

2. Auflage

Maschiner Tunnelbau im Schildvortrieb

**Bernhard Maidl
Martin Herrenknecht
Ulrich Maidl
Gerhard Wehrmeyer**

Inhaltsverzeichnis

Zuordnung der Autoren.....	VII
Vorwort zur 2. Auflage.....	IX
1 Einführung.....	1
1.1 Grundprinzip und Begriffe.....	3
1.2 Typisierung der Tunnelvortriebsmaschinen nach DAUB.....	6
1.2.1 Einteilung von Tunnelvortriebsmaschinen (TVM).....	6
1.2.2 Tunnelbohrmaschinen (TBM).....	6
1.2.2.1 Tunnelbohrmaschinen ohne Schild (Gripper-TBM).....	6
1.2.2.2 Erweiterungstunnelbohrmaschinen (ETBM).....	7
1.2.2.3 Tunnelbohrmaschinen mit Schild (TBM-S).....	7
1.2.3 Doppelschildmaschinen (DSM).....	8
1.2.4 Schildmaschinen (SM).....	8
1.2.4.1 Schildmaschinen mit Vollschnittabbau (SM-V).....	8
1.2.4.2 Schildmaschinen mit Teilflächenabbau (SM-T).....	11
1.2.5 Anpassbare Schildmaschinen mit kombinierter Verfahrenstechnik (KSM).....	12
1.2.6 Sonderformen.....	12
1.2.6.1 Messerschilde.....	12
1.2.6.2 Schilde mit Mehrfach-Kreisquerschnitten.....	12
1.2.6.3 Gelenkschilde.....	12
1.2.7 Hinweise zu den einzelnen TVM-Typen mit Prinzipbildern.....	13
1.2.7.1 Tunnelbohrmaschinen (TBM).....	13
1.2.7.2 Doppelschildmaschinen (DSM).....	13
1.2.7.3 Ortsbrust ohne Stützung (SM-V1).....	14
1.2.7.4 Ortsbrust mit mechanischer Stützung (SM-V2).....	14
1.2.7.5 Ortsbrust mit Druckluftbeaufschlagung (SM-V3).....	14
1.2.7.6 Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung (SM-V4).....	14
1.2.7.7 Ortsbrust mit Erddruckstützung (SM-V5).....	15
1.2.7.8 Ortsbrust ohne Stützung (SM-T1).....	16
1.2.7.9 Ortsbrust mit Teilstützung (SM-T2).....	16
1.2.7.10 Ortsbrust mit Druckluftbeaufschlagung (SM-T3).....	16
1.2.7.11 Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung (SM-T4).....	16
1.2.7.12 Kombinationsmaschinen (KSM).....	17
1.3 Ursprünge und historische Entwicklung.....	17
2 Hohlraumstützung und Setzungen.....	25
2.1 Stützung der Ortsbrust.....	25
2.1.1 Natürliche Stützung.....	26
2.1.2 Mechanische Stützung.....	26
2.1.3 Druckluftstützung.....	27

2.1.4	Flüssigkeitsstützung	28
2.1.5	Erdstützung	32
2.1.6	Berechnungsmodelle	32
2.2	Stützung des Hohlraums im Schildbereich	37
2.3	Stützung des Hohlraums hinter dem Schild	38
2.4	Setzungen und Schadensklassifikationen	40
2.4.1	Empirische Ermittlung der Setzung	42
2.4.2	Numerische Methoden zur Setzungsberechnung	44
2.5	Hebungen und Kompaktierungen	47
3	Konstruktion und Berechnungsansätze	49
3.1	Konstruktionsteile des Schildes	49
3.2	Belastungen des Schildes	52
3.2.1	Belastung des Schildmantels	53
3.2.2	Belastung der Druckwand	55
3.2.3	Belastung durch Vortriebspresen	57
3.3	Berechnung der erforderlichen Vortriebspresenkraft	57
3.3.1	Vortriebswiderstände durch Reibungskräfte am Schildmantel	57
3.3.2	Vortriebswiderstände am Schneidenschuss	58
3.3.3	Vortriebswiderstände an der Ortsbrust durch Bühnen und Abbauwerkzeuge	60
3.3.4	Vortriebswiderstände bei Flüssigkeitsstützung, Erdstützung und Druckluftstützung	60
3.3.5	Vortriebswiderstände aus der Steuerung des Schildes	61
3.3.6	Zusammenstellung	62
3.4	Empirische Erfahrungswerte für die Dimensionierung der Schilde und der Schildvortriebspresen	62
3.5	Berechnungs- und Bemessungsgrundlagen	64
3.6	Vorschriften und Empfehlungen für die Berechnung der Schilde	64
4	Abbauwerkzeuge und Abbauverfahren	67
4.1	Abbauwerkzeuge	68
4.1.1	Handgeführte Werkzeuge	68
4.1.2	Schneidkanten	68
4.1.3	Schälmesser	69
4.1.4	Stichel, Schlitzmeißel, Rundschaftmeißel, Ripper	70
4.1.5	Schneidrollen, Disken	72
4.1.6	Räumer	74
4.2	Abbauverfahren	75
4.2.1	Vortrieb ohne Abbaugerät	76
4.2.2	Handabbau	77
4.2.3	Maschineller Abbau im Teilschnitt	77
4.2.4"	Maschineller Abbau im Vollschnitt	83
4.2.5	Hydraulischer Abbau	96
4.2.6	Sonstige Abbauverfahren	97

5	Fördereinrichtungen	.99
5.1	Aufbereitung zur Förderfähigkeit	.99
5.2	Austrag aus dem Ortsbrustbereich	.101
5.2.1	Offene Schilde	.101
5.2.2	Schilde mit Druckkammer	.102
5.3	Strecken- und Schachtförderung	.108
5.3.1	Offener Transport	.108
5.3.2	Rohrtransport	.110
5.4	Massenermittlung und Messeinrichtungen	.112
5.5	Separation	.115
5.5.1	Trennverfahren	.115
5.5.2	Trenngeräte	.116
5.6	Deponierfähigkeit des Aushubs	.123
6	Tunnelauskleidung	.125
6.1	Allgemeines	.125
6.2	Konstruktionsprinzipien für die Auskleidung eines Tunnels	.126
6.2.1	Einschalige und zweischalige Konstruktionen	.126
6.2.2	Wasserdichte und Wasser ableitende Konstruktionen	.127
6.3	Auskleidung mit Betontübbingen	.129
6.3.1	Allgemeines	.129
6.3.2	Konstruktionsvarianten	.131
6.3.2.1	Blocktübblinge mit rechteckigem Grundriss	.131
6.3.2.2	Hexagonaltübblinge	.135
6.3.2.3	Rhomboide und trapezoide Tübbingsysteme	.136
6.3.2.4	Spreiztübblinge	.137
6.3.2.5	Nachgiebige Auskleidungssysteme	.138
6.3.3	Fugenausbildung	.142
6.3.3.1	Längsfugen	.143
6.3.3.2	Ringfugen	.146
6.3.4	Tübbinge aus Stahlfaserbeton	.149
6.3.5	Ringspaltverfüllung	.150
6.3.5.1	Verfüllung mit Kies	.150
6.3.5.2	Mörtelverpressung	.151
6.3.6	Maßnahmen zur Abdichtung von Tunneln mit Tübbingauskleidung	.151
6.3.6.1	Dichtungsbänder	.151
6.3.6.2	Injektionen	.154
6.3.7	Herstellung	.154
6.3.8	Schäden	.155
6.3.8.1	Schäden bei der Ringmontage	.156
6.3.8.2	Schäden-beim Vortrieb der Maschine	.157
6.3.8.3	Schäden im Bereich der Schildschwanzdichtung	.157
6.3.8.4	Schäden nach Verlassen des Schildes	.158
6.3.8.5	Sanierung von Schäden	.158

6.4	Ortbetonschalen	159
6.4.1	Allgemeines	159
6.4.2	Ausführung	159
6.4.3	Herstellung	160
6.5	Injektionsbeton, Extrubeton	161
6.6	Spritzbetonschalen als endgültige Auskleidung	167
6.7	Statische Untersuchungen	168
7	Schildschwanzdichtung, Verpress- und Injektionsverfahren	169
7.1	Schildschwanzdichtungen	169
7.1.1	Kunststoffdichtungen	170
7.1.2	Stahlbürstendichtung	172
7.1.3	Äußere Schildschwanzdichtung	173
7.1.4	Elastisch gestützte Stirnschalung beim Extrudierverfahren	173
7.2	Verpressverfahren	174
7.2.1	Anforderungen	174
7.2.2	Konzeption	176
7.2.3	Verpresssysteme	177
7.2.4	Verpressgut	181
7.3	Injektionsverfahren zur Baugrundverbesserung	182
7.3.1	Maschinen- und Gerätetechnik	183
7.3.2	Injektionsmittel	185
7.3.3	Injektionsarbeiten Kanaltunnel	187
8	Offene Schilde	191
8.1	Schildkonstruktionen	191
8.1.1	Handsilde	192
8.1.2	Abbau im Teilschnitt	193
8.1.3	Abbau im Vollschnitt	195
8.2	Projekte	195
8.2.1	Beispiel: Eurotunnel - Unterquerung des Ärmelkanals, 1988 bis 1991	195
8.2.2	Tunnel Arrowhead	205
8.3	Doppelschilde [203].	210
8.3.1	Entwicklungen	210
8.3.2	Funktionsprinzip	211
8.3.3	Besonderheiten	212
8.3.3.1	Schildmantel und Bentonitschmierung	212
8.3.3.2	Teleskopschild	212
8.3.3.3	Beispiele	213
9	Druckluftschilde	217
9.1	Funktionsprinzip	218
9.2	Drucklufteinrichtungen	219
9.2.1	Druckluftschleusen	220
9.2.2	Druckluftversorgung	222
9.2.3	Druckluftverordnung	224

9.3	Luftbedarf	226
9.3.1	Luftbedarfsermittlung	226
9.3.2	Sicherheitsnachweise (Ausbläsersicherheit)	228
9.3.3	Sonderverfahren	230
9.4	Weiterentwicklungen	231
9.4.1	Druckluftschild mit druckfreiem Arbeitsraum und Vollschnittabbau	231
9.4.2	Druckluftschild mit druckfreien Arbeitsräumen und Teilschnittabbau	232
9.4.3	Membranschild	233
9.5	Einsatz von Druckluft bei anderen Schildtypen	234
9.6	Beispiele	234
9.6.1	Alter Elbtunnel bei den St.-Pauli-Landungsbrücken, 1907 bis 1911..	234
9.6.2	Energieversorgungstunnel unter der Kieler Förde, 1989/90.	236
10	Flüssigkeitsschilde	241
10.1	Entwicklungsgeschichte	241
10.2	Funktionsprinzip	244
10.3	Einsatzbereiche	246
10.4	Maschinentypen	247
10.4.1	Vollschnittmaschinen mit Flüssigkeitsstützung	247
10.4.1.1	Teilschnittmaschinen mit Flüssigkeitsstützung	251
10.5	Maschinen- und Verfahrenstechnik	253
10.5.1	Bodenabbau	253
10.5.2	Bodentransport	254
10.6	Beispiele	256
10.6.1	Westerschelde	256
10.6.2	Unterinntalbahn, Tunnel Münster/Wiesing, Hauptbaulos H3-4; Tunnel Jenbach/Wiesing, Hauptbaulos H8, 2007 bis 2009.	262
10.6.3	Vierte Röhre Elbtunnel	266
10.6.4	Chongming	269
11	Erddruckschilde	273
11.1	Entwicklungsgeschichte	273
11.2	Funktionsprinzip	274
11.2.1	Stützdruckmessung und -kontrolle	274
11.2.2	Bodenkonditionierung	277
11.2.3	Massen-Volumen-Kontrolle	278
11.3	Einsatzbereiche	280
11.4	Betriebsmodi und Ausbruchförderung	282
11.4.1	Offener Modus (Förderschnecke - Förderband)	283
11.4.2	Geschlossener Modus (Förderschnecke - Förderband)	283
11.4.3	Geschlossener Modus (hydraulischer Förderkreislauf)	284
11.4.4	EPB Modus (Förderschnecke - Förderband oder Förderschnecke - Dickstoffpumpe)	284
11.4.5	Offener Modus (Förderband)	284

11.5	Konstruktionselemente	286
11.5.1	Schneidrad	286
11.5.2	Lagerungs- und Antriebskonstruktionen	287
11.5.3	Abbaukammer	289
11.5.4	Schneckenförderer	290
11.5.5	Schaumkonditionierung	292
11.6	Beispiele	295
11.6.1	Katzenbergtunnel, Neubaustrecke Karlsruhe - Basel, 2005 bis 2007	295
11.6.2	Madrid M-30 (Bypass Sur Tunnel Nord)	299
11.6.3	Heathrow	305
11.6.4	DTSS Singapur	306
12	Kombinierte Schilde	311
12.1	Entwicklungsstrategien	313
12.1.1	Kombinierter Schild mit integrierten Komponenten für mehrere Betriebsarten	313
12.1.2	Baukastensysteme	315
12.2	Maschinenkonzepte	316
12.2.1	Mixschild	316
12.2.2	Polyschild	318
12.3	Beispiele	318
12.3.1	Grauholtztunnel, 1990 bis 1993	318
12.3.2	Zürich Thalwil Los 2.01	322
12.3.3	Socatop	326
13	Sonderschilde und Sonderverfahren	329
13.1	Messerschilde	329
13.1.1	Ortsbruststützung bei Messerschilden	331
13.1.2	Sicherungsarten bei Messerschilden	332
13.2	Multibrustschilde	336
13.2.1	Anordnung der Schneidräder bei Multibrustschilden	338
13.2.2	Tunnelsicherung bei Multibrustschilden	339
13.3	Aufwertungen von Schildtunneln	340
13.4	Vorpressungen	344
13.4.1	Rohrvorpressungen	344
13.4.2	Durchpressungen von Großquerschnitten	346
13.5	Neue Konzepte für den maschinellen Tunnelbau im Schildvortrieb	349
13.5.1	Schildmaschinen für flexible Querschnitte	349
13.5.2	Ultra Flexible Shield	351
13.5.3	Horizontal- und Vertikal-Schildmaschinen	351
13.5.4	Aufweitungsschilde	352
13.5.5	Rotationsschilde	352
13.5:j5	Shield Docking Method	353

14	Steuerbare Verfahren für den Mikrotunnelbau	357
14.1	Pilotrohrbohrverfahren	358
14.2	Pressbohrverfahren	359
14.3	Schildvortriebsverfahren	361
14.4	Englisches Mini-Tunnelbausystem	364
14.5	Neue Entwicklungen	365
15	Vermessung und Steuerung	369
15.1	Vermessung	370
15.1.1	Navigation mit Vortriebslaser und automatischer Zieltafel	371
15.1.2	Navigation mit Kreiselssystemen und Schlauchwasserwaage	372
15.1.3	Navigation mit Totalstation und Zieltafel	372
15.1.4	Navigation mit Totalstation und Prismen	374
15.2	Ringbaudesign und Ringaufolgeberechnung	374
15.3	Ringkonvergenzmessung	375
15.4	Steuerung	375
15.5	Weitergehende Aufgaben der Vermessung bzw. Datenerfassung	378
16	Arbeitssicherheit	381
16.1	Allgemeine sicherheitstechnische Anforderungen	382
16.2	Steuerstand	385
16.3	Sicherungs- und Schutzvorrichtungen	386
16.4	Bedienvorrichtungen und Steuersysteme	386
16.5	Schleppverbindung	389
16.6	Laserführung	389
16.7	Lüftung und die Kontrolle von Staub und Gas	389
16.8	Feuerschutzmaßnahmen	390
16.9	Lagerung von Sicherheitsausrüstung für das Personal	391
16.10	Wartung	391
16.11	Benutzerinformationen	392
16.12	Gefährdungsbeurteilung Maschineller Tunnelvortrieb [26].	392
17	Partnerschaftliche Vertragsmodelle und Bauabwicklung	405
17.1	Einleitung	405
17.2	Anforderungen an die Vertragsmodelle	406
17.3	Vertragsmodelle gemäß VOB	407
17.4	Zeit- und Kostentreiber	408
17.5	Performancekiller Unterverpreisung	409
17.6	Chancen und Risiken durch Partnering	410
17.7	Partnering - vertragliche Umsetzung	411
17.8	Partnering - gemeinsame Prozessoptimierung	412
18	Prozess-Controlling und Datenmanagement	415
18.1	Einleitung	415
18.2	Vorgehensweise	415
18.3	Datenmanagement	417

18.4	Soll-Ist-Vergleich	418
18.5	Soll-Prozessstruktur	419
18.6	Ist-Prozessanalyse	421
19	DAUB-Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen	423
19.1	Vorbemerkungen	423
19.2	Regelwerke	424
19.2.1	Nationale Regelwerke	424
19.2.2	Internationale Regelwerke	425
19.2.3	Vorschriften und sonstige Regeln	425
19.3	Definitionen und Abkürzungen	426
19.3.1	Definitionen	426
19.3.2	Abkürzungen	428
19.4	Anwendung und Struktur der Empfehlung	428
19.5	Typisierung der Tunnelvortriebsmaschinen	430
19.5.1	Einteilung von Tunnelvortriebsmaschinen (TVM)	430
19.5.2	Tunnelbohrmaschinen (TBM)	430
19.5.2.1	Tunnelbohrmaschinen ohne Schild (Gripper-TBM)	430
19.5.2.2	Erweiterungstunnelbohrmaschinen (ETBM)	432
19.5.2.3	Tunnelbohrmaschinen mit Schild (TBM-S)	432
19.5.3	Doppelschildmaschinen (DSM)	432
19.5.4	Schildmaschinen (SM)	432
19.5.4.1	Schildmaschinen mit Vollschnittabbau (SM-V)	433
19.5.4.2	Schildmaschinen mit Teilflächenabbau (SM-T)	435
19.5.5	Anpassbare Schildmaschinen mit kombinierter Verfahrenstechnik (KSM)	436
19.5.6	Sonderformen	436
19.5.6.1	Messerschilde	436
19.5.6.2	Schilde mit Mehrfach-Kreisquerschnitten	437
19.5.6.3	Gelenkschilde	437
19.5.7	Sicherung und Ausbau	437
19.5.7.1	Tunnelbohrmaschinen (TBM)	437
19.5.7.2	Tunnelbohrmaschinen mit Schild (TBM-S), Schildmaschinen (SM, DSM, KSM)	438
19.5.7.3	Vorauseilende Sicherung	440
19.5.7.4	Sicherung im Bereich der Tunnelvortriebsmaschine	440
19.6	Baugrund und Systemverhalten	440
19.6.1	Vorbemerkungen	440
19.6.2	Gebirgsstandfestigkeit und Ortsbruststützung	441
19.6.3	Bodenabbau	441
19.6.3.1	Verklebung	442
19.6.3.2	Verschleiß	442
19.6.3.3	Bodenkonditionierung	443
19.6.3.4	Bodenseparierung	444
19.6.3.5	Bodentransport und Deponierung	444
19.7	Umweltaspekte	445

19.8	Sonstige Projektrandbedingungen	447
19.9	Einsatzbereiche und Auswahlkriterien	448
19.9.1	Allgemeine Hinweise zur Anwendung der Tabellen	448
19.9.1.1	Haupteinsatzbereiche	448
19.9.1.2	Mögliche Einsatzbereiche	449
19.9.1.3	Kritische Einsatzbereiche	449
19.9.1.4	Klassifizierung im Lockergestein	449
19.9.1.5	Klassifizierung im Fels	449
19.9.2	Hinweise zu den einzelnen TVM-Typen	449
19.9.2.1	TBM (Tunnelbohrmaschine)	449
19.9.2.2	DSM (Doppelschildmaschinen)	450
19.9.2.3	SM-V1 (Vollschnittabbau, Ortsbrust ohne Stützung)	450
19.9.2.4	SM-V2 (Vollschnittabbau, Ortsbrust mit mechanischer Stützung)	450
19.9.2.5	SM-V3 (Vollschnittabbau, Ortsbrust mit Druckluftbeaufschlagung)	450
19.9.2.6	SM-V4 (Vollschnittabbau, Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung)	451
19.9.2.7	SM-V5 (Vollschnittabbau, Ortsbrust mit Erddruckstützung)	451
19.9.2.8	SM-T1 (Teilflächenabbau, Ortsbrust ohne Stützung)	451
19.9.2.9	SM-T2 (Teilflächenabbau, Ortsbrust mit mechanischer Teilstützung)	452
19.9.2.10	SM-T3 (Teilflächenabbau, Ortsbrust mit Druckluftbeaufschlagung)	452
19.9.2.11	SM-T4 (Teilflächenabbau, Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung)	452
19.9.2.12	KSM (kombinierte Verfahrenstechnik)	452
19.10	Anlagen	452
	Literaturverzeichnis	473
	Register	487