

**2. Auflage**

---

# **Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb**

---

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

# Inhaltsverzeichnis

Zuordnung der Autoren .....	VII
Vorwort zur 2. Auflage .....	IX
<b>1 Einführung .....</b>	<b>1</b>
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
<b>2 Hohlraumstützung und Setzungen .....</b>	<b>25</b>
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
<b>3</b>	<b>Konstruktion und Berechnungsansätze . . . . .</b>	<b>49</b>
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
<b>4</b>	<b>Abbauwerkzeuge und Abbaufahren . . . . .</b>	<b>67</b>
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	Abbaufahren . . . . .	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 Abbaufahren. . . . .	97

<b>5</b>	<b>Fördereinrichtungen</b> . . . . .	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
<b>6</b>	<b>Tunnelauskleidung</b> . . . . .	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	Blocktübbinge mit rechteckigem Grundriss . . . . .	131
6.3.2.2	Hexagonaltübbinge . . . . .	135
6.3.2.3	Rhomboide und trapezoide Tübbingsysteme . . . . .	136
6.3.2.4	Spreiztübbinge . . . . .	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
<b>7</b>	<b>Schildschwanzdichtung, Verpress- und Injektionsverfahren . . . . .</b>	<b>169</b>
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
<b>8</b>	<b>Offene Schilde . . . . .</b>	<b>191</b>
8.1	Schildkonstruktionen . . . . .	191
8.1.1	Handschilde . . . . .	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
<b>9</b>	<b>Druckluftschilde . . . . .</b>	<b>217</b>
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 (Ausblärsicherheit) . . . . .	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
<b>10</b>	<b>Flüssigkeitsschilde . . . . .</b>	<b>241</b>
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
<b>11</b>	<b>Erddruckschilde . . . . .</b>	<b>273</b>
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
<b>12</b>	<b>Kombinierte Schild</b> . . . . .	<b>311</b>
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	Grauholztunnel, 1990 bis 1993 . . . . .	318
12.3.2	Zürich Thalwil Los 2.01 . . . . .	322
12.3.3	Socatop . . . . .	326
<b>13</b>	<b>Sonderschilde und Sonderverfahren</b> . . . . .	<b>329</b>
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	Aufweitungen 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
13.5.6	Shield Docking Method . . . . .	353

---

<b>14</b>	<b>Steuerbare Verfahren für den Mikrotunnelbau</b> .....	357
14.1	Pilotrohrbohrverfahren .....	358
14.2	Pressbohrverfahren .....	359
14.3	Schildvortriebsverfahren .....	361
14.4	Englisches Mini-Tunnelbausystem .....	364
14.5	Neue Entwicklungen .....	365
<b>15</b>	<b>Vermessung und Steuerung</b> .....	369
15.1	Vermessung .....	370
15.1.1	Navigation mit Vortriebslaser und automatischer Zieltafel .....	371
15.1.2	Navigation mit Kreissystemen 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 Ringbaufolgeberechnung .....	374
15.3	Ringkonvergenzmessung .....	375
15.4	Steuerung .....	375
15.5	Weitergehende Aufgaben der Vermessung bzw. Datenerfassung .....	378
<b>16</b>	<b>Arbeitssicherheit</b> .....	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 Maschinelles Tunnelvortrieb [26] .....	392
<b>17</b>	<b>Partnerschaftliche Vertragsmodelle und Bauabwicklung</b> .....	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
<b>18</b>	<b>Prozess-Controlling und Datenmanagement</b> .....	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
<b>19</b>	<b>DAUB-Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen.</b> .....	<b>423</b>
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	Vorausseilende 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 Projekttrandbedingungen	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
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>473</b>
	<b>Register</b>	<b>487</b>