Fördern, Ausbauen.

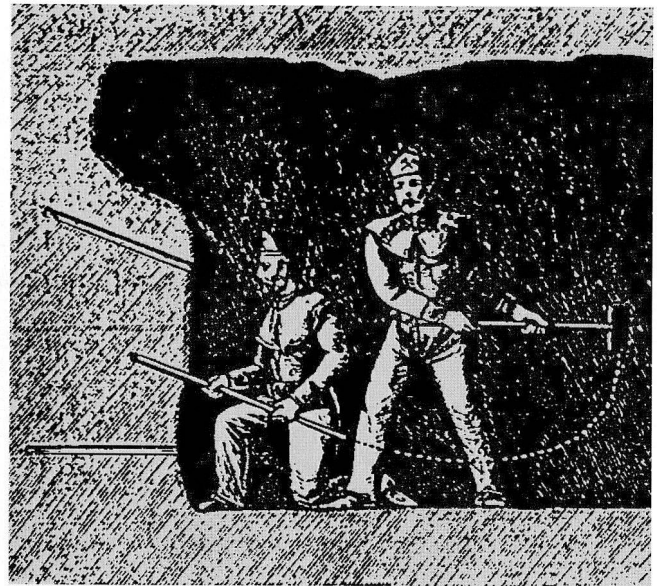


Bild 2: Zweimännisches Bohren.

Schwarzpulver

Schwarzpulver ist in Europa seit dem 14. Jahrhundert bekannt. Es ist ein Gemisch aus Kaliumnitrat (75%), Schwefel (10%) und Holzkohle (15%) und wurde zunächst nur für militärische Zwecke verwendet. Seine Anwendung im Bergbau gilt als sogenannte Basisinnovation und war ein Meilenstein in der Entwicklung der Lösetechnik. Erstmals nämlich wurde eine völlig neue Energie, eine chemische Energie eingesetzt, die eine wesentliche Produktionssteigerung gegenüber manuellem Lösen mit sich brachte.

Bohrtechnik

Bei Verwendung von Schwarzpulver bedarf es eines Laderiums, in dem das eingebrachte Pulver durch den sich entwickelnden Gasdruck wirken kann. Dafür sind Bohrlöcher notwendig, die manuell hergestellt wurden. Diese Arbeit wurde als schlagendes Bohren ausgeföhrt, wobei mit dem Fäustel auf die im Bohrloch steckende Bohrstange geschlagen wurde. Je nach Querschnittsgrösse wurde einmännisch oder – wie später im Tunnelbau – zwei- oder dreimännisch gebohrt (Bild 2). Es gab Kolben-, Kronen- und Meisselbohrer. Die Bohrfortschritte waren in der Regel gering. In vielen Fällen dauerte das Herstellen eines Bohrloches von einem Meter Länge oft 5–6 Stunden. Der erbohrte Hohlraum – das Bohrloch – muss hermetisch verschlossen werden, um den Gasdruck des Schwarzpulvers voll zur Wirkung kommen zu lassen. Nach vielen Versuchen wurde das Verdämmen mit Lehm (Letten) mit Erfolg eingeföhrt. Die Technik des händischen Bohrens wurde – auch im Tunnelbau – bis Mitte des 19. Jahrhunderts angewandt.

Zündtechnik

Sprengstoffe benötigen für die Einleitung ihrer chemischen Umsetzung eine Energiezufuhr. Die Zündung durch eine bis zur Sprengladung reichende Zündschnur war die älteste Zündmethode der bergmännischen Sprengarbeit. Es gab mehrere Varianten der Zündung, so zum Beispiel mit Pulver gefüllte Röhrchen aus Schilf oder Haselnuss. Immer musste der Zünder durch den Lehmbesatz durchgeführt werden, was mit sogenannten Räumnadeln erfolgte (Bild 3).

Die Verfahrensweise bei der Zündung war unzulänglich und unsicher und führte oft zu Versagern und schweren Sprengunfällen. Mangels Alternativen wurde diese Art der Zündung bis etwa 1830 verwendet. Der entscheidende Fortschritt wurde erzielt durch die Erfindung der langsam brennenden Zündschnur durch den Engländer Bickfort, der 1831 ein Patent darauf erhielt. Seit 1835 war es im Bergbau und auch im Tunnelbau bekannt. Die Bickfort'sche Erfindung war eine bahnbrechende sicherheitliche und technische Innovation beim Sprengen mit Schwarzpulver.

Förderung

Unter dem Begriff «Förderung» versteht man das Laden, Fortschaffen und Entladen des herausgesprengten Materials, des Haufwerks.

Verwendet wurden im Bergbau und im Tunnelbau in der Regel Förderwagen, die auf Gestängen liefen. Anfangs noch auf Holzgestängen, wurden etwa ab 1850 durchweg Gestänge aus Eisen verwendet. Das aus den Stollen und Tunneln geförderte Haufwerk wurde mittels Sturzworrichtung oder Rutschen auf Halde gekippt. Es gab verschiedene Arten von Fördergefässen, meist Förderwagen, zum Teil wurden auch Kippwagen verwendet. Die Wagen wurden entweder von Hand zur Entladestelle geschoben oder durch Pferde gezogen (Bild 4).

Ausbauen

Ein Ausbau von Stollen und Tunneln war in den meisten Fällen notwendig und nur dann nicht erforderlich, wenn das Gebirge fest und selbst tragfähig war. Üblich waren meist eine aufwendige Holzverbauung und die Mauerung. Im Tunnelbau wurde fast generell Mauerung angewendet, da wegen der dauernden und lang angelegten Betriebszeit eines Tunnels eine langfristige Standzeit eine unabdingbare Voraussetzung war. Mauerung war der sicherste, allerdings auch aufwendigste Ausbau. Auch hier war der Bergbau wiederum Vorbild. Im Erzbergbau wurden viele Stollen sowie Strecken gemauert, wobei sich Spezialisten herausgebildet hatten. Es gab einen eigenen Berufsstand – die Bergmaurer.

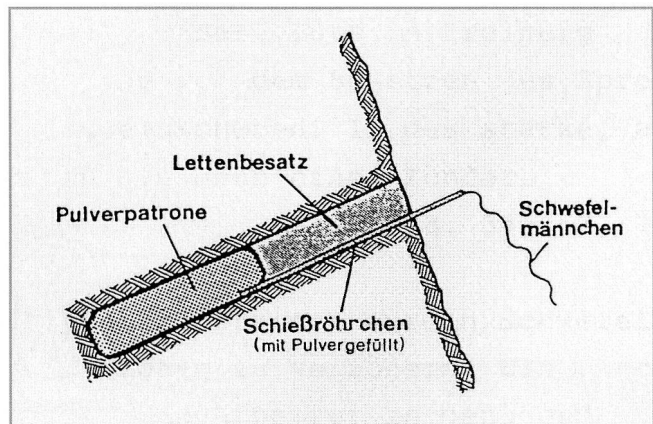


Bild 3: Zünden mit Schiessröhrchen.

Unterschiedliche Voraussetzung im Bergbau und im Tunnelbau

Der Tunnelbau hat sich aus den Erfahrungen des Bergbaus entwickelt, sich dann aber in wichtigen Punkten vom Bergbau gelöst, da die spezifischen Gegebenheiten beim Bergbau und Tunnelbau unterschiedliche Lösungen erforderten.

Die wesentlichen Unterscheidungen beim Bergbau und Tunnelbau im 19. Jahrhundert und auch in der Folgezeit sind folgende: Die Stollen- und Streckenquerschnitte sind im Bergbau gering und liegen zwischen 6 und 14 m². Durch die im Eisenbahnbau notwendigen grösseren Dimensionen sind im Tunnelbau Querschnitte bis 80 und zum Teil bis 100 m² notwendig.

Die Auffahrungen im Bergbau bewegen sich in der Regel in geologisch bekanntem Gebirge, beim Tunnelbau ist das Gebirge meist unbekannt, geologische Aufschlüsse sind selten und die Projektierung oft spekulativ. Der Bergbau betreibt seine Stollen- und Streckenauffahrungen im Rahmen seiner anderen Aktivitäten, das heisst, das eigentliche Ziel ist die langfristige Gewinnung von Rohstoffen aus der Lagerstätte. Beim Tunnelbau hingegen ist das Herstellen des Tunnels einziges Zielprojekt, auf das alle Aktivitäten ausgerichtet sind.

Der klassische Tunnelbau – Eisenbahntunnel im 19. Jahrhundert

Die schnelle Entwicklung und Ausdehnung des europäischen Schienennetzes durch die Eisenbahn, die Trassen mit geringen Neigungen benötigte, führte zu Planungen zum Durchfahren von Hügeln und Bergen mittels Tunnel. Der erste Tunnel in Deutschland entstand bei Oberau bei Meissen in Sachsen und wurde von 1837 bis 1839 von erzgebirgischen Bergleuten hergestellt, die damals allein die für die Auffahrung nötigen Fachkenntnisse besaßen. Bei grossen und hohen Gebirgszügen wie den Alpen oder zum Beispiel

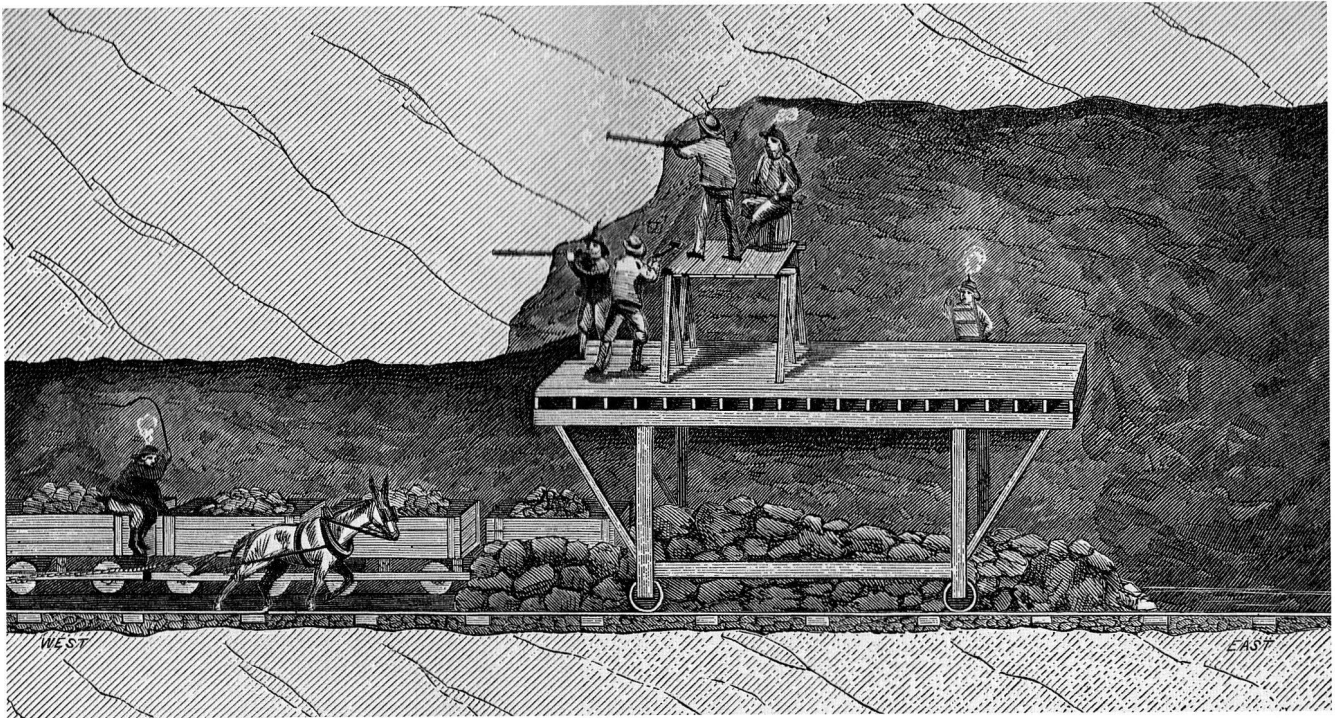


Bild 4: Förderung im Tunnel mit Pferden.

den Appalachen in den Vereinigten Staaten von Amerika waren Tunnel mit sehr grossen Längen erforderlich. Grundsätzlich mussten die neuen Eisenbahntunnel mit grossen Querschnitten aufgeföhren werden, wie sie bisher in diesen Dimensionen auch im Bergbau nicht notwendig gewesen waren.

Die Tunnelbauweisen

Die Herstellung der grossen Tunnelprofile führte zu sogenannten Tunnelbauweisen, die den jeweilig vorkommenden Gebirgsverhältnissen angepasst waren. Alle Bauweisen hatten das Ziel, den Ausbruch in mehrere Abschnitte zu unterteilen und diese jeweils einzeln aufzuföhren. Ein Vollausbuch war damals noch nicht möglich. Meist wurde ein Richt- oder Pilotstollen vorgetrieben, die anderen Aufföhren folgten meist nach. Der Pilotstollen diente dabei gleichzeitig als Erkundungsstollen zur Klärung der geologischen Situation. Die verschiedenen Bauweisen unterscheiden sich nicht nur durch den zeitlichen Ablauf des Ausbruchs, sondern auch durch die Art des erforderlichen Verbaus.

Es war seinerzeit üblich, eine neue Methode der Tunnelbauweise nach dem Land ihrer Entwicklung oder ihrer hauptsächlichen Anwendung zu benennen. Die Eisenbahntunnel des 19. Jahrhunderts wurden in nahezu allen Fällen nach folgenden Bauweisen erstellt:

- Deutsche Bauweise (Kernbauweise)
- Belgische Bauweise (Unterbaugrundbauweise)
- Österreichische Bauweise (Aufbruchbauweise)
- Englische Bauweise (Vortriebsbauweise)

Die deutschen Tunnel wurden über längere Zeit vorwiegend in der deutschen Bauweise erstellt. Als Beispiel für eine der vier Bauweisen soll sie kurz vorgestellt werden.

Entlang dem Ausbaurand werden kleine Querschnitte an den Stössen ausgebrochen, es wird dann nach oben in der Kalotte weitergearbeitet. In diesen Bereichen wird erst die vorläufige Sicherung mit Holz (Bild 5) und dann die endgültige Sicherung als Mauerung eingebracht. Auf diese Weise entsteht zunächst ein in diesen Teilbereichen hergestelltes und offenes und dann später ein zusammenhängendes Gewölbe. Der Kern bleibt so lange stehen, bis das Gewölbe steht; er dient gleichzeitig als Abstützung des hölzernen Ausbaus. Wenn das Gewölbe gemauert ist, wird der Kern im Schutze der gesamten Auskleidung entfernt. Wegen des bis zuletzt stehen gebliebenen Kerns wird das Verfahren auch als Kernbauweise bezeichnet. Mit dieser Methode waren auch schwierige und druckhafte Gebirgsverhältnisse zu beherrschen (Bild 6).

Alle Tunnelbauweisen konnten je nach den geologischen Bedingungen und der angetroffenen Gesteinsfestigkeit variiert und den jeweiligen Bedingungen angepasst werden.

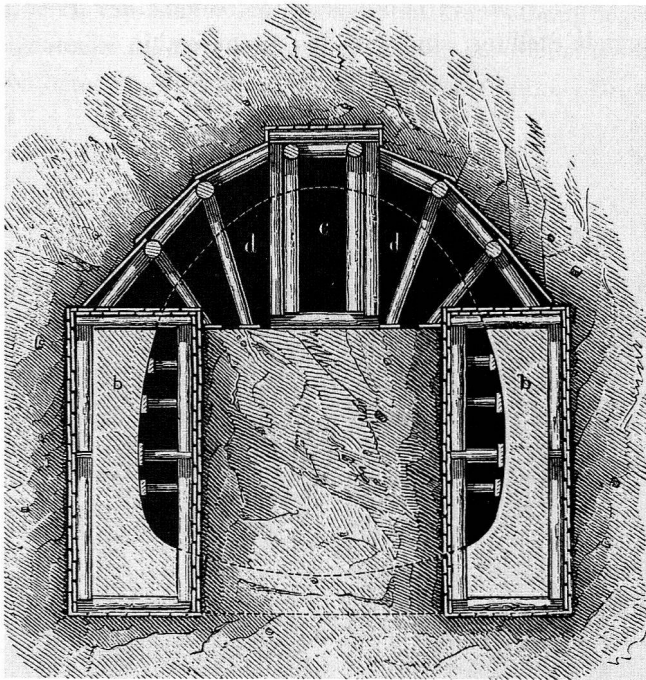


Bild 5: Deutsche Tunnelbauweise mit Stehenlassen des Kerns (obere Zimmerung).

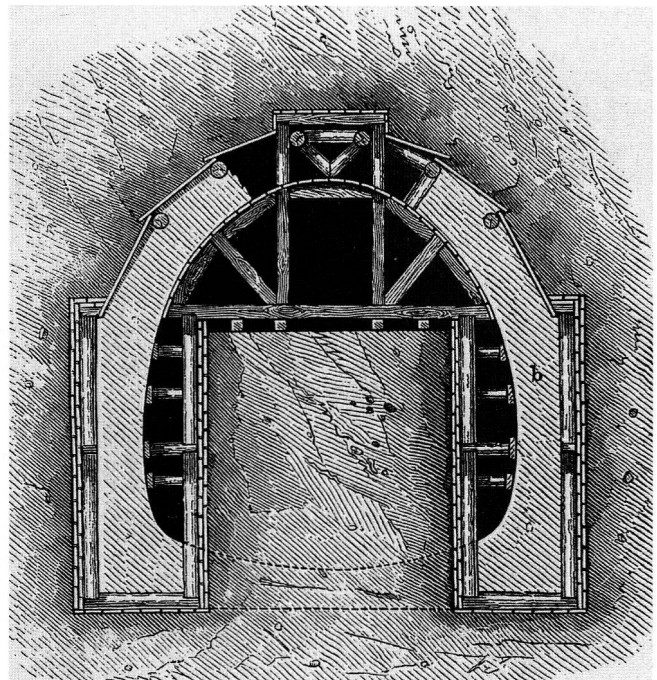


Bild 6: Deutsche Tunnelbauweise (Gewölbemauerung).

Tunnelbau als Wissenschaft

Die zunehmende Zahl der zunächst noch kurzen Tunnels und die meist sehr unterschiedlichen Gebirgsbedingungen, ferner Schwierigkeiten in der Organisation, der technischen Ausführung wie auch der Kalkulation der teuren Tunnels führten zu Publikationen, in denen Erfahrungen bei einzelnen Tunnelvorhaben mitgeteilt wurden. Sie erschienen in Zeitschriften für das Bauwesen, in Zeitschriften von Ingenieursvereinen oder in bergmännischen Journalen. Das Bedürfnis nach einer Zusammenstellung und zur Auswertung der bisherigen Erfahrungen im Tunnelbau war ab der Mitte des 19. Jahrhunderts vorhanden. Der Begründer der Lehre vom Tunnelbau war Franz Rziha (Bild 7). Er wurde am 28. März 1831 in Nordböhmen geboren. 1851 trat er nach Absolvierung des Prager Polytechnikums in die Praxis ein und war unter anderem beim Bau der Semmeringbahn beteiligt. Er war dann in Preussen tätig und anschliessend in braunschweigischem Staatsdienst. 1874 wurde Rziha in das k.k. Handelsministerium nach Wien berufen. 1878 erfolgte seine Ernennung zum Professor des Eisenbahn- und Tunnelbaus an der Technischen Hochschule in Wien.

1867 und 1872 veröffentlichte er sein umfangreiches zweibändiges Werk «Lehrbuch der Gesamten Tunnelbaukunst», das im Berliner Verlag Ernst & Korn erschienen ist (Bild 8). Mit seinem Lehrbuch hat er die Tunnelbautechnik als eigenständige technische Disziplin begründet und aus dem Stand der handwerklichen Empirie emporgehoben.

In seinem Werk hat Rziha wichtige Grundsätze des modernen Tunnelbaus schon erkannt und beschrieben. Er entwickelte unter Ausnutzung der seit 1835 aufgehäuften empirischen Daten und als Kenner der theoretischen Kenntnisse zur Sprengarbeit eine Methodik für die Gedingevorausberechnung, das heisst die zu bezahlenden Leistungsvoraussetzungen der Mineure sowie für die Kalkulation und Kostenvoranschläge bei Tunnelvorrieben. Gerade diese von ihm in Angriff genommene Aufgabe war besonders wichtig, um die riesigen Investitionen für die Tunnelbauten der Jahre nach 1840 möglichst exakt vorausbestimmen zu können.

Franz Rziha hat neben seinem epochemachenden Werk über die Tunnelbaukunst eine grosse Zahl von Einzelveröffentlichungen herausgebracht, darunter auch über die Erfindung der nach ihm benannten Tunnelbaumethode, die durch die Anwendung einer Eisenrüstung anstatt der bis dahin üblichen Holzzimmerung charakterisiert ist.

Auf einen Aspekt ist noch hinzuweisen. Franz Rziha hat sich mit seinem Vater Eduard Rziha, einem österreichischen Geniehauptmann, mit den theoretischen Grundlagen der Sprengtechnik befasst. Üblicherweise bestimmten die Mineure wie auch die Bergleute die Anzahl der Bohrlöcher und die Stärke der Schwarzpulverladungen beim Vortrieb nach Gefühl. Vater und Sohn Rziha stellten theoretische Überlegungen zur Sprengarbeit an. Sie waren das Ergebnis des empirischen Materials, verknüpft mit naturwissenschaftlichen Theorien und auch anhand praktischer



Bild 7: Franz Rziha.

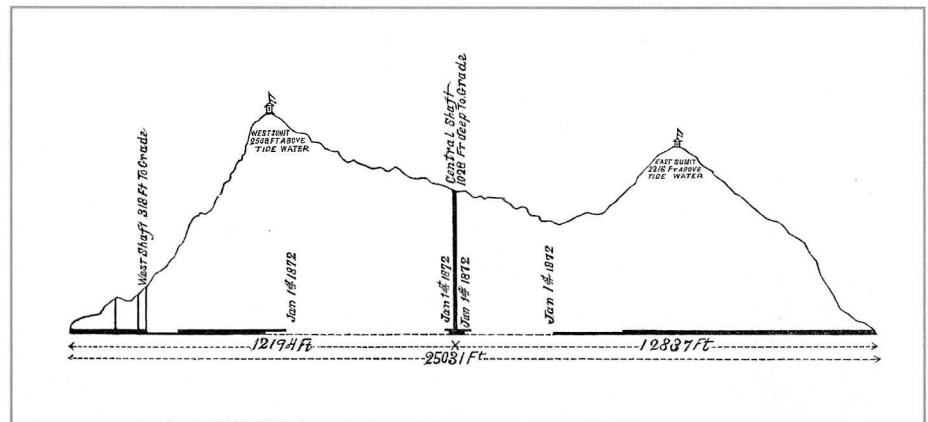


Bild 9: Profil des Hoosac-Tunnels.



Bild 8: Titelblatt «Lehrbuch der Gesamten Tunnelbaukunst»

Versuche. Die von ihnen abgeleiteten Regeln eigneten sich als Kriterium für die basisnahe Anwendung bei der Bohr- und Sprengarbeit. Wie hoch dies eingeschätzt wurde, zeigt unter anderem, dass Eduard und Franz Rziha 1864 den auf der Versammlung der österreichischen Berg- und Hüttenmänner gestifteten Geldpreis gemeinsam für ihre Arbeit «Über die Theorie der bergmännischen Sprengarbeit» erhielten.

Franz Rziha starb am 22. Juni 1897 hochgeehrt auf dem Semmering, nahe seiner Wirkungsstätte als junger Tunnelbauer.

Der Mont-Cenis-Tunnel – der erste grosse Alpentunnel

Der Mont-Cenis-Tunnel, auch bekannt als Fréjus-Tunnel, war der erste grosse Alpentunnel. Die Idee, die Gebirgsmas-

sive, die Savoyen in Frankreich vom Piemont in Norditalien trennten, durch einen Tunnel zu verbinden, kam bereits 1830 auf. In Angriff genommen wurde der Tunnel erst 1857, wobei von zwei Seiten aufgefahren wurde. Für den Bau waren 25 Jahre veranschlagt. Nach dem damaligen Stand der Technik wurde der Vortrieb mit Schwarzpulver und handgebohrten Bohrlöchern vorgenommen. Der durchschnittliche Vortrieb betrug 23 cm je Tag.

Etwa zum gleichen Zeitpunkt 1851 wurde der Hoosac-Tunnel in Angriff genommen. Er sollte auf einer Länge von 7,64 km einen Bergzug an der Westgrenze des US-Staates Massachusetts für die Eisenbahnstrecke Boston–Albany durchtunneln. Während der Mont-Cenis-Tunnel mangels alternativer Angriffspunkte nur von den beiden Portalen auf italienischer und französischer Seite aufgefahren werden konnte, konnte der Hoosac-Tunnel, der mit zwei zusätzlichen Schächten versehen war, von mehreren Angriffspunkten aufgefahren werden (Bild 9).

Allen im Tunnelbau und im Bergbau Tätigen war klar geworden, dass die seit Jahrhunderten angewendeten Verfahren des Sprengens mit Schwarzpulver und händischem Bohren auf Dauer für Grossprojekte wie die der langen Gebirgstunnel unzureichend waren. Auf der ersten Versammlung der österreichischen Berg- und Hüttenmänner in Wien im Jahre 1859 wurde das Ziel einer grundlegenden Verbesserung wie folgt formuliert:

«Es muss etwas erfunden werden, um die Arbeit auf dem Gesteine, namentlich auf dem festen Gesteine, zu beschleunigen und wohlfeiler zu machen. Und froher Hoffnung füge ich bei, es wird erfunden werden, denn mächtig drängt das Bedürfnis dazu, und gerichtet war der Fortschritt auf diesem Felde seit drei Jahrhunderten.»

Um dieses grosse Ziel zu erreichen, gab es nur zwei Wege: die Mechanisierung der Bohrarbeit und die Entwicklung und den Einsatz stärkerer Sprengmittel.



Bild 10: Germain Sommeiller.

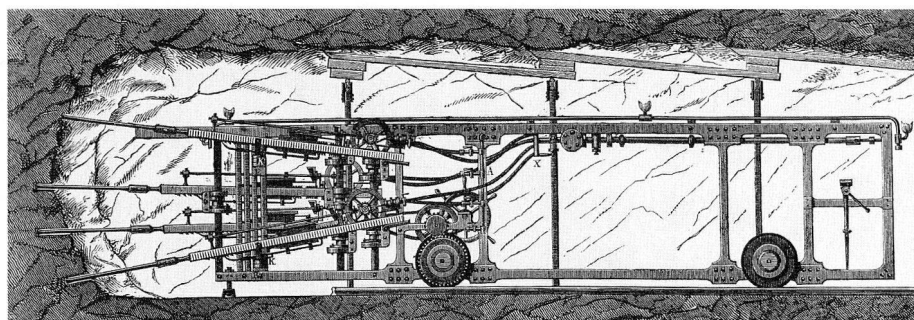


Bild 11: Vortrieb mit Bohrmaschinen von Sommeiller.

Mechanisierung der Bohrarbeit

Die Mechanisierung der Bohrarbeit war ein schwieriges Unterfangen, da sie Energieformen und Maschinen erforderte, die nur mit den Maschinenbauern, den Potenzen einer Maschinenbauindustrie und den Erfahrungen und theoretischen Kenntnissen der Maschineningenieure erfolgreich zu entwickeln waren. Auf dieser Basis fanden von 1855 bis zum Anfang der 1870er Jahre grundlegende Arbeiten für einen Umbruch in der Technologie der Vortriebsarbeiten statt. Beim Mont-Cenis-Tunnel führte ein glücklicher Umstand dazu, dass zwei erfindungsreiche Ingenieure erfolgreich zusammenarbeiteten: Prof. Colladon aus Genf, der mit seinen eingehenden Studien über «gepresste Luft», also Druckluft, die Verwendung von pneumatischen Bohrmaschinen erst möglich gemacht hat, und Germain Sommeiller (Bild 10).

Sommeiller entwickelte eine stossend arbeitende Grossbohrmaschine, die mit Druckluftenergie betrieben wurde. 1861 wurden diese Maschinen auf der italienischen Seite eingesetzt, vorher war der Vortrieb schon über vier Jahre mit Handbohrung vorgenommen worden. 1863 erfolgte der Einsatz auf der französischen Seite, also sechs Jahre nach Beginn der Vortriebsarbeiten (Bild 11). Bis zu neun Bohrmaschinen waren auf einem Wagen montiert. Das Gerät wog 12t und wurde von 40 Mann bedient. Die gesamte Bohrmannschaft bestand aus 60 Personen, einschliesslich 10 Kindern, die zum Schmieren der beweglichen Teile eingeteilt waren. Die Bohrungen hatten eine Tiefe von 80 bis 90cm. Der Vortrieb pro Tag belief sich nunmehr auf 90cm; mit Handbohrung waren bisher nur 23cm Vortrieb möglich gewesen. Durch den Einsatz dieser Bohrmaschinen wurde somit die Vortriebsleistung fast vervierfacht.

Die Sommeiller'sche Bohrmaschine war wegen ihres grossen Gewichtes und ihrer Sperrigkeit für bergbauliche Zwecke nicht geeignet. Der Anstoss zur weiteren Entwicklung mechanisierter Bohrmaschinen war aber gegeben. Eine

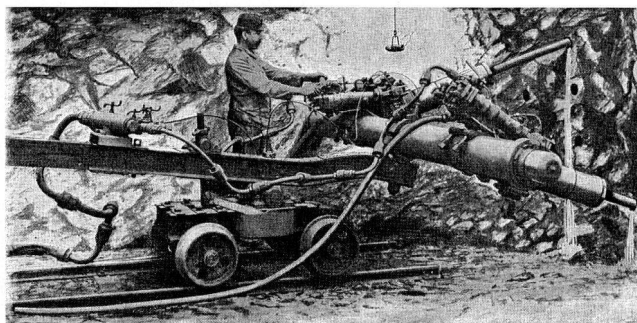


Bild 12: Bohrmaschine von Brandt.

Reihe von Maschinenfabriken kamen mit Bohrmaschinen – stossend, schlagend, drehend – auf den Markt. Von 1857 bis 1870 waren insgesamt neun unterschiedliche Bohrmaschinenkonstruktionen im Tunnelbau und im Bergbau im Einsatz. Besonders erfolgreich war die hydraulische Bohrmaschine von Brandt, die als drehend wirkende Bohrmaschine auch für hartes Gestein geeignet war und im Tunnelbau und Bergwerksbetrieb vielfach angewandt wurde (Bild 12). Eine von dem Amerikaner Burleigh entwickelte Bohrmaschine wurde 1865 beim Auffahren des Hoosac-Tunnels mit Erfolg eingesetzt (Bild 13), also 14 Jahre nach Beginn des Tunnelvortriebs mit Handbohren und Schwarzpulver. Die Burleigh'sche Maschine wurde übrigens von der Wiener Firma Mahler und Eschenbacher in ganz Europa vertrieben. Mit einer Burleigh-Maschine wurde ab 1867 der grosse Rothschönberger Stollen im sächsischen Erzgebirge weiter aufgeföhren. Es wurde gegenüber Handbohren eine sechsfache Leistung bei 50 % Kosteneinsparung nachgewiesen.

Entwicklung der brisanten Sprengstoffe

1846 wurde von dem Schweizer Schönbein in Basel ein stärkerer Sprengstoff auf der Basis von Nitrocellulose (Schliessbaumwolle) entwickelt, der sich wegen grosser Anwendungsschwierigkeiten in der Praxis aber nicht durchsetzen konnte.

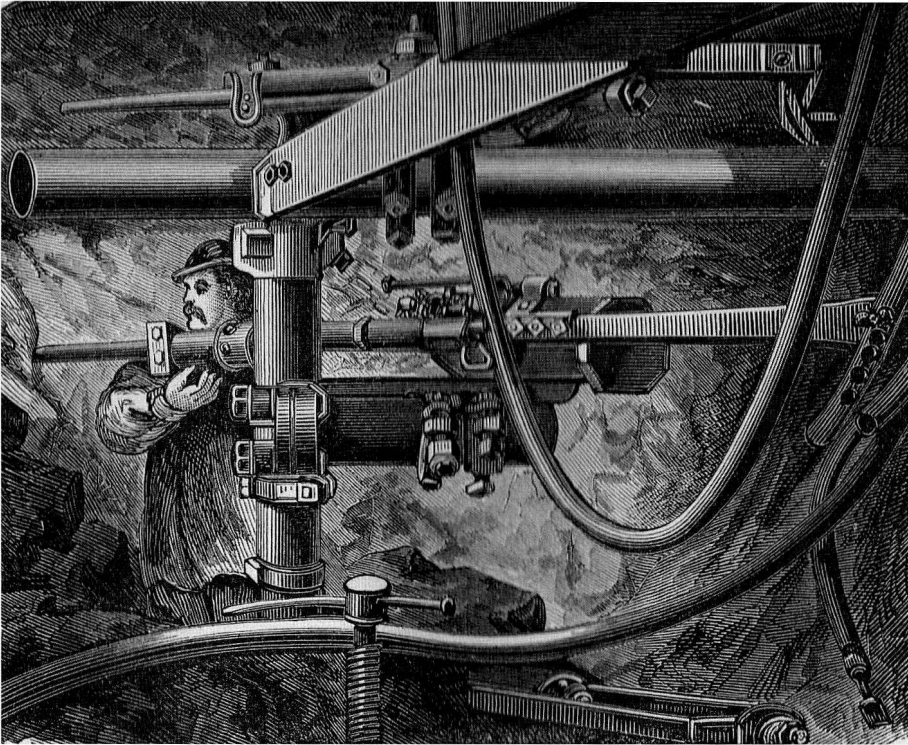


Bild 13: Burleigh-Bohrmaschine im Hoosac-Tunnel.

Im gleichen Jahr 1846 nitrierte der Chemieprofessor Sobrero in Turin erstmals Nitroglycerin, dessen grosse Sprengkraft zunächst nicht erkannt wurde. Es wurde zunächst in der Medizin verwendet – übrigens auch heute noch –, da es gefässerweiternd wirkt. Die ausserordentlich hohe Brisanz und seine Handhabungsunsicherheit in flüssigem Zustand verhinderten zunächst eine technische Verwendung in grossem Stil, zumindest in Europa. Ständige Explosionen zeigten die Unzulänglichkeit dieses auch als Sprengöl bezeichneten Stoffes auf und führten sogar in einigen Ländern zum Verbot der Anwendung von flüssigem Nitroglycerin. So bestand schon die Gefahr einer Explosion beim Transport und bei der Handhabung. Ebenso neigte das Sprengöl dazu, in Gesteinsspalten und im Haufwerk zu versickern. Ein Anschlag mit dem Bohrer oder dem Werkzeug löste dann oft ungewollte Explosionen aus.

Der Hoosac-Tunnel in Massachusetts allerdings war die erste und auch später noch die einzige Tunnelbaustelle, auf der ab 1865 beim Vortrieb flüssiges Nitroglycerin verwendet wurde. In diesem Tunnel traten die genannten Nachteile der Verwendung im flüssigen Zustand sichtbar auf. Explosionen und Unglücksfälle häuften sich. Während des Tunnelbaus starben 195 Arbeiter. Die meisten Toten waren auf das unsichere Nitroglycerin zurückzuführen. Die Leitung des Tunnelvortriebes blieb aber beharrlich bis zur Vollen- dung des Tunnels im Jahre 1875 bei der Anwendung des

flüssigen Nitroglycerins, obwohl Alfred Nobel ab 1865 das handhabbare Dynamit auf den Markt gebracht hatte.

Ab 1863 hatte Alfred Nobel, der Nitroglycerin fabrikmässig erzeugte, Erfolge bei der praktischen Anwendung. Nobel glückte es, einen günstigen Trägerstoff für das Nitroglycerin in Kieselgur zu finden. Jetzt lag ein Sprengstoff in fester Form mit hoher Brisanz vor, der auch den unter- täglichen Anforderungen entsprach. Nobel erhielt 1865 das Patent auf den neuen Sprengstoff und nannte ihn Dynamit. Mit dem Nitrosprengstoff trat ein völlig neuer Sprengstofftyp in Erscheinung. Bei seiner Umsetzung entwickelt sich neben dem Gasdruck, durch den allein Schwarzpulver wirkt, ein Detonationsdruck, der eine zusätzliche und sehr starke Sprengwirkung auf das Sprengobjekt ausübt.

Tabelle 1: Arbeitseffekte beim Lösen des Gesteins im Tunnelbau

Arbeitsweise	Explosivstoff	Arbeitseffekt	
			Mittel
Handbohrung	Schwarzpulver	0,5–1,0	1,0
Handbohrung	Dynamit	7,5–11,5	9,0
Maschinenbohrung	Dynamit	29–76	40,0

$$\text{Arbeitseffekt} = \frac{\text{Vortriebsvolumen} \times \text{Sprengmittelmenge}}{\text{Mann und Schicht}}$$

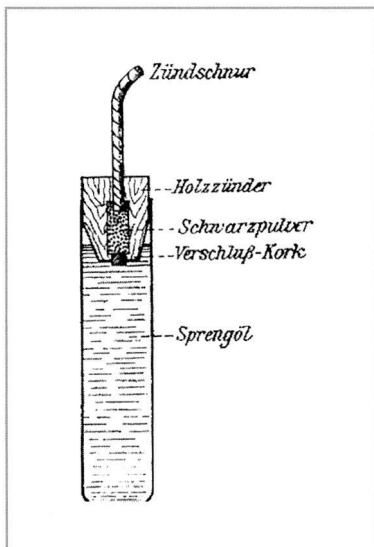


Bild 14: Nobels erster Patentzünder 1867.

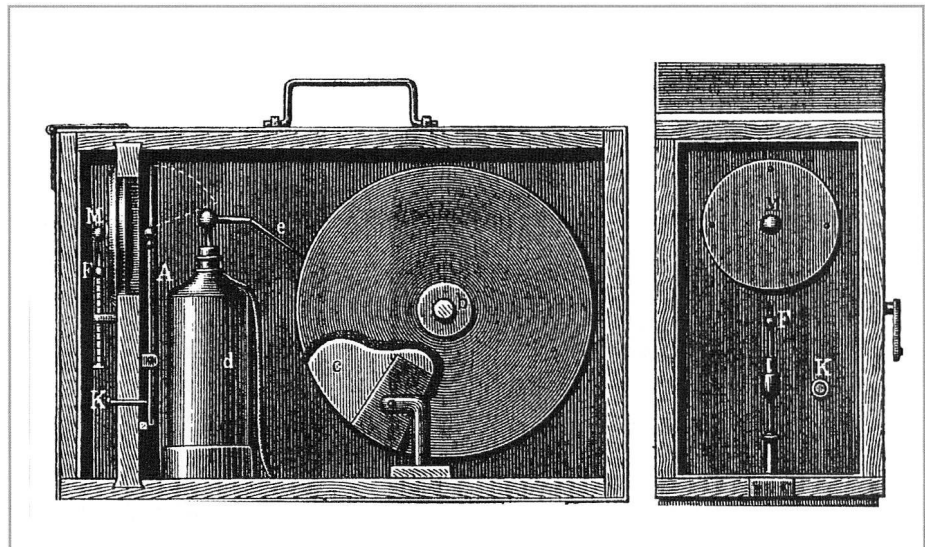


Bild 15: Zündmaschine der Aktiengesellschaft Dynamit Nobel Wien 1873.

Mit dem Dynamit gelang eine wirksame Steigerung der Arbeitsproduktivität und der Vortriebsleistung im Tunnelbau. Die Einsparung an Bohrarbeit betrug nach einschlägigen Untersuchungen etwa 23–33 %. Der Arbeitseffekt gegenüber dem Schwarzpulver und unveränderter Handbohrarbeit betrug rund das Vierzigfache (Tabelle 1).

Die Erfindung des Nitroglycerins und die Handhabbarkeit dieses Sprengstoffes für die Praxis durch Nobel war eine epochemachende Basisinnovation. Nitroglycerin (Dynamit) besitzt einen hohen Erstarrungspunkt und wurde bei tiefen Temperaturen, wie sie beim alpinen Tunnelbau im Winter auftraten, hart. Die Patronen mussten dann auf Öfen aufgetaut werden, was häufig zu Unfällen führte. Alfred Nobel hat das Dynamit stetig verbessert. Heute besteht Dynamit aus 65 % gelatiniertem Nitroglyzerin, 27 % Natriumsalpeter und 8 % Holzmehl. Der Erstarrungspunkt wird heute durch Zugabe von Nitroglykol herabgesetzt, sodass Dynamit auch bei tiefen Temperaturen verwendbar ist.

Um brisante Sprengstoffe zur Detonation zu bringen, bedarf es eines sogenannten Initialimpulses. Alfred Nobel hatte sich mit dem Problem der Initiierung von Sprengladungen beim Dynamit befasst und erfand den Sprengzünder, später auch als Sprengkapsel bezeichnet (Bild 14). Mit ihm gelangen die Einleitung der Detonation und die problemlose Verwendung des neuen Sprengstoffes. Die Erfindung der Sprengkapsel gilt heute in Fachkreisen als die bedeutendste Erfindung Nobels, noch vor dem Dynamit.

Mit der Einführung des Dynamits erfuhren die Versuche, Sprengladungen elektrisch zu zünden, neuen Auftrieb. Franz Rziha sagte der elektrischen Zündung voraus,

«... dass ihr beim Tunnelbau eine Verbreitung in der Zukunft unfehlbar bevorsteht, denn die mit ihr verknüpften

Ergebnisse sind von so grosser, Tragweite, dass man sie für die Folge nicht unausgenützt lassen kann.»

In der Tat wurden sehr bald zuverlässige Zündmaschinen entwickelt, mit denen die Sprengladungen aus sicherer Entfernung und zuverlässig gezündet werden konnten (Bild 15).

Entwicklung des klassischen Tunnelbaus im 19. Jahrhundert – Resümee

Die erfolgreiche Entwicklung der Technologie im Tunnelbau ab den 1860er Jahren beruhte auf den genannten Basisinnovationen:

- Mechanisierung der Herstellung von Sprengbohrlöchern durch Bohrmaschinen und
- Entwicklung brisanter Sprengstoffe (Dynamit)
Beim Mont-Cenis-Tunnel verbesserte sich die Vortriebsleistung durch den Maschineneinsatz wie folgt:
- Handbohrung: 0,23 m/Tag
- Maschinenbohrung: 1,04 m/Tag, Mittel: 0,66/Tag

Als im Sommer 1864 von Sommeiller weiterentwickelte Bohrmaschinen eingesetzt wurden, stieg die Vortriebsleistung erneut an. 1870, im letzten Vortriebsjahr, wurden auf der südlichen Seite 889 m und auf der nördlichen Seite 746 m aufgeföhren. Die beste Tagesleistung erreichte 4,5 m.

Der erfolgreiche Einsatz von Bohrmaschinen im Mont-Cenis-Tunnel war ein Meilenstein im Tunnelbau. 25 Jahre Bauzeit waren für den Mont-Cenis-Tunnel in Aussicht genommen. Die im Jahre 1861, vier Jahre nach Beginn der Tunnelarbeit auf der italienischen Seite und 1863, also sechs Jahre nach Beginn auch auf der französischen Seite

eingeführten Bohrmaschinen kürzten diese Zeit auf vierzehn Jahre ab. Elf Jahre Bauzeit waren erspart worden. Der Erfolg im Mont-Cenis-Tunnel löste weltweite Euphorie aus, sogar eine neue Zeche im Ruhrgebiet wurde «Mont-Cenis» genannt.

Die Fortschritte im Tunnelbau in technischer Hinsicht, aber auch in der Organisation, in der Planung und Kostenkalkulation führten zu weiteren Tunnelvorhaben grosser Länge mit zum Teil sehr schwierigen Auffahrbedingungen. Während im Mont-Cenis-Tunnel noch mit Schwarzpulver gesprengt wurde, sind in der Folgezeit die grossen Alpentunnel mit weiter verbesserten Bohrmaschinen und unter Einsatz von Dynamit aufgeföhren worden. Die Tabelle zeigt den Fortschritt (Tabelle 2).

Durch die grossen Alpentunnel wurde der Tunnelbau als Teilgebiet des allgemeinen Ingenieurbaus fest etabliert. Die wissenschaftlichen Grundlagen waren gelegt. Franz Rziha begründete den wissenschaftlichen Tunnelbau und befreite ihn von der Empirie, die den grossen Tunnelvorhaben schon lange nicht mehr genügte. An vielen Hochschulen wurde Tunnelbau gelehrt. Das Studium des Eisenbahnwesens umfasste auch die Grundlagen des Tunnelbaus.

Der moderne Tunnelbau – Strassentunnel im 20. Jahrhundert

Um die Jahrhundertwende war der Ausbau des europäischen wie auch des nordamerikanischen Eisenbahnnetzes im Wesentlichen abgeschlossen. Die grossen Tunnelbauten durch die Alpen waren ebenfalls fertiggestellt. Lediglich in der Schweiz wurde noch bis 1922 die zweite Röhre des Simplontunnels aufgeföhren. Es kam mehr oder weniger zu einem Stillstand im Eisenbahnbau, wobei schon in den 1930er Jahren und verstärkt nach 1945 sogar eine Schrumpfung einsetzte. Tunnels wurden nicht mehr gebaut. Tunnelbau wurde an den Technischen Hochschulen nur nebensächlich im Fach Eisenbahnwesen behandelt. Das Fach beschäftigte sich schwerpunktmässig mit den Trassen und dem Bahnbetrieb. Der Altvater des Tunnelbaus Franz Rziha

war in Vergessenheit geraten. Diese Periode des Stillstandes im Tunnelbau wurde nach dem Zweiten Weltkrieg nach rund 50 Jahren beendet. Der steigende Kraftfahrzeugverkehr forderte neue und moderne Verkehrswege. Für einen zügigen Kraftfahrzeugverkehr waren Bau und Einrichtung neuer Strassentunnel notwendig. Die Alpen waren dabei wie 100 Jahre zuvor das Haupthindernis. Tunnelbau wurde wieder, auch für Lehre und Wissenschaft, interessant. Es war aber deutlich, dass die klassischen Methoden des 19. Jahrhunderts nicht mehr in der gleichen Form anwendbar waren und neue Verfahren entwickelt und eingesetzt werden mussten. Es begann eine neue Ära, die technische und wirtschaftliche Aspekte mit neuen Erkenntnissen der Naturwissenschaften und der Technik verband. So entstand nach dem Zweiten Weltkrieg eine spannende Entwicklung zu modernen leistungsfähigen Aufföhren von Tunneln, die bis in die heutige Zeit anhält.

Aus der Vielzahl und Fülle der Neuerungen gegenüber dem klassischen Tunnelbau möchte ich nur einige mir besonders bemerkenswerte Innovationen herausstellen.

Ausbruchverfahren bei grossen Querschnitten

Im modernen Tunnelbau wird bei Querschnitten bis 100 m² das Vollausbuchverfahren angewandt (Bild 16). Ein weiteres Verfahren ist der Kalottenausbruch und/oder einem Firststollen und Sohlenstrossen. Bei ungünstigen Gebirgsverhältnissen wendet man das Verfahren mit Firststollen, Seitenstrossen und Sohlenstrossen an. Bei aussergewöhnlich grossen Querschnitten greift man vielfach auf einen doppelten Strossenbau zurück. Die Entscheidung über das zweckmässigste Verfahren hängt in der Regel ab von der Standzeit des anstehenden Gebirges, von der Querschnittsgrösse und Querschnittsform sowie evtl. vom Zeitbedarf für das Tragen einer vorübergehenden Sicherung.

Auch die Profile der modernen Tunnels unterscheiden sich von denen des klassischen Tunnels des 19. Jahrhunderts entsprechend den Fortschritten und Erkenntnissen der Gebirgsmechanik (Bild 17).

Tabelle 2: Fortschritte im Tunnelbau

Tunnel	Gesamtlänge m	Bauzeit	Querschnitt m ²	Arbeitsweise	Vortrieb		Explosionsstoff	Mittlere Zeiten des Vortriebszyklus	Kosten/m Tunnel CHF/m
					m/d	Mittel			
Mont-Cenis	12820	1857–1871	7,5	Handbohrung Stossbohrung	0,23 1,04		Schwarzpulver	12 h 13 min	5400.–
Gotthard	14900	1873–1880	6,4	Stossbohrung	6,02		Dynamit	8 h 10 min	3910.–
Simplon	19770	1880–1906	6,5	Stoss- und Drehbohrung	10,41		Dynamit	5 h 40 min	3365.–
Lötschberg	14535	1906–1912	6,2	Perkussion- bohrmaschine	12,71		Dynamit	4 h 43 min	3459.–

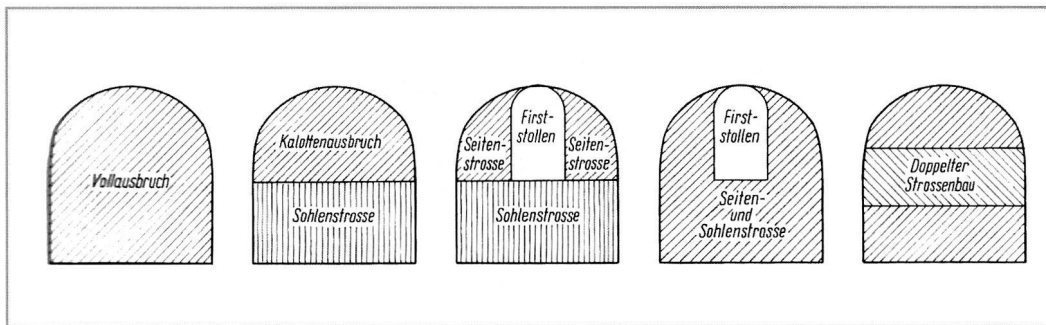


Bild 16: Verfahren beim Auffahren grosser Querschnitte.

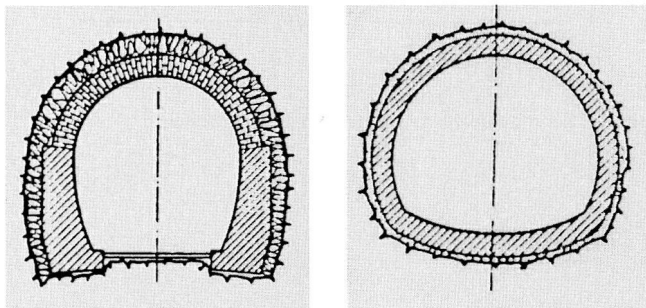


Bild 17: Altes und neues Tunnelprofil.

Die Neue Österreichische Tunnelbauweise

Durch die Entwicklung der sogenannten «Neuen Österreichischen Tunnelbauweise» wurde ein wichtiger Fortschritt im Tunnelbau geleistet, die v. Rabcewicz im Grundprinzip entwickelt hat und die man als eine Basisinnovation bezeichnen kann. Die Neue Österreichische Tunnelbauweise (NÖT) ist eigentlich keine Tunnelbauweise im Sinne festgelegter Arbeitsvorgänge beim Ausbruch des Tunnels, sondern eher eine Methode, die im Zusammenspiel von felsmechanischen Messungen, von Bau- und Betriebsweise des Ausbruchs und der Sicherung sowie von Querschnitt- und Ausbaup Optimierung zu verstehen ist. Das Hauptaugenmerk dieser Gebirgsbehandlungs- und Ausbaugrundsätze ist auf das Mittragen und die Schonung des Gebirges ausgerichtet, wobei sich nach der Theorie als Schutzzone ein Tragring um den Hohlraum ausbilden soll.

Die Neue Österreichische Tunnelbauweise erfüllt damit in gewisser Weise die Forderungen von Franz Rzhia aus dem Jahre 1867, der sich damals schon folgendermassen geäussert hatte:

«Die Kunst des Ingenieurs ist, grossen Gebirgsdruck fernzuhalten, das heisst nicht entstehen zu lassen; eine weit grössere Kunst als jene, einmal vorhandenen Gebirgsdruck zu bewältigen. Und möchten wir das erste mit geistiger, das letzte mit roher materieller Arbeit zu vergleichen wagen.»

Die bei der NÖT verwendeten Sicherungsmassnahmen und -mittel bestehen zum Beispiel aus Spritzbeton mit Stahlbögen, Baustahlmatten und in der Verwendung von Felsankern als sogenannte Systemanker, welche vor allem in gebräuchlichem und nachbrüchigem Gestein im Rahmen der Ringschlusszeit kombiniert werden. Die Bemessung der Ankerlängen, Ankerdichte und Spritzbetonarmierung erfolgt weitgehend aufgrund der beobachteten Verformungen. Konvergenzmessungen sind hier bei Anwendung der NÖT notwendig. Die Neue Österreichische Tunnelbauweise wird heute weltweit angewandt und ist Standard im Tunnelbau geworden.

Verbesserungen in der Bohrtechnik

Die Einführung von Hartmetallmeisseln sowie von Stiftbohrköpfen haben in Verbindung mit lafettengeführten Hydraulik-Bohrhämmer Bohrerschwindigkeiten bis 4 m/min ermöglicht. Bild 18 verdeutlicht die Leistungsentwicklung der Bohrhämmer am Beispiel der Fa. Atlas Copco in den letzten 100 Jahren. Der Sprung von 3 bis 5 m/h um 1900 bis rund 450 m/h im Jahre 2003 zeigt, welche eindrucksvolle technische Entwicklung die Bohrtechnik genommen hat.

Die Steuerung der Bohrmaschinen mit Hilfe der Elektronik ist heute Stand der Technik. Ansatzpunkt, Richtung und Länge der Sprengbohrlöcher werden in immer stärkerem Masse durch programmierbare Computersysteme festgelegt, was die Sprengarbeit sicherer und effektvoller macht.

Neue Sprengstoffe und Zündverfahren

Die brisanten gelatinösen Sprengstoffe, die seit Alfred Nobel verwendet werden, sind zwar heute noch am weitesten verbreitet, doch werden sie langsam von neueren Sprengstofftypen verdrängt. Es sind dies ANFO-Sprengstoffe auf Basis von Ammoniumnitrat, Sprengschlämme, sogenannte Slurries, sowie Emulsionssprengstoffe. Die drei letzteren können im Gegensatz zu den nur in Patronenform

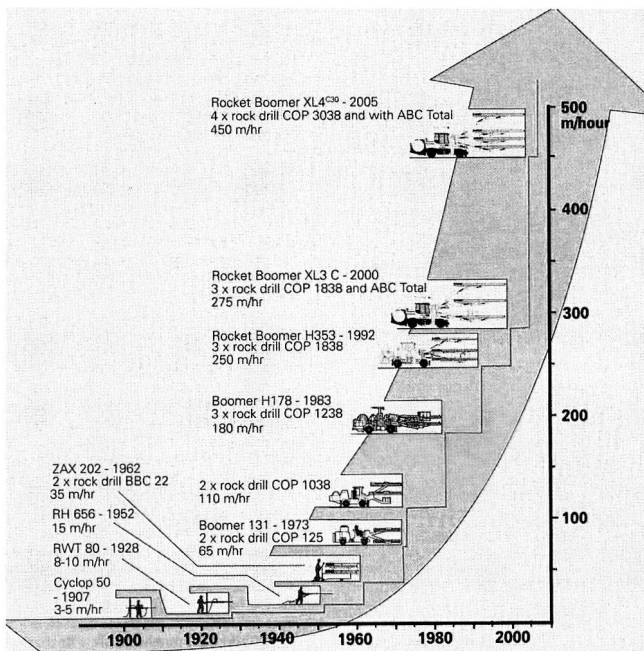


Bild 18: Leistungsentwicklung der Bohrarbeit (Atlas Copco).

vorliegenden gelatinösen Sprengstoffen in die Sprengbohrlöcher eingeblasen oder gepumpt werden, was einen grossen zeitlichen Vorteil für den gesamten Arbeitsablauf im Tunnelvortrieb mit sich bringt.

Seit Mitte der 1970er Jahre sind nichtelektrische Zünder auf dem Markt. Bei den elektrischen Zündern ist als Neuentwicklung etwa ab 1986 der elektronische Zünder entwickelt worden. Das bei den normalen Zündern übliche pyrotechnische Verzögerungselement ist hierbei durch einen integrierten Schaltkreis – einen Mikrochip – ersetzt worden, der eine bisher unerreichte Zündgenauigkeit von einer Tausendstelsekunde aufweist.

Neue Sprengverfahren

Bei den Sprengverfahren hat es erhebliche Fortschritte gegeben, zum Beispiel durch die heute fast allgemeine Verwendung des Profilsprengens. Hierbei werden im Aussenkranz des Tunnelprofils Bohrlöcher in geringerem Abstand und mit schwächeren Ladungen angesetzt, wodurch ein mehr oder weniger glattes Ausbruchprofil erzeugt wird. Wegen dieser günstigen Auswirkung auf das Profil und auch wegen geringerer Erschütterungen wird das Verfahren auch als bergschonendes Sprengen bezeichnet.

Erwähnt sei noch die zunehmende Verwendung grosskalibriger Patronen von 40mm Durchmesser bei gelatinösen Sprengstoffen, was zu einer generellen Verringerung der Bohrlochzahl im Ausbruchquerschnitt führt. Bild 19 zeigt die Bohrlochordnung eines Tunnelvortriebs mit 40-mm-

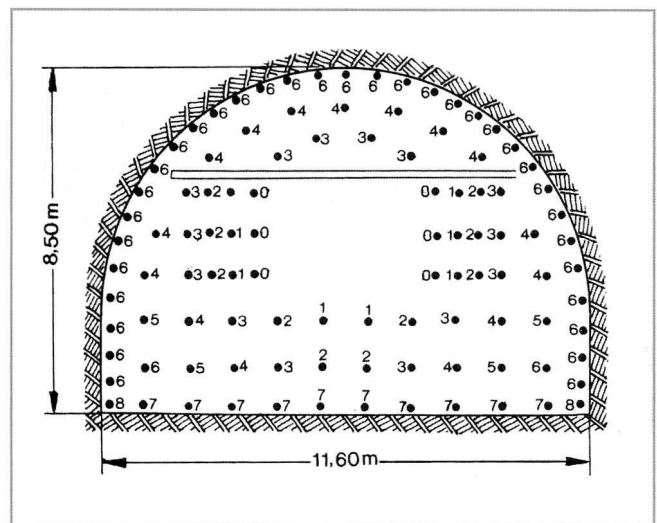


Bild 19: Sprengbild: 40-mm-Patronen, Profilsprengen.

Patronen und Profilsprengen bei einem Ausbruchquerschnitt von 92 m². Die äusseren Profilbohrlöcher werden mit einer einzigen Zeitstufe gezündet.

Entwicklung der Lade- und Fördertechnik

Die Entwicklung leistungsstarker Lade- und Fördergeräte, die früher gleisgebunden waren, hat durch die Gleislostech-nik eine neue Dimension erfahren. Der Ladevorgang des gesprengten Haufwerks erfolgt heute zum grossen Teil in Form dieselgetriebener leistungsstarker Fahrzeuge. Beladen wird meistens mit gummibereiften Knickladern mit grossem Schaufelvolumen, zum Teil sogar mit Löffelbaggern. Der Abraumtransport erfolgt hauptsächlich mit dieselbetrie-benen Muldenkippern mit einer Nutzlast bis 25 Tonnen (Bild 20). Bei langen Tunneln werden häufig auch hinter der Ortsbrust Zwischendeponien angelegt. Von diesen bringen die Muldenkipper das Ausbruchmaterial zur Enddeponie.

Mechanisierung der Vortriebstechnik im Tunnelbau

Über die den modernen Tunnelbau stark prägende maschi-nelle Vortriebstechnik möchte ich nur einige kurze Worte verlieren. Seit den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts wird der maschinelle Vortrieb im zunehmenden Masse angewandt. Man unterscheidet zwischen Teilschnitt- und Vollschnittmaschinen. Letztere bearbeiten gleichzeitig die gesamte Ortsbrust. Als Schneidwerkzeuge werden Rollen-meissel eingesetzt, die das Gestein durch Druck zerstören.

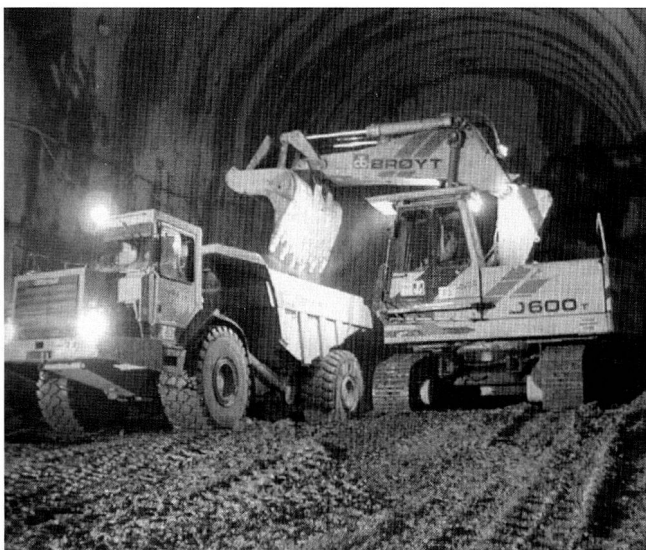


Bild 20: Laden des Haufwerks auf Muldenkipper.

Das Bohrgut wird im Bohrkopf von Speichern aufgefangen und durch Öffnungen auf die Fördermittel (Bandförderer, Kettenförderer), die im Nachläufer installiert sind, übergeben.

Im Laufe der letzten zehn Jahre sind die Durchmesser der Vollschnittmaschinen stark angestiegen; sie betragen heute schon bis über 13 m (Bild 21). Derartige teure Maschinen bedürfen einer grossen Auffahrlänge, um wirtschaftlich zu sein, was bei grossen Tunnelbauprojekten meist der Fall ist. Bei sehr festem Gestein wird jedoch auf den anpassungsfähigen Sprengvortrieb zurückgegriffen.

Darüber hinaus gibt es auch erfolgreiche Kombinationen von Maschinen- und Sprengvortrieb. Bild 22 zeigt am Beispiel des Pfändertunnels bei Bregenz/Österreich eine derartige Kombination, wo mit einer kleinen Vollschnittmaschine von 3,6 m Durchmesser ein Pilotstollen vorgetrieben und später das restliche Profil nachgesprengt wurde, wobei die gebohrte Röhre als Einbruch diente.

Tunnelbau als Wissenschaft

Mein Thema lautet: «Tunnelbau – Von der Empirie zur Wissenschaft». Wie steht es heute mit dem Tunnelbau als Wissenschaft?

Der Tunnelbau ist seit Langem ein eigenständiges Gebiet geworden, das etwa zwischen Bauingenieurwesen und Bergbauwissenschaften angesiedelt ist. Es gibt an den Technischen Hochschulen vereinzelt Lehrstühle für Tunnelbau – meist in Verbindung mit dem Bauwesen – oder zumindest Lehrbeauftragte für Tunnelbau. Zahlreiche Publikationen befassen sich mit Fragen des Tunnelbaus. Weltweit werden Erfahrungen ausgetauscht mit eigenen

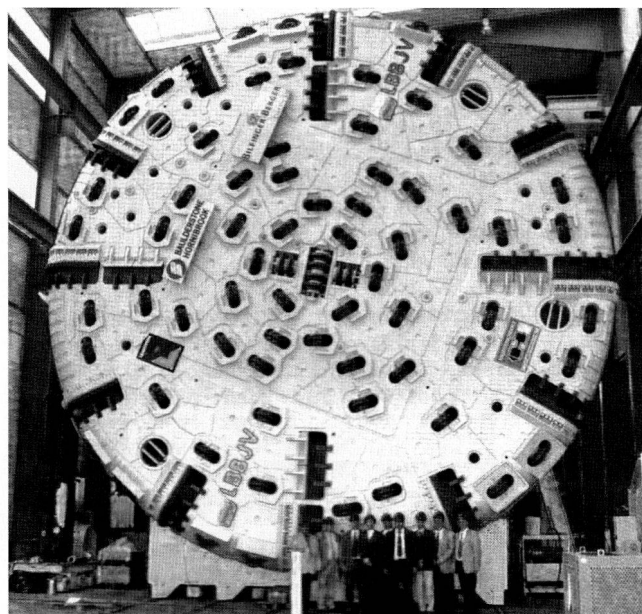


Bild 21: Vollschnittmaschine der Fa. Herrenknecht, 13,2 m Durchmesser.

Zeitschriften und Journalen für Tunnelbau in den verschiedensten Ländern. Es gibt Tunnelbaukongresse, sogar einen Welttunnelbaukongress, Symposien und weitere adäquate Veranstaltungen. Hier in der Schweiz werden regelmässig Symposien vom Verband Schweizer Sprengfachleute (VSSF) und der Vereinigung der Schweizer Sprengbefugten (VSB) ausgerichtet, die sich auch mit Fragen der Vortriebstechnik im Tunnelbau beschäftigen.

Längst ist das Gebiet des eigentlichen Tunnelbaus erweitert um Wasserstollen, Kavernen, Rohrvortrieb, Mikrotunneling und anderen. Für diese Varianten hat sich der Begriff «Spezialtiefbau» eingeführt. Nicht zu vergessen ist, dass das Herstellen von Tunneln eine Industrie hervorgeufen hat, die Milliardenumsätze macht. Der Konkurrenzkampf der Tunnelbauunternehmen ist gross. Wie immer in solchen Situationen versucht man an der Spitze des Fortschritts zu stehen. Es geht dabei auch stets um neue Entwicklungen und Innovationen mit dem Ziel einer Kostenminimierung und Produktivitätssteigerung. Wissenschaftliche Institute, Maschinenfabriken, Zulieferfirmen wie auch Beratungs- und Planungsbüros für alle Bereiche des Tunnelbaus gibt es zuhauf.

Franz Rziha, der Begründer der Tunnelbauwissenschaft, würde sich heute verwundert und wohl auch erfreut die Augen reiben, wenn er sehen könnte, was aus seiner Lehre und seinen Anregungen geworden ist. Im Jahr 2007 waren es genau 140 Jahre, dass sein «Lehrbuch der Gesamten Tunnelbaukunst» erschienen ist. Aus der Tunnelbaukunst ist längst Tunnelbauwissenschaft geworden. Ich hatte schon

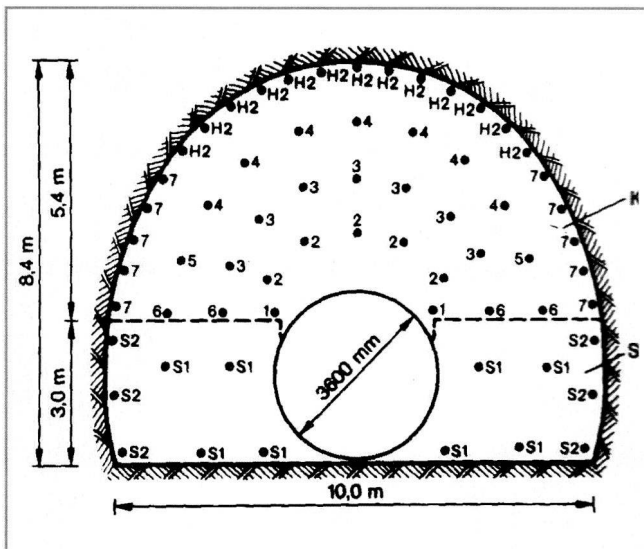


Bild 22: Kombiniertes Spreng- und Maschinenvortrieb.

darauf hingewiesen, dass die Entwicklung des Tunnelbaus mit seinen Auswirkungen, seinen Fortschritten und seinen grossen Erfolgen spannend ist, und sie wird nach meiner Überzeugung auch in der Zukunft spannend bleiben.

Literatur

- Andraee, C.: Der Bau langer tiefliegender Gebirgstunnel, Berlin 1926.
- Brem, G. und J. Gattermann: Weiterentwicklung der Bohr- und Sprengtechnik im Tunnelbau. Nobel Hefte 72 (2006), S. 19–24.
- Fliegner, E.: Baubetriebsplanung von Stollen- und Tunnelbauten. In: Taschenbuch für den Tunnelbau 1983, Verlag Glückauf, S. 189–192.
- John, M.: Die Vortriebsarbeiten für den Pfändertunnel. Nobelhefte 44 (1982) S. 132–144.
- Kraft, M.: Über Arbeitseffekte am Gestein. Berg- und Hüttenmännische Monatshefte (BHM) 29, Wien 1881, S. 221–326.
- Mahler J.: Die moderne Sprengtechnik, Wien 1873.
- Mowbray, G. M.: Tri-Nitro-Glycerin as applied in the Hoosac Tunnel, New York 1874.
- Müller, L.: Der Felsbau – Tunnelbau. 1. Aufl., Bd. 3, Stuttgart 1978.
- Prinz, J.: Bohren und Sprengen beim Vortrieb von Strecken und Tunnels. Nobel Hefte 59 (1993), S. 62–75.
- v. Rabcewicz, L. und F. Pacher: Die Elemente der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise und ihre geschichtliche Entwicklung. In: Österreichische Ingenieurzeitschrift 1975, S. 315.

- Rziha, E.: Über die Theorie der bergmännischen Sprengarbeit. In: Berg- und Hüttenmännisches Jahrbuch (BHJb) 16, Wien 1867, S. 1–162.
- Rziha, F.: Lehrbuch der Gesamten Tunnelbaukunst, Band 1, Berlin 1867, Band 2, Berlin 1872.
- Sauer, G.: Theorie und Praxis der NÖT. In: Tunnel 4 (1986), S. 280.
- Seeber, G. und A. Vigl: Die Neue Österreichische Tunnelbaumethode und der mechanische Vortrieb mit Tunnelbohrmaschinen. In: Felsbau 6 (1988), S. 63.
- Wennmohs, K.-H.: Neu entwickelte Hydraulikbohrhämmer für das Kleinkaliberbohren mit einer Schlagleistung von 30 kW. In: Glückauf 143 (2007), S. 40–45.
- Wild, H.W.: Die Bedeutung des optimalen Bohrloch- und Patronendurchmessers für die Sprengarbeit. In: Glückauf 109 (1973), S. 119–201.
- Wild, H.W.: Sprengtechnik im Bergbau, Tunnel- und Stollenbau sowie in Tagebauen und Steinbrüchen, Essen, 1984.
- Wild, H.W.: Sprengvortrieb und maschineller Vortrieb – Anwendungsbereiche und Grenzen. In: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte (BHM) 131 (1986), S. 41–53.
- Wild, H.W.: Profilgenaues und schonendes Sprengen im Tunnel- und im Streckenvortrieb. In: Glückauf 124 (1988), S. 301–307.
- Wild, H.W.: Sprengstoffe und Zündmittel im Tunnelbau. In: Taschenbuch für den Tunnelbau, 1990, S. 185/207.
- Wild, H.W.: Anfänge und Entwicklung der bergmännischen Bohr- und Sprengtechnik. Leobener Grüne Hefte, Neue Folge, Heft 10, 1992, S. 77–102.
- Wild, H.W.: Elektrische und nichtelektrische Zündsysteme. In: Glückauf 130 (1994), S. 381–387.
- Wild, H.W.: und W.G. Kramer: Die Entwicklung des Zündens von Schwarzpulverladungen von den Anfängen bis zur Erfindung der brisanten Sprengstoffe. In: Bergbau 40 (1995), S. 456–462.
- Wild, H.W.: Roadheading under geomechanically difficult conditions, and measures for strata control. In: Mechanik of Jointed and Faulted Rock, Rotterdam 1995, S. 813–816.
- Wisner, A.: Die volkswirtschaftliche Seite des Bergbaues in Österreich. In: Bericht über die erste allgemeine Versammlung von Berg- und Hüttenmännern zu Wien. Wien 1859, S. 147–154.