

Bernhard Maidl, Leonhard Schmid,
Willy Ritz, Martin Herrenknecht

Tunnelbohrmaschinen im Hartgestein

Unter Mitarbeit von
Gerhard Wehrmeyer und Marcus Derbort

Inhaltsverzeichnis

1	Historische Entwicklung und zukünftige Anforderungen	1
2	Grundprinzipien und Definitionen	14
2.1	Grundprinzip und Bauverfahren	15
2.1.1	Bohrsystem	16
2.1.2	Vorschub- und Abstützsystem	17
2.1.3	Abfördersystem	17
2.1.4	Sicherungssystem	18
2.2	Definitionen und Begriffe	19
2.2.1	Tunnelbohrmaschinen mit Vollschnittabbau	19
2.2.1.1	Gripper-TBM	19
2.2.1.2	TBM mit Schild	22
2.2.2	Tunnelbohrmaschinen mit teilflächigem Abbau	23
3	Das Bohren	24
3.1	Der Bohrprozess	24
3.2	Der Bohrkopf	25
3.2.1	Bohrkopfform	26
3.2.2	Förderung des Ausbruchs im Abbauraum	28
3.2.3	Bohrkopfausbildung und Bodenverfestigung	31
3.3	Die Bohrwerkzeuge	31
3.3.1	Allgemeines	31
3.3.2	Wirkungsweise der Rollenmeißel	34
3.3.3	Meißelbahnabstände (Spacing)	35
3.3.4	Penetration	37
3.3.5	Verschleiß	41
3.3.6	Verschleiß und Wasser	49
3.3.7	Rollenmeißelgehäuse	49
3.4	Der Antrieb	51
3.4.1	Antriebsarten	51
3.4.2	Hauptlager	53
3.5	Die Vortriebsleistung	53
3.6	Sonderformen	56
3.6.1	Aufweitungsmaschinen	56
3.6.2	System Bouygues	58
3.6.3	Mobil Miner (Robbins)	59
3.6.4	Hinterschneidtechnik	60
3.6.4.1	Mini-Fullfacer (Atlas Copco)	60
3.6.4.2	Continous Miner	61
3.6.5	Schachtbohrverfahren	62
3.6.5.1	Raise-Boring	63

3.6.5.2	Blind drilling	65
3.6.5.3	Kombinationen	66
4	Der Vorschub	67
4.1	Allgemeines	67
4.2	Vorschub mit Gripperspannung	67
4.3	Vorschub mit Schild-TBM	74
5	Der Materialtransport	75
5.1	Die Materialförderung im Maschinenbereich	75
5.2	Die Materialförderung durch den Tunnel	77
5.2.1	Der Gleisbetrieb	77
5.2.1.1	Diesel- oder Elektrobetrieb	79
5.2.1.2	Förderwagen	79
5.2.1.3	Beladung vor Ort	80
5.2.1.4	Zugfahrplan	80
5.2.1.5	Streckengleis	81
5.2.2	Der gleislose Fahrbetrieb	81
5.2.2.1	Transportfahrzeuge	82
5.2.2.2	Fahrpiste	82
5.2.2.3	Beladung vor Ort	82
5.2.3	Die Bandförderung	84
5.2.3.1	Bandspeicher	85
5.2.3.2	Streckenbandverlängerung und Bandbetrieb	86
5.2.3.3	Vorteile der Bandförderung und Innovationspotential	86
6	Ausrüstung des Nachläufers	89
6.1	Nachläuferausbildung	89
6.2	Konstruktionshinweise	93
7	Lüftung, Entstaubung, Arbeitssicherheit, Erschütterungen	98
7.1	Lüftung	98
7.1.1	Gefährdung	98
7.1.2	Lüftungskonzepte, Lüftungssysteme	98
7.2	Entstaubung	99
7.3	Arbeitssicherheit und Sicherheitsplanung im TBM-Betrieb	102
7.3.1	Allgemeines	102
7.3.2	Internationale Richtlinien und nationale Vorschriften	103
7.3.2.1	Internationale Richtlinien	103
7.3.2.2	Nationale Vorschriften	104
7.3.3	Integraler Sicherheitsplan	106
7.3.3.1	Der Sicherheitsplan im Umfeld der Managementpläne	106
7.3.3.2	Sicherheitsziele	106
7.3.3.3	Gefährdungsbilder und Risikoanalysen	106
7.3.3.4	Maßnahmenplan	108

7.3.4	TBM-Konstruktion und Besonderheit der Erdgasgefahr und der Ausbruchssicherung	109
7.3.4.1	Erdgasgefahr	109
7.3.4.2	Ausbruchssicherung	110
7.4	Erschütterungen	112
8	Zusatzausrüstung	114
8.1	Erkunden und Verbessern des Gebirges	114
8.2	Einrichtungen für die Ausbruchssicherung	116
8.2.1	Ankerbohrgeräte	116
8.2.2	Bogenversetzgeräte	116
8.2.3	Netzversetzeinrichtung	117
8.2.4	Innovationsziele	118
8.3	TBM-Steuerung	118
8.3.1	Steuerung der Gripper-TBM mit einfacher Verspannung	118
8.3.2	Steuerung der Gripper-TBM mit doppelter Verspannung	120
8.3.3	Steuerung einer Einfachschild-TBM	121
8.3.4	Steuerung einer Doppelschild-TBM	124
8.4	Vermessung	125
8.4.1	Einmessung der Tunnelbohrmaschine	126
8.4.2	Vorausberechnung der TBM-Fahrt	126
9	Vortriebssicherung	127
9.1	Allgemeines	127
9.2	Sicherungssysteme und Vortriebsleistungen	128
9.3	Systematische Sicherung im Maschinenbereich	131
9.3.1	Stahleinbauten	131
9.3.2	Verbauplatten/Liner-Plates	134
9.3.3	Tübbinge	134
9.3.3.1	Sohltübbinge	134
9.3.3.2	Tübbingauskleidung	136
9.4	Spritzbetonsicherung	140
9.4.1	Spritzbetonsicherung im Maschinenbereich	140
9.4.2	Spritzbetonsicherung im Nachläuferbereich	142
9.5	Punktueller Sicherung	142
9.5.1	Anker und Netze	142
9.5.2	Stützung mit einzelnen Bögen	145
9.6	Stabilisierungen vor dem Bohrkopf	145
10	Kombinationen von TBM mit Schildmaschinen	147
10.1	Hauben	148
10.2	Teilschilde und Bohrkopfschilde	150
10.3	Spreizbare Messerschild-TBM	151
10.4	Vollschilde	153
10.4.1	Entwicklungen	153

10.4.2	Besonderheiten	155
10.4.2.1	Bohrkopf und Schildmantel	155
10.4.2.2	Druckring	157
10.5	Doppelschilde	157
10.5.1	Entwicklungen	157
10.5.2	Funktionsprinzip	158
10.5.3	Besonderheiten	159
10.5.3.1	Schildmantel und Bentonitschmierung	159
10.5.3.2	Teleskopschild	159
10.6	Schilde mit Flüssigförderung	161
10.6.1	Entwicklungen	161
10.6.2	Funktionsprinzip	162
10.7	Schilde mit Schneckenförderung	163
10.7.1	Entwicklungen	163
10.7.2	Funktionsprinzip	165
10.7.3	Maschinenkonzepte	166
10.7.3.1	Offener Modus (Förderschnecke–Förderband)	166
10.7.3.2	Geschlossener Modus (Förderschnecke–Förderband)	166
10.7.3.3	Geschlossener Modus (Hydraulischer Förderkreislauf)	167
10.7.3.4	EPB-Modus (Förderschnecke–Förderband oder Förderschnecke– Dickstoffpumpe)	168
10.7.3.5	Offener Modus (Förderband)	169
10.8	Micromaschinen für Hartgestein	171
10.8.1	Mini-TBM	171
10.8.2	Rohrvortrieb	173
10.8.2.1	Pressbohr-Rohrvortrieb	173
10.8.2.2	Schild-Rohrvortrieb	173
11	Sonderverfahren: Kombinationen von TBM-Vortrieben mit der Spritzbetonbauweise	177
11.1	Anwendungsgebiete	177
11.2	Ausführungsmöglichkeiten	178
11.2.1	Sondierstollen	178
11.2.2	Pilotstollen	180
11.2.3	Aufweitungen für Bahnhöfe, Weichenstellen oder Maschinenhallen	182
11.3	Beispiele	184
11.3.1	Sondierstollen Piora-Mulde	184
11.3.2	Sondierstollen Kandertal	186
11.3.3	Pilotstollen Uznaberg	190
11.3.4	Aufweitung beim Anschlussbauwerk Nidelbad, Tunnel Zürich–Thalwil	191
12	Ingenieurgeologische Untersuchungen und Einflüsse	196
12.1	Allgemeines	196
12.2	Einflüsse auf den Bohrprozess	201

12.3	Einflüsse auf die Maschinenverspannung	203
12.4	Einflüsse auf die Ausbruchssicherung	206
13	Klassifizierung für Ausbruch und Sicherung	207
13.1	Allgemeines und Zielsetzung für den Maschinenvortrieb	207
13.2	Klassifizierungssysteme	208
13.2.1	Klassifizierung nach Gebirgseigenschaften	208
13.2.1.1	RMR-System (Rock-Mass-Rating-System)	208
13.2.1.2	Q-System (Quality-System)	212
13.2.2	Klassifizierung nach Bohrbarkeit und Abrasivität	221
13.2.3	Klassifizierung nach Art, Umfang und Einbauort der erforderlichen Sicherungsmittel	224
13.3	Normen, Richtlinien und Empfehlungen für die Klassifizierung maschineller Vortriebe	224
13.3.1	Klassifizierung in Deutschland	224
13.3.2	Klassifizierung in Österreich	230
13.3.3	Klassifizierung in der Schweiz	236
13.4	Klassifizierungsvorschlag der Verfasser	242
14	Ausschreibung, Vergabe, Vertrag	245
14.1	Beispiele der Vorgehensweise	245
14.1.1	Vorgehensweise in der Schweiz	245
14.1.1.1	Allgemeines	245
14.1.1.2	Angebotsbewertung	246
14.1.1.3	Qualitätsmanagement	247
14.1.1.4	Zuordnung der Risiken im Vertrag	250
14.1.1.5	Geologisch-geotechnisch veränderte Verhältnisse, Bestellungen- änderungen, Bauzeitanpassungen	251
14.1.2	Vorgehensweise in den Niederlanden	251
14.1.2.1	Ausschreibungs- und Verhandlungsverfahren am Beispiel des Botlektunnels	251
14.1.3	Vorgehensweise in Deutschland	255
14.2	Planerische und geotechnische Voraussetzungen in der Ausschreibung für einen Maschinenvortrieb als Nebenangebot	255
14.2.1	Einleitung	255
14.2.2	Beispiele	256
14.2.2.1	Adlertunnel	256
14.2.2.2	Siebertunnel	257
14.2.2.3	Flughafentunnel Stuttgart	258
14.2.2.4	Rennsteigtunnel	260
14.2.2.5	Lainzer Tunnel	261
14.2.3	Zusätzliche Anforderungen an einen Maschinenvortrieb in der Ausschreibung	264
14.2.3.1	Geologie und Hydrologie	264

14.2.3.2	Planung und Bauverfahren	264
14.2.3.3	Ausschreibung und Vertrag	265
14.2.4	Entscheidungskriterium Kosten	265
14.2.4.1	Planungsphase bzw. Ausschreibungsplanung	265
14.2.4.2	Vergabephase	266
14.2.4.3	Ausführungsphase und Endabrechnung	266
14.2.5	Ausblick	267
15	Die Auskleidung	268
15.1	Allgemeines	268
15.2	Konstruktionsprinzipien für die Auskleidung eines Tunnels	268
15.2.1	Einschalige und zweischalige Konstruktionen	268
15.2.2	Wasserdichte und wasserableitende Konstruktionen	270
15.3	Auskleidung mit Betontübbingen	272
15.3.1	Allgemeines	272
15.3.2	Konstruktionsvarianten	274
15.3.2.1	Blocktübblinge mit rechteckigem Grundriss	274
15.3.2.2	Hexagonaltübblinge	278
15.3.2.3	Rhomboiden und trapezoide Tübbingsysteme	279
15.3.2.4	Spreiztübblinge	280
15.3.2.5	Nachgiebige Auskleidungssysteme	281
15.3.3	Fugenausbildung	286
15.3.3.1	Längsfugen	286
15.3.3.2	Ringfugen	290
15.3.4	Tübbinge aus Stahlfaserbeton	294
15.3.5	Ringspaltverfüllung	294
15.3.5.1	Verfüllung mit Kies	295
15.3.5.2	Mörtelverpressung	295
15.3.6	Maßnahmen zur Abdichtung von Tunneln mit Tübbingauskleidung	296
15.3.6.1	Dichtungsbänder	296
15.3.6.2	Injektionen	299
15.3.7	Herstellung	300
15.3.8	Schäden	301
15.3.8.1	Schäden bei der Ringmontage	302
15.3.8.2	Schäden beim Vortrieb der Maschine	302
15.3.8.3	Schäden im Bereich der Schildschwanzdichtung	303
15.3.8.4	Schäden nach Verlassen des Schildes	303
15.3.8.5	Sanierung von Schäden	304
15.4	Ortbetonschalen	305
15.4.1	Allgemeines	305
15.4.2	Ausführung	305
15.4.3	Herstellung	306
15.5	Spritzbetonschalen als endgültige Auskleidung	307
15.6	Statische Untersuchungen	307

16	Beispiele ausgeführter Bauwerke	309
16.1	Tunnelvortrieb mit Gripper-TBM	309
16.1.1	Kontroll- und Drainagestollen, Ennepe-Talsperre	309
16.1.2	Unterwasserstollen Manapouri, Neuseeland	311
16.2	Tunnelvortrieb mit Schild-TBM	320
16.2.1	Tunnel San Pellegrino, Italien	320
16.2.2	Doppelspurtunnel Zürich–Thalwil, Abschnitt Brunau–Thalwil	324
16.3	Schrägschachtvortrieb mit Doppelschild	327
16.3.1	Druckschacht Cleuson–Dixence	327
Literatur	333
Sachverzeichnis	343