

3. Auflage



# Bauprozesse und Bauverfahren des Tunnelbaus



Gerhard Girmscheid



**Gerhard Girmscheid**

**BAUPROZESSE  
UND BAUVERFAHREN  
DES TUNNELBAUS**



**3. Auflage**

---

# **BAUPROZESSE UND BAUVERFAHREN DES TUNNELBAUS**

---

**Gerhard Girmscheid**

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid  
ETH Zürich  
IBI – Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement  
Wolfgang-Pauli-Str. 15  
8093 Zürich  
Switzerland

Titelbild:

Oberes Bild: Streckenausbaumaschine für den Sprengvortrieb des Gotthard-Basistunnels beim Zwischenangriff Sedrun  
(Quelle: Rowa Tunnelling Logistics AG und GTA Maschinensysteme GmbH)

Unteres Bild: Einfachschild-Tunnelbohrmaschine S-139 des Zimmerberg-Basistunnels (Quelle: Herrenknecht AG)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;  
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2013 Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG,  
Rotherstraße 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publisher.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, daß diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Umschlaggestaltung: Sonja Frank grafikdesign  
Satz: TypoDesign Hecker GmbH  
Druck: Strauss GmbH  
Bindung: Strauss GmbH

3. überarbeitete und erweiterte Auflage

**Print ISBN:** 978-3-433-03047-9

**ePDF ISBN:** 978-3-433-60313-0

**ePub ISBN:** 978-3-433-60315-4

**eMob ISBN:** 978-3-433-60314-7

**oBook ISBN:** 978-3-433-60312-3

*Meiner Tochter Gérardine gewidmet*





# Vorwort

Die vorliegende dritte Auflage wurde durch wesentliche Praxisbeispiele zur Planung von Tunnelvortrieben ergänzt. Ferner wurden die Kapitel Sprengvortrieb, TBM-Vortrieb im Fels sowie Schildvortrieb im Lockergestein wesentlich ergänzt. Ferner wurden neueste Erkenntnisse für die Tunnellogistik und Industrialisierung der konventionellen Vortriebe eingefügt. Dadurch ist das Buch dieses Buch über den Baubetrieb des Tunnelbaus auf dem letzten Stand der internationalen Baukunst. Sowohl für Studenten im Vertiefungsbereich Tunnelbau als auch für Praktiker in Ingenieurbüros und Bauunternehmen steht ein Werk bereit, das einerseits das baubetriebliche Grundwissen über die verschiedenen modernen Verfahren des Tunnelbaus und der Logistik vermittelt sowie andererseits auch die praktische Umsetzung dieses Wissens an Beispielen aufzeigt.

Eine übersichtliche Gliederung und ausführliche Darstellung der einzelnen Themenbereiche sollen dem Leser ein rasches, gezieltes Auffinden bestimmter Einzelaspekte ermöglichen. Hauptanliegen ist jedoch, das Buch als umfangreiches Grundlagen- und Nachschlagewerk nutzen zu können.

Systematisch wird der Nutzer von den geologischen, hydrologischen und petrographischen Gegebenheiten und den daraus abgeleiteten Gefährdungsbildern zu den spezifischen Bauverfahren des Vortriebs, der Sicherungstechnik und des Ausbaus geführt. Besonderer Wert liegt dabei auf der Beziehung Ursache – Wirkung – Lösung. Es wird versucht, den Baubetrieb und die Bauverfahren interaktiv in die Nachbardisziplinen wie Geologie, Geotechnik, Maschinenbau und Materialtechnologie einzubinden und deren interdisziplinäres Zusammenwirken zur Lösung komplexer Bauaufgaben aufzuzeigen. Dazu wurden neben praktischen Erfahrungen auch die neusten Veröffentlichungen berücksichtigt.

Nichts ist perfekt – konstruktive Anregungen zur Weiterentwicklung nehme ich sehr gern entgegen.

Bedanken möchte ich mich bei den Tunnelbauunternehmen, Ingenieurbüros, Maschinenherstellern und Baustoffunternehmen für die breite Unterstützung. Danken möchte ich ebenfalls meinen Mitarbeitern und Hilfsassistenten des Instituts für Bau- und Infrastrukturmanagement der ETH Zürich für die Herstellung von Bildern und Grafiken sowie das Korrekturlesen.

April 2013

Gerhard Girmscheid

## Haftungsausschuss

Die Angaben in diesem Buch wurden nach bestem Wissen und Gewissen erstellt, allerdings übernimmt der Autor keine Gewähr für die Aktualität, Korrektheit, Vollständigkeit oder sonstige Qualität der bereitgestellten Informationen. Haftungsansprüche gegen den Autor, die sich auf Schäden materieller oder ideeller Art beziehen, die durch die Nutzung oder Nichtnutzung fehlerhafter und/oder unvollständiger Informationen verursacht wurden, sind grundsätzlich ausgeschlossen, sofern seitens des Autors kein nachweislich vorsätzliches oder grob fahrlässiges Verschulden vorliegt.



# Kurzübersicht

1	Einleitung	1
2	Geologische Vorerkundung	5
3	Beurteilung des Gebirges / Gebirgs- und Ausbruchsklassifizierung	35
4	Untertagebauwerke und ihre Ausbrucharten	53
5	Vortriebsmethoden	67
6	Ausbruch durch Sprengvortrieb	71
7	Mechanischer Vortrieb mittels Bagger, Rippergeräten und Teilschnittmaschinen (TSM)	147
8	Sicherungsmassnahmen	171
9	Vortrieb mittels Schirmgewölbesicherungen	243
10	Transport des Ausbruchmaterials aus dem Tunnel	285
11	Temporäre Entwässerungs- und Absperrmassnahmen	301
12	Industrialisierung des konventionellen Vortriebs	349
13	Leistungsermittlung und Bauprogramm des konventionellen Vortriebs	365
14	Permanente Hauptabdichtung von Tunnelbauwerken	373
15	Hohlraumauskleidung	397
16	Arten von Tunnelvortriebsmaschinen	419
17	Tunnelbohrmaschinen (TBM)	433
18	Tunnelvortrieb mittels Hinterschneidtechnik	481
19	Wiederverwendung von Tunnelausbruchmaterial	487
20	Schildvortriebsmaschinen	495
21	Tübbingauskleidung	569
22	Steuerung von Vorschubpressenkräften und Setzungen sowie Vortriebsrichtung	587
23	Baulüftungen von Untertagebauwerken	643
24	Vorbereitung und Logistik einer Tunnelbaustelle	663
25	Sicherheitsmanagement im Untertagebau	701
26	Projektabwicklungsformen als Schlüssel zu Innovation, Risikomanagement sowie Kostenoptimierung	715
	Literaturverzeichnis	735
	Stichwortverzeichnis	747



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Geologische Vorerkundung</b>	<b>5</b>
2.1	Geologische Begriffe	5
2.2	Problem- und Störzonen im Tunnelbau	6
2.3	Phasen der Gebirgsvorerkundung	6
2.4	Bohrerkundungen	11
2.4.1	Rammsondierungen	11
2.4.2	Bohrverfahren	11
2.4.3	Planung der Ausführung der Bohrungen	16
2.5	Geophysikalische Gebirgsvorerkundung	17
2.5.1	Einsatz geophysikalischer Methoden zur Ergänzung von singulären, bodenmechanischen Aufschlüssen	17
2.5.2	Geophysikalische Verfahren und mögliche Einsatzgebiete	18
2.5.3	Seismische Verfahren von der Erdoberfläche	20
2.6	Flachwasserseismik	22
2.6.1	Baubegleitende, seismische Vorerkundung an der Ortsbrust	25
2.6.2	Bohrlochkalibrierungsverfahren	26
2.6.3	Interpretation von geophysikalischen Messergebnissen	27
2.6.4	Ausblick	27
2.7	Hydrologische Vorerkundung	27
2.8	Beschreibung der geologischen und hydrologischen Ergebnisse	30
<b>3</b>	<b>Beurteilung des Gebirges/Gebirgs- und Ausbruchklassifizierung</b>	<b>35</b>
3.1	Klassifizierungssysteme	35
3.2	Klassifizierung nach dem Phänomen des Gebirgsverhaltens	37
3.2.1	Gefährdungsbilder im Lockergestein	39
3.2.2	Gefährdungsbilder im Fels	41
3.3	Klassifizierung nach der Stehzeit des Gebirges	43
3.4	Klassifizierung nach Ausbruch- bzw. Vortriebsklassen	46
3.4.1	Einleitung	46
3.4.2	Klassifizierung nach Sicherungsmassnahmen und Ausbrucharten	47
3.5	Interdisziplinäre Zusammenarbeit	51
<b>4</b>	<b>Untertagebauwerke und ihre Ausbrucharten</b>	<b>53</b>
4.1	Arten von Untertagebauwerken	53
4.2	Wahl der Ausbrucharten	54
4.3	Vollausbruch	56
4.3.1	Vollausbruch mit ebener Ortsbrust	56
4.3.2	Stufenausbruch	58
4.4	Teilausbruch	58
4.4.1	Kalottenvortriebe	59

- 4.4.2 Paramentvortrieb – Spritzbetonkernbauweise 60
- 4.4.3 Weitere Ausbrucharten 62
- 4.4.4 Sohl-, Mittel- oder Firststollen zur Vorerkundung des Gebirges 62
- 4.4.5 Festlegung der Baumethode 62
  
- 5 Vortriebsmethoden 67**
  
- 6 Ausbruch durch Sprengvortrieb 71**
- 6.1 Allgemeines 71
- 6.2 Bohren 73
  - 6.2.1 Die Bohrer 73
  - 6.2.2 Bohrmaschinen (Bohrhämmer) 75
  - 6.2.3 Bohrwagen 76
  - 6.2.4 Die Entwicklung der Bohrtechnik 78
  - 6.2.5 Teilroboterisierung der Bohrtechnik mittels Elektronik und Computerunterstützung 78
- 6.3 Sprengen 79
  - 6.3.1 Allgemeines 79
  - 6.3.2 Sprengstoffe 80
  - 6.3.3 Zündmittel 84
  - 6.3.4 Laden, Verdämmen 93
  - 6.3.5 Überprüfung des Zündkreislaufes 94
  - 6.3.6 Zündvorgang 99
  - 6.3.7 Sprengwirkung 99
  - 6.3.8 Sprengschemata im Tunnelbau 102
  - 6.3.9 Einbruchtechniken der Ortsbrust 103
- 6.4 Schüttern 134
  - 6.4.1 Allgemeines 134
  - 6.4.2 Ladegeräte 135
  - 6.4.3 Brecheranlagen 139
  - 6.4.4 Funktionsweise Backenbrecher 141
  - 6.4.4 Funktionsweise Prallbrecher 142
- 6.5 Hochleistungsvortrieb im Tunnelbau – Industrialisierungstendenz im Sprengvortrieb [6-26] 142
  - 6.5.1 Einleitung 142
  - 6.5.2 Vergleich des Sprengvortriebs mit dem TBM-Vortrieb 143
  - 6.5.3 Effizienzsteigerungspotential 144
  
- 7 Mechanischer Vortrieb mittels Bagger, Rippergeräten und Teilschnittmaschinen (TSM) 147**
- 7.1 Ausbruch durch Bagger 147
- 7.2 Rippern 148
- 7.3 Aufbau einer TSM 149
- 7.4 TSM – Einsatzbereich 150
- 7.5 TSM – Längs- und Querschneidkopf 150
- 7.6 TSM – Schrämkopfmeissel 151
- 7.7 TSM – Schrärmarm mit Schwenkwerk 154
- 7.8 TSM – Ladevorrichtungen 155
- 7.9 TSM – Trägergerät 157
- 7.10 TSM – Sonderausführung 159
- 7.11 TSM – Vortriebssequenzen und Baustellenlogistik 159
- 7.12 TSM – Entstaubungsmassnahmen 161
- 7.13 Automatisierte Steuerung der Teilschnittmaschinen 162

- 7.14 Leistungsberechnung von TSM 163
- 7.15 Neueste Entwicklungen bei TSM 168
- 7.16 TSM – Vor- und Nachteile 169
  
- 8 Sicherungsmassnahmen 171**
  - 8.1 Allgemeines 171
  - 8.2 Spritzbeton 171
    - 8.2.1 Allgemeines 171
    - 8.2.2 Spritzverfahren 173
    - 8.2.3 Spritzbetonsysteme 185
    - 8.2.4 Ausgangsstoffe des Spritzbetons 187
    - 8.2.5 Optimierung des Spritzbetoneinsatzes 197
    - 8.2.6 Rückprall 202
    - 8.2.7 Staubentwicklung 207
    - 8.2.8 Festigkeit, Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit 210
    - 8.2.9 Festigkeit des jungen Spritzbetons 211
    - 8.2.10 Schwindverhalten und Nachbehandlung von Spritzbeton 211
    - 8.2.11 Verhalten von Spritzbeton unter hohen und tiefen Temperatureinwirkungen 212
    - 8.2.12 Stahlfaserspritzbeton 213
    - 8.2.13 Ausführung von Spritzbeton in druckhaftem Gebirge 215
    - 8.2.14 Arbeitssicherheit 216
    - 8.2.15 Maschinenteknik 217
    - 8.2.16 Spritzbetonroboter 220
    - 8.2.17 Herstellungsbedingte Fehler im Spritzbeton 226
  - 8.3 Anker 226
    - 8.3.1 Tragwirkung 226
    - 8.3.2 Ankersysteme 227
    - 8.3.3 Setzen von Ankern 235
    - 8.3.4 Ankerersatztechnik bei Systemankerung 237
  - 8.4 Einbaubogenversetz- und Betonstahlmattenverlegegeräte 238
  - 8.5 Ausbaubögen bzw. Einbaubögen 239
  
- 9 Vortrieb mittels Schirmgewölbesicherungen 243**
  - 9.1 Arten der vorausseilenden Gewölbesicherungen 243
  - 9.2 Vorpfändung mittels Verzugsblechen und Kanaldielen 243
    - 9.2.1 Sichern mit Verzugsblechen 243
    - 9.2.2 Sichern mit Pfandblechen und Kanaldielen 244
  - 9.3 Sicherung mittels Spiessen 245
    - 9.3.1 Herstellung und Vortrieb 245
    - 9.3.2 Baustelleneinrichtung 248
  - 9.4 Rohrschirmgewölbe 248
    - 9.4.1 Herstellung und Vortrieb 248
    - 9.4.2 Baustelleneinrichtung zur Herstellung des Schirmgewölbes 256
  - 9.5 Injektionstechnik im Tunnelbau 256
    - 9.5.1 Einsatz und Verfahrensauswahl 256
    - 9.5.2 HDI-Technik 259
    - 9.5.3 HDI-Gewölbeschirm im Lockergestein 263
    - 9.5.4 Kombiniertes Rohr- und HDI-Schirmgewölbe 268
  - 9.6 Injektionsstabilisierung 273
    - 9.6.1 Ortsbruststabilisierung 273
    - 9.6.2 Injektionszwiebeltechnik zur Durchörterung von grundwasserführenden Störzonen 275

- 9.6.3 Soilfracturing im Tunnelbau zum Ausgleich von Setzungen 278
- 9.7 Gefrierschirme 282
  
- 10 Transport des Ausbruchmaterials aus dem Tunnel 285**
  - 10.1 Transportsysteme 285
  - 10.2 Stetigförderer 285
  - 10.3 Gleisbetrieb 294
    - 10.3.1 Schutterzüge 294
    - 10.3.2 Bunker- und Förderbandzüge 295
    - 10.3.3 California-Weiche 296
    - 10.3.4 Vor- und Nachteile des Gleisbetriebs 297
  - 10.4 Pneu-Radgebundener Transport 297
    - 10.4.1 Muldenkipper- bzw. Dumpertransporte 297
    - 10.4.2 Fahrladerbetrieb 298
  - 10.5 Entwicklungen in der Schuttertechnik 298
  
- 11 Temporäre Entwässerungs- und Absperrmassnahmen 301**
  - 11.1 Wasserhaltung der Baustelle 301
    - 11.1.1 Allgemeines 301
    - 11.1.2 Drainagemassnahmen 302
    - 11.1.3 Grundwasserabsenkung und Grundwasserabspernung 304
  - 11.2 Injektionsverfahren zur temporären und permanenten Abspernung von Grundwasser 304
    - 11.2.1 Injektionsmittel 304
    - 11.2.2 Injektionen mit Zementen 305
    - 11.2.3 Injektionen mit reaktiven Kunstharzen 308
    - 11.2.4 Zweck der Injektion 309
    - 11.2.5 Baubetrieb und Kosten 313
    - 11.2.6 Checklisten zur Injektionsauswahl 315
    - 11.2.7 Injektionsverfahren zur Abspernung von Berg- und Grundwasser 315
    - 11.2.8 Konventionelle Injektionsverfahren 320
    - 11.2.9 Hochdruckinjektionsverfahren (HDI) 331
    - 11.2.10 Beispiele für HDI-Abdichtungen im Lockergestein 335
    - 11.2.11 Folgerungen 336
  - 11.3 Gefrierverfahren 340
    - 11.3.1 Allgemeines 340
    - 11.3.2 Technologie und physikalisches Prinzip 340
    - 11.3.3 Grundlagen der Bemessung 342
    - 11.3.4 Festigkeit 346
    - 11.3.5 Dichtigkeit und Kontrolle 346
    - 11.3.6 Baustelleneinrichtung 347
  
- 12 Industrialisierung des konventionellen Vortriebs 349**
  - 12.1 Industrialisierung in der Vortriebszone 349
    - 12.1.1 Bohrtechnologie 349
    - 12.1.2 Sprengtechnologie 350
    - 12.1.3 Schuttertechnologie 350
    - 12.1.4 Sicherungstechnologie 351
  - 12.2 Parallelisierungsziele und Lösungsansätze für den rückwärtigen Bereich 354
  - 12.3 Das Nachläufersystem als aufgehängte Plattform 355
  - 12.4 Innovation 357
  - 12.5 Entwicklungstendenzen beim Hochleistungssprengvortrieb 358
    - 12.5.1 Vortrieb Kategorie 1: standfester bis nachbrüchiger Fels 362



12.5.2	Vortrieb Kategorie 2: geringe Standfestigkeit	363
12.6	Zusammenfassung und Ausblick	363
<b>13</b>	<b>Leistungsermittlung und Bauprogramm des konventionellen Vortriebs</b>	<b>365</b>
<b>14</b>	<b>Permanente Hauptabdichtung von Tunnelbauwerken</b>	<b>373</b>
14.1	Hauptabdichtungsarten	373
14.2	Einflussfaktoren auf Art und Anordnung der Abdichtung	377
14.2.1	Interaktion – Gebirge, Bauwerk und Bauweise	377
14.2.2	Einfluss des Gebirgswassers	378
14.2.3	Einfluss der Tunnelnutzung	379
14.3	Anforderungen an Tunnelabdichtungen	380
14.4	Dichtungskonzepte	382
14.5	Dichtungselemente und Dichtungsmaterialien	383
14.5.1	Wasserundurchlässiger Beton	383
14.5.2	Kunststoffmodifizierte Mörtel und Betone	384
14.5.3	Folienabdichtung	385
14.5.4	Aufgespritzte Abdichtung	388
14.5.5	Metallabdichtungen	389
14.5.6	Injektionen	389
14.6	Drainage	389
14.7	Verlegetechnik von Abdichtungsfolien bei bergmännischen Tunneln	392
14.7.1	Isolierungsaufbau	392
14.7.2	Folienbefestigung	393
14.7.3	Folienverlegung	395
14.8	Material- und Leistungskennwerte	396
14.9	Sicherheit / Brandschutz	396
<b>15</b>	<b>Hohlraumauskleidung</b>	<b>397</b>
15.1	Problemstellung	397
15.2	Stollenauskleidungen	398
15.2.1	Verwendungszweck von Stollen	398
15.2.2	Stollenschalungen	399
15.2.3	Betonieren von Stollen	405
15.3	Tunnelauskleidungen	407
15.3.1	Arbeitsabläufe	407
15.3.2	Ortbetontunnelsohle	407
15.3.3	Tunnelauskleidung des Parament- und Kalottenbereichs	410
15.3.4	Tunnelzwischendecken und Trennwand	414
15.4	Erforderliche Schalungslänge	415
15.5	Kavernenauskleidung	417
15.6	Bemessung der Schalungen	417
15.7	Schalungskosten	417
<b>16</b>	<b>Arten von Tunnelvortriebsmaschinen</b>	<b>419</b>
16.1	Einsatzbereiche	419
16.2	Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen	424
16.3	Tunnelbohrmaschinen (TBM)	426
16.4	Schildmaschinen	427
16.5	Sonderformen von Schildmaschinen	430

- 17 Tunnelbohrmaschinen (TBM) 433**
  - 17.1 Einsatz von Tunnelbohrmaschinen 433
  - 17.2 Gripper-TBM 435
    - 17.2.1 Aufbau der Gripper-TBM 435
    - 17.2.2 Bohrkopf 438
    - 17.2.3 Bohrkopftrieb und Hauptlager 439
    - 17.2.4 Bohrkopfmantel 442
    - 17.2.5 Innen- und Aussenkelly mit Verspann- und Vorschubeinrichtung 442
    - 17.2.6 Mechanische Hilfseinrichtung 443
    - 17.2.7 Arbeits- und Unterhaltszyklen einer Gripper-TBM 444
  - 17.3 Aufweitungs-TBM 445
  - 17.4 Schild-TBM 447
  - 17.5 Teleskopschild-TBM 448
  - 17.6 Berechnung der Vorschubpressenkräfte während des Vortriebszyklus 451
  - 17.7 Abbawerkzeuge 453
  - 17.8 Die Berechnung der Nettovortriebsleistung 458
  - 17.9 Berechnungsbeispiel – Leistungsermittlung und Bauprogramm eines TBM-Vortriebs mit Ausbruchssicherung 464
  - 17.10 Nachläufer 466
  - 17.11 Schutterung 476
  - 17.12 Steuerung 477
  - 17.13 TBM-Planungsaspekte sowie Vor- und Nachteile 479
- 18 Tunnelvortrieb mittels Hinterschneidtechnik 481**
  - 18.1 Einsatzbereich und Leistungen 481
  - 18.2 Wirkprinzip 482
  - 18.3 Maschinenkonzept 483
- 19 Wiederverwendung von Tunnelausbruchmaterial 487**
  - 19.1 Tunnelausbruchmaterial als Baustoff 487
  - 19.2 Technische Einflüsse auf die Qualität des Ausbruchmaterials 488
  - 19.3 Beurteilung des Ausbruchmaterials 489
    - 19.3.1 Erstellung eines Materialbewirtschaftungskonzeptes 489
    - 19.3.2 Prüfverfahren zur Beurteilung des Ausbruchmaterials 490
  - 19.4 Aufbereitung von geeignetem TBM-Ausbruchmaterial 492
- 20 Schildvortriebsmaschinen 495**
  - 20.1 Einsatz und Arten von Schildmaschinen 495
  - 20.2 Abbaeinrichtungen von Schildmaschinen 498
    - 20.2.1 Teilschnittabbaueinrichtung und Antrieb 498
    - 20.2.2 Schneidrad und Antrieb 499
    - 20.2.3 Schneidradlagerung und -antrieb 502
    - 20.2.4 Abbawerkzeuge 502
  - 20.3 Schild 505
    - 20.3.1 Schildmantel 505
    - 20.3.2 Schildschwanzdichtung 506
    - 20.3.3 Ringspaltverpressung 507
  - 20.4 Vorschub- und Steuerpressen 508
  - 20.5 Erddruckschilde 512
  - 20.6 Flüssigkeitsschilde 515
  - 20.7 Druckluftschilde 520
  - 20.8 Fördertechnik 521

- 20.8.1 Allgemeines 521
- 20.8.2 Trockenförderung 522
- 20.8.3 Dickstoffförderung 523
- 20.8.4 Flüssigkeitsförderung 525
- 20.8.5 Separationstechnik 527
- 20.9 Tübbingerektor 532
- 20.10 Bohrtechnik für die punktuelle Vorauserkundung und zur Herstellung von Injektionsschirmen 534
- 20.11 Nachläufersysteme 535
- 20.11.1 Konzeptioneller Aufbau eines Nachläufers für Flüssigkeitsschilde 536
- 20.11.2 Konzeptioneller Aufbau eines Erdschild-Nachläufers 543
- 20.12 Spezialschildkonstruktionen 546
- 20.12.1 Universal- bzw. Kombinationsschilde 546
- 20.12.2 Multiface-Schild 546
- 20.12.3 Messerschilde 550
- 20.13 Start-, Ziel- und Zwischenbaugrube 556
- 20.14 Sicherheitsanforderungen 564
- 20.15 Entwicklungstendenzen 566
- 20.16 Fehlerquellen beim Tunnelvortrieb mittels Schildmaschine 567
  
- 21 Tübbingauskleidung 569**
- 21.1 Berechnung von Tunnelröhren mit Tübbingauskleidung 569
- 21.2 Konstruktive Ausbildung der Tübbinge 574
- 21.2.1 Ausbildung der Ring- und Längsfugen 574
- 21.2.2 Globale Tübbingform 576
- 21.3 Herstellung von Tübbingen 578
- 21.4 Versetzen der Tübbinge im Tunnel 586
  
- 22 Steuerung von Vorschubpressenkräften und Setzungen sowie Vortriebsrichtung 587**
- 22.1 Nachweis der Ortsbruststabilität 587
- 22.1.1 Einführung 587
- 22.1.2 Nachweise zur Berechnung des notwendigen Stützdrucks sowie der Aufbruch- und Ausblärsicherheit der Ortsbrust 589
- 22.2 Ermittlung der erforderlichen Vorpresskräfte 589
- 22.2.1 Allgemeines 589
- 22.2.2 Einwirkungen 590
- 22.2.3 Mantelreibung am Schildmantel – Bereich I 606
- 22.2.4 Brustwiderstand 610
- 22.2.5 Aufnehmbare Vorpresskräfte 616
- 22.3 Berechnungsbeispiel – Hydroschildvortrieb 616
- 22.3.1 Projektbeschreibung 616
- 22.3.2 Wahl des Ortsbruststützmediums 618
- 22.3.3 Erforderliche Vorschubkraft im Schnitt I nach Silotheorie 619
- 22.3.4 Erforderliche Vorschubkraft im Schnitt II nach klassischer Erddrucktheorie 625
- 22.3.5 Erforderliche Vorschubkraft im Festgestein 628
- 22.3.6 Zusammenfassung der Vorschubkraftabschätzungen 629
- 22.3.7 Flüssigkeitsförderung und Vortriebsgeschwindigkeit 629
- 22.4 Setzungen und Hebungen 640
- 22.5 Vermessung und Steuerung 641
- 22.5.1 Überblick 641
- 22.5.2 Vermessungstechnische Methoden zur Kontrolle der Fahrt 642
- 22.5.3 Messsysteme zur Kontrolle der Fahrt 642

<b>23</b>	<b>Baulüftungen von Untertagebauwerken</b>	<b>643</b>
23.1	Allgemeines	643
23.2	Lüftungssysteme	644
23.3	Lüftungs- und Entstaubungsmassnahmen beim Einsatz von TSM und TBM	647
23.3.1	Lüftungsanlagen	647
23.3.2	Enstaubungsanlagen	649
23.4	Installation in der Vortriebszone	654
23.4.1	Blasende Belüftung	654
23.4.2	Saugende Belüftung	655
23.5	Installation der Baulüftung im Portalbereich	655
23.6	Lutten	655
23.6.1	Luttentypen und Luttenmaterial	655
23.6.2	Installation der Lutte	656
23.7	Ventilatoren	657
23.8	Dimensionierung der Lutte und des Ventilators	658
23.9	Instandhaltung	661
<b>24</b>	<b>Vorbereitung und Logistik einer Tunnelbaustelle</b>	<b>663</b>
24.1	Arbeitsvorbereitung	663
24.2	Einrichtung einer Baustelle	666
24.2.1	Allgemeines	666
24.2.2	Baustelleneinrichtungsplan/Installationsplan	666
24.2.3	Planung der Baustelleneinrichtung	669
24.2.4	Versorgungseinrichtungen	672
24.2.5	Bauten der Baustelle	680
24.2.6	Lager- und Bearbeitungsanlagen	681
24.2.7	Transportgeräte auf der Baustelle	683
24.3	Energieumsetzung auf der Baustelle	687
24.3.1	Elektrische Energie	687
24.3.2	Ermittlung des elektrischen Leistungsbedarfs	688
24.3.3	Verbrennungsmotoren	692
24.3.4	Ermittlung des Druckluftbedarfes	692
24.3.5	Hydraulik	693
24.3.6	Dampfenergie	693
24.4	Baustelleneinrichtungen des konventionellen Vortriebs	694
24.4.1	Installationen über Tag	694
24.4.2	Installationen unter Tage	695
24.5	Baustelleneinrichtungen des TBM-Vortriebs	695
24.5.1	Installations-Übersicht	695
24.5.2	Installationen über Tag	695
24.5.3	Installationen unter Tag	696
24.6	Gesamtinstallationen beim Schildvortrieb	698
24.6.1	Ausseninstallationen	698
24.6.2	Schachtinstallationen	698
24.6.3	Im Tunnel: Abbau und Transportgeräte sowie Unterstüztungseinrichtungen	698
24.7	Zusammenfassung	699
<b>25</b>	<b>Sicherheitsmanagement im Untertagebau</b>	<b>701</b>
25.1	Baustellenumfeld	701
25.2	Der Integrale Sicherheitsplan der Schweizer Bauindustrie	702
25.2.1	Begriff und Ziele	702
25.2.2	Konzept der Integralen Sicherheit	704

---

25.2.3	Integraler Sicherheitsplan nach SIA 465 für die Bauphase	705
25.2.4	Eingegangene Risiken	708
25.2.5	Sicherheitsorganisation und Notmassnahmen	709
25.3	Der SIGEPLAN der deutschen Bau-Berufsgenossenschaften	710
25.3.1	Einleitung	710
25.3.2	Sicherheitsplanung	710
25.3.3	Umsetzung des Sicherheitsplans	713
25.4	Zusammenfassung	713
<b>26</b>	<b>Projektentwicklungsformen als Schlüssel zu Innovation, Risikomanagement sowie Kostenoptimierung</b>	<b>715</b>
26.1	Bauwirtschaftliche Veränderungen	715
26.2	Einflüsse und Grundvoraussetzungen für die richtige Wahl der Vertragsform zur schnellen und kostenoptimalen Realisierung von Projekten	716
26.2.1	Projektentwicklungsformen	716
26.2.2	Die Einzelleistungsträgerorganisation	718
26.2.3	Gesamtleistungsträgerorganisation mit Ausschreibung auf der Basis einer eingeschränkten Funktionalausschreibung	721
26.2.4	Totalleistungsträgerorganisation mit Ausschreibung auf der Basis einer Funktionalausschreibung	723
26.2.5	Zusammenfassung	726
26.3	Gestaltung der Ausschreibung und Risikomanagement als Schlüssel zur konfliktarmen Abwicklung von Projekten	726
26.3.1	Risikomanagement	726
26.3.2	Ausschreibungsgestaltung	729
26.3.3	Vertragsgestaltung	731
26.3.4	Entscheidungskonzept vor Ort	731
26.3.5	Zusammenfassung	732
26.4	Kooperationen zur Entfaltung von Innovation und Synergien zwischen Planung und Ausführung zwecks Kostenoptimierung des Projekts	732
26.4.1	Neue Anforderungen erfordern neues Denken	732
26.4.2	Kooperation zum Aufbau von Systemangeboten im Tunnelbau	732
26.5	Zusammenfassung	734
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>735</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>747</b>



# 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.

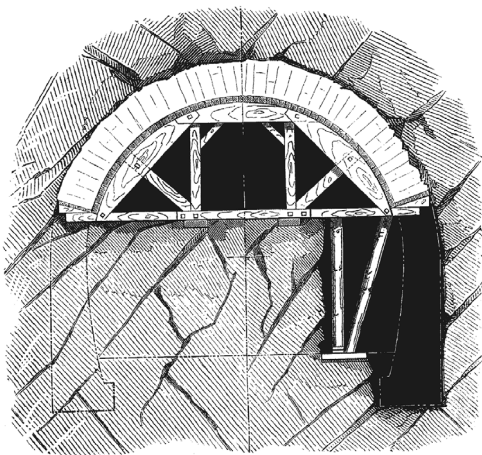
Da die meisten Gebirgsformationen, bedingt durch ihre tektonische Entstehungsgeschichte, heterogen geschichtet und gefaltet sind, sollte man bei Vor-

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.

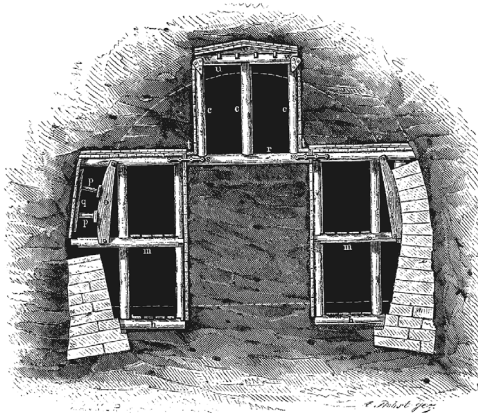
Die Bauverfahren und Sicherungsmassnahmen müssen den weiten Variationsbreiten der geologischen und petrographischen Parameter des Projektes Rechnung tragen. Die Adaptionsfähigkeit der jeweiligen Bauverfahren wie auch der Sicherungsmassnahmen ist für den wirtschaftlichen Erfolg der Projektentwicklung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

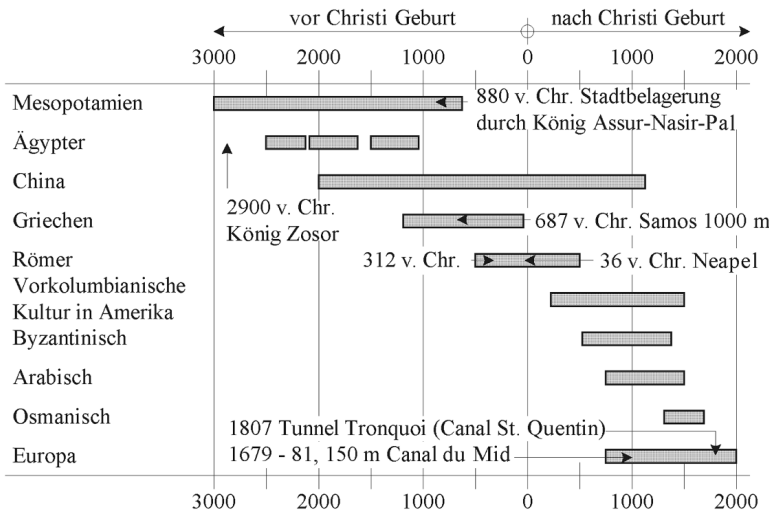
Prof. Maidl formuliert kurz und treffend [1-2] die Bedeutung des Tunnelbaus wie folgt: „Der Tunnelbau vereint Theorie und Praxis zu einer eigenen Ingenieurbaukunst. Bei Wichtung der vielen Einflüsse steht je nach dem Stand der eigenen Kenntnisse einmal die Praxis, das andere Mal mehr die

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, Maschinentechnik 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 Bauzustände 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, Maschinentechnik und Sicherungsmassnahmen des Hohlraums waren lange Zeit dem Bergbau entliehen. Noch heute ist das Abbauvolumen im Bergbau um Zehnerpotenzen höher als im Ingenieurverkehrstunnelbau. 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.	Jubster leiten die Quelle von Gihon unter die Stadt Jerusalem
700 v. Chr.	Wasserversorgungsstollen in Jerusalem; Länge 540 m, Volumen 20'000 m <sup>3</sup> (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.	Katakombenbauten in Rom
Im Mittelalter	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 <sup>3</sup>
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

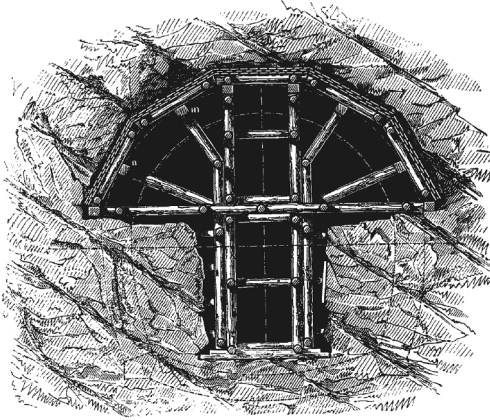
Dies setzt sich durch die neuen Eisenbahntechniken bis in die Gegenwart fort: Bahn 2000, Hoch-

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 <sup>3</sup> Ausbruch
1950 – 1958	Kraftwerk Niagara-Fälle, 3350000 m <sup>3</sup> Ausbruch
1961 – 1964	Pumpspeicherwerk Vianden, Luxemburg, Kavernenzentrale, 160000 m <sup>3</sup> 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 <sup>3</sup> 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]

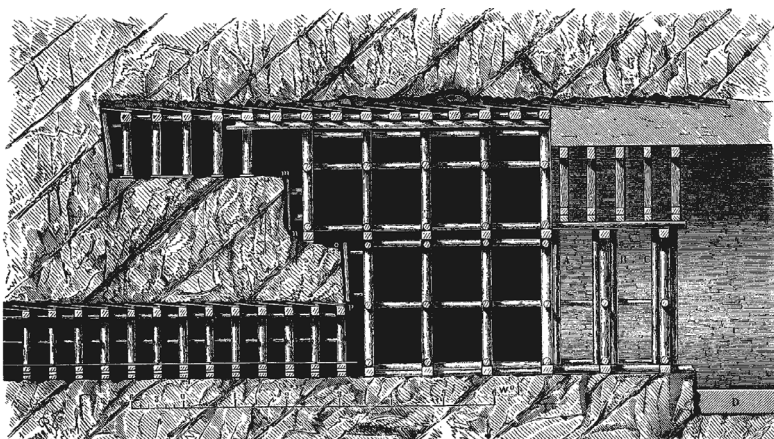
Netze der Strassen und Schnellbahnen sind in den nächsten zwanzig Jahren Investitionen in Höhe von 350 bis 600 Milliarden sFr. (ca. 220 bis 375 Milliarden €) vorgesehen. Bei den Hochgeschwindigkeitsstrecken der Bahnen sind nur geringe Steigungen und grosse Kurvenradien möglich. Das erfordert auch in 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.

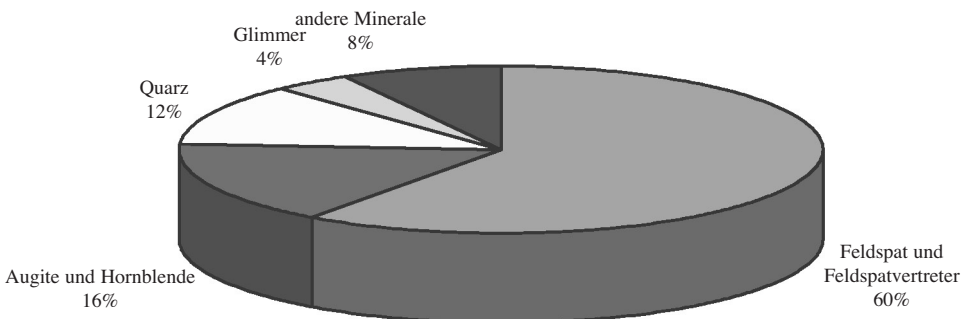
Die Gesteine unterscheidet man nach den gebirgsbildenden Vorgängen [2-1] wie folgt:

- **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.

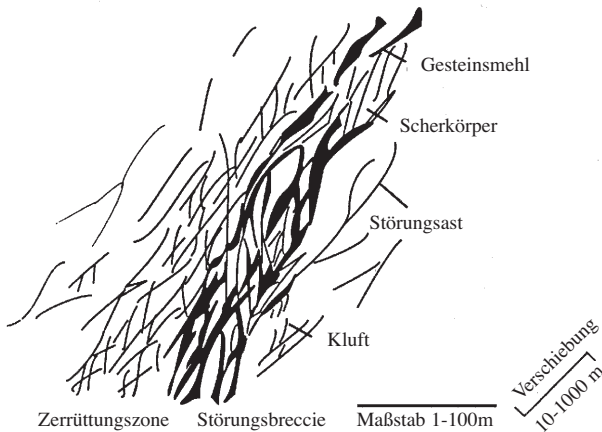
Sedimente bedecken rund 75 % der Erdoberfläche, und nur 25 % sind Magmatite und metamorphe Gesteine, obwohl die Erdkruste insgesamt nur zu 5 % aus Sedimenten besteht (unverfestigt  $\approx$  Lockergestein, verfestigt  $\approx$  Sedimentgestein).

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)
- Kataklastite
  - 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,

**Tabelle 2.2-1** Gesteinstypen mit kritischen Eigenschaften im Tunnelbau [2-2]

<b>Gesteinstypen mit kritischen primären Gesteinseigenschaften</b>			
<b>Gesteinsgruppe</b>	<b>Problematische Gesteine</b>	<b>Kritische Gebirgseigenschaften</b>	<b>Tunnel-Beispiel</b>
<i>Feinkörnige (bindige) Lockergesteine</i>	Ton Seebodenlehm Seekreide	Quelleigenschaften Strukturkollaps Festigkeit Verformbarkeit	Les Vignes
<i>Grobkörnige Lockergesteine</i>	Flusskies Gehängeschutt Blocksturz Moräne	Wassergehalt Durchlässigkeit Festigkeit Heterogenität	N3-Habsburgtunnel Grauholztunnel BLS Lötschbergtunnel
<i>Klastische Sedimentgesteine</i>	Tonstein Mergel „Sandsteine“ (Flysch)	Festigkeit Verformbarkeit Quelleigenschaften Heterogenität	Hauenstein-Basistunnel N3-Bötzbergtunnel
<i>Chemische Sedimentgesteine</i>	Gips Anhydrit Steinsalz	Löslichkeit Quelleigenschaften aggressive Bergwässer	Hauenstein-Basistunnel N2-Belchentunnel N3-Bötzbergtunnel
<i>Metamorphite</i>	Dolomit-Marmor Ton/Kalkschiefer Rauhacke	Festigkeit Wassergehalt Durchlässigkeit	Garegna-Stollen N2-Gotthardtunnel Engadiner Kraftwerke Vereinatunnel
<i>Vulkanite</i>	Pyroklastit (Tuff)	Festigkeit, Heterogenität	
<b>Überprüfung und kritische sekundäre Gesteinseigenschaften</b>			
<b>Ereignis</b>	<b>Phänomen</b>	<b>Kritische Eigenschaft</b>	<b>Tunnel-Beispiel</b>
<i>Spröde tektonische Überprägung:</i>			Vereinatunnel Umfahrung Locarno Simplontunnel N3-Bötzbergtunnel N2-Gotthardtunnel Furka-Basistunnel
grossräumig	Klüftung, Gebirgsdurchtrennung	Teilbeweglichkeit der Kluftkörper Festigkeit Verformbarkeit	
kleinräumig	Kataklastische Störzonen	Durchlässigkeit	
<i>Lösungsphänomene:</i>			KW Vorderrhein Weissensteintunnel Simplontunnel Furka-Basistunnel N2-Gotthardtunnel
Oberflächenwasser	Gips-Kalk Kalk-Karst	Festigkeit Durchlässigkeit Wassergehalt	
Tiefenwasser	hydrothermale Lösung		
<i>Oberflächeneffekte:</i>			Adlertunnel Stollen KW Oberhasli Furka-Basistunnel SBB-Gotthardtunnel SBB-Lötschbergtunnel Stollen Obergstein
mechanische und chemische Verwitterung	Bodenbildung	Teilbeweglichkeit Festigkeit Verformbarkeit	
Talerosion, Gletscherrückzug	Entlastungsklüftung	Durchlässigkeit Wassergehalt	
Hangstabilität	Hakenwurf Sackung		



- je komplizierter die zu erwartenden geologischen und hydrologischen Verhältnisse sind,
- je tiefer liegender und länger der geplante Tunnel ist,
- je weniger Informationen über die geologischen, geotechnischen und hydrologischen Verhältnisse vorliegen,
- je höher die technischen und wirtschaftlichen Risiken des Projektes sind.

Die Aufgabenbereiche der geotechnischen Untersuchungen sind in Tabelle 2.3-1 zusammengestellt; Tabelle 2.3-2 zeigt die verschiedenen ingenieurgeologischen Untersuchungsmethoden. Im Rahmen des Risikomanagements muss je nach Projektumfang die interdisziplinäre Zusammenarbeit der Fachleute in den verschiedenen Projektphasen erfolgen.

In der **Vorprojektphase** ist eine technische und wirtschaftliche Prognose abzugeben, ob der Tunnelbau machbar ist. Sie besteht aus folgenden Teilen:

- geologisch-stratigraphischer Teil
- tektonischer Teil

- ingenieurgeologisch-hydrologischer Teil
- hydromechanischer Teil
- geomechanischer Teil

Dabei sind insbesondere die geomorphologischen, petrographischen, stratigraphischen, tektonischen und hydrologischen Verhältnisse im Bereich und dem näheren Umfeld der Tunnelachse zu untersuchen. Es ist wichtig, die Lagerungsverhältnisse, die Wasserführung, die Aggressivität des Wassers, den geologischen Bau, die Gebirgsklassen, die chemischen und dynamischen Prozesse, die Schichtung, die Klüftigkeit, die Gesteinseigenschaften etc. zu bestimmen. Ferner sollten Rutschgebiete und Erdbebengefährdung erkannt werden.

Für die Machbarkeitsprognose im Rahmen der Vorprojektphase werden oft

- geologische Übersichts- und Spezialkarten und ingenieurgeologische Karten, Lagerstättenkarten, topographische Karten, Luft- und Satellitenbildaufnahmen und Vermessungspläne,
- Erfahrungen bei benachbarten Bauwerken mit einem weitmaschigen geotechnischen und geophysikalischen Untersuchungsnetz,

**Tabelle 2.3-1**

Aufgaben der geotechnischen Untersuchungen in Abhängigkeit der Projektphase

Bearbeitungsphase	Aufgabenbereich der geotechnischen Untersuchungen
Vorprojektphase	Interpretation der geotechnischen Situation hauptsächlich aus Karten etc., als Voraussetzung für Variantenuntersuchungen und prognostische Darstellung der <ul style="list-style-type: none"> <li>• geologischen, stratigraphischen und tektonischen Verhältnisse</li> <li>• ingenieurgeologischen und hydrologischen Situation</li> <li>• geomechanischen Aussagen</li> </ul>
Bauprojektphase / Tunnelentwurf	Detaillierte Untersuchungen zur Vertiefung der geotechnischen Erkenntnisse, Ergänzung der Tunnelvorhersage durch Erhöhung des Untersuchungsaufwandes: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchführung von Kernbohrungen und Laborversuchen</li> <li>• Auffahren von Sondierstollen</li> <li>• Bestimmung von Ausbruchart und Sicherungsmethode (Ausbruchklasse) sowie der Abbaufähigkeit des Materials</li> </ul>
Ausführungsphase	Bestimmung der örtlich vorgefundenen Gesteins- und Gebirgsverhältnisse und Vergleiche mit den Annahmen aus der Entwurfsphase, ggf. Korrektur und Anpassung des Vortriebs an die Gebirgssituation. <p>Dokumentation und Bewertung der geotechnischen Verhältnisse:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Störfälle und Bestätigung der Klassifikationsmerkmale</li> <li>• Abrechnung nach Gebirgsklassen, Nachkalkulation</li> <li>• Erfassung wichtiger technologischer Kennwerte (Abschlagtiefe, Mehrausbruch u. ä.)</li> <li>• Vergleich der Dokumentation mit den Entwurfsparametern</li> </ul>