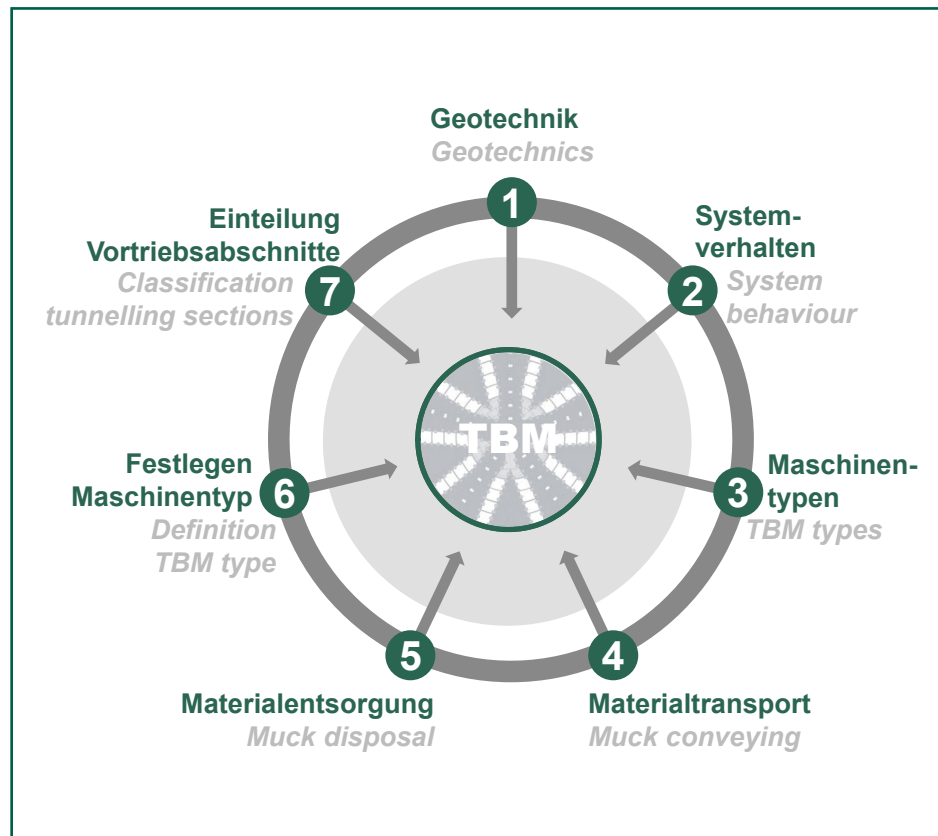




Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelbohrmaschinen

DAUB-Arbeitskreis

Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelbohrmaschinen

Herausgeber

Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB)
German Tunnelling Committee (ITA-AITES)
Mathias-Brüggen-Str. 41, 50827 Köln
Tel. +49 - 221 - 5 97 95-0
Fax +49 - 221 - 5 97 95-50
E-Mail: info@daub.de
www.daub-ita.de

Erarbeitet von dem Arbeitskreis „Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelbohrmaschinen“

Mitglieder des Arbeitskreises:

Dr.-Ing. Ulrich Maidl (Leitung)	MTC – Maidl Tunnelconsultants, Duisburg
Prof. Dr.-Ing. Dieter Kirschke	Beratender Ingenieur für Felsmechanik und Tunnelbau, Ettlingen
Prof. Dr.-Ing. Roland Leucker	Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen e. V. – STUVA –, Köln
Dr. techn. Klaus Rieker	Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, Frankfurt/Main
Prof. Dr.-Ing. Ludger Speier	ZPP Ingenieure AG, Bochum
Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes	Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb, Ruhr-Universität Bochum
Dr.-Ing. Gerhard Wehrmeyer	Herrenknecht AG, Schwanau

Externe Mitarbeiter des Arbeitskreises:

Prof. Dr.-Ing. Christoph Budach	Lehr- und Forschungsgebiet Geotechnik und Tunnelbau, Technische Hochschule Köln, vormals ELE Beratende Ingenieure GmbH, Essen
Dipl.-Ing. Jens Classen	Implenia Construction GmbH, München
Dr.-Ing. Britta Schößer	Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb, Ruhr-Universität Bochum
Dr.-Ing. Janosch Stascheit	MTC – Maidl Tunnelconsultants, Duisburg

März 2021

Inhalt

1	Vorbemerkung.....	5	6.3	Boden- und Felsabbau.....	20
2	Regelwerke, Vorschriften, Empfehlungen und Literatur	5	6.3.1	Verklebung.....	21
2.1	Nationale Regelwerke, Vorschriften, Gesetze und Empfehlungen	5	6.3.2	Verschleiß.....	21
2.1.1	Gesetze und Verordnungen zum Einsatz von Konditionierungsmitteln.....	6	6.4	Bodenkonditionierung beim EPB.....	23
2.1.2	Gesetze und Verordnungen zur Deponierung....	6	6.4.1	Schaum.....	24
2.1.3	Empfehlungen	6	6.4.2	Flüssige Konditionierungsmittel	24
2.2	Internationale Regelwerke, Vorschriften und Empfehlungen.....	6	6.5	Stützmedien beim Flüssigkeitsschild.....	24
2.3	Ergänzende Literatur	7	6.5.1	Bentonitsuspensionen	24
3	Definitionen und Abkürzungen	8	6.5.2	Suspensionen mit erhöhter Dichte (High Density Slurry)	25
3.1	Definitionen.....	8	6.6	Bodentransport und Trennung	26
3.2	Abkürzungen	11	6.6.1	Transport und Zwischenlagerung im Bereich der Tunnelbaustelle.....	26
4	Anwendung und Struktur der Empfehlung	12	6.6.2	Bodenseparierung.....	27
4.1	Analyse des geotechnischen Berichts.....	12	6.6.3	Transport von der Baustelle.....	27
4.2	Analyse des Systemverhaltens	12	6.7	Entsorgung des Aushubmaterials.....	28
4.3	Vorauswahl der Maschinentypen.....	13	6.7.1	Verantwortlichkeiten und gesetzliche Regelungen.....	28
4.4	Analyse des Materialtransports	13	6.7.2	Bodenverwertungskonzept	28
4.5	Analyse der Materialentsorgung	13	6.7.3	Veränderung der geotechnischen Eigenschaften des Aushubmaterials	29
4.6	Festlegung des Maschinentyps	13	6.7.4	Beseitigung	30
4.7	Verfahrensbezogene Einteilung in Vortriebsabschnitte	13	6.8	Ringspaltverfüllung	32
5	Typisierung der Tunnelbohrmaschinen	13	7	Auswahlkriterien und sonstige Projektrandbedingungen.....	32
5.1	Einteilung von Tunnelbohrmaschinen	13	7.1	Hinweise zur Anwendung der Auswahltabellen	32
5.2	TBM für den Bodenabbau im Vollschnitt....	13	7.1.1	Eingangsparameter für die Auswahltabellen....	32
5.2.1	Gripper-Tunnelbohrmaschinen (GRT)	13	7.1.2	Haupteinsatzbereiche	33
5.2.2	Einfachschild (Single Open Shield, OPS)	15	7.1.3	Erweiterte Einsatzbereiche	33
5.2.3	Doppelschildmaschinen (Double Shield, DOS)	15	7.1.4	Eingeschränkte Einsatzbereiche.....	33
5.2.4	Flüssigkeitsschilde (Slurry Shield, SLS)	16	7.1.5	Klassifizierung im Lockergestein	33
5.2.5	Erddruckschilde (Earth Pressure Balance Shield, EPB)	17	7.1.6	Klassifizierung im Fels.....	33
5.2.6	Variable-Density-Schilde (Variable Density Shield, VDS)	17	7.2	Sonstige Projektrandbedingungen	33
5.2.7	Hybrid-/Multimodeschilde (Hybrid Shield, HYS)	18	7.2.1	Planfeststellungsbeschluss, wasserrechtliche Vorgaben.....	33
5.2.8	Erweiterungstunnelbohrmaschinen (Extension TBM, XTS)	19	7.2.2	Setzungen und Gebäudeunterfahrungen.....	33
5.3	Schildmaschinen mit Bodenabbau im Teilschnitt.....	19	7.2.3	Arbeitssicherheit	33
5.3.1	Teilschnittschild mit Bagger (Excavator shields, EXS).....	19	Anhang 1	Anwendungsbeispiel	37
5.3.2	Teilschnittschild mit Schräme (Roadheader shields, RHS).....	19		Gewässerunterquerung mit zwei unterschiedlichen Lockergesteinsschichten	37
6	Baugrund- und Systemverhalten	20	Anhang 2	Prozessbezogene Kenngrößen.....	40
6.1	Vorbemerkungen	20	A 2.1	Prozessbezogene Kenngrößen für Lockergestein	41
6.2	Standfestigkeit und Ortsbruststützung	20	A 2.2	Prozessbezogene Kenngrößen für Festgestein.....	45
			Anhang 3	Einsatzbereiche und Auswahlkriterien ..	48
			A 3.1	Gripper-TBM (GRT).....	48
			A 3.2	Doppelschildmaschine (DOS)	49
			A 3.3	Einfachschild (OPS)	50
			A 3.4	Slurryschild (Flüssigkeitsschild) (SLS)	51
			A 3.5	Erddruckschildmaschine (EPB).....	52
			A 3.6	Variable-Density-Schild (VDS)	53
			A 3.7	Hybrid-/Multimodeschild (HYS).....	54
			A 3.8	Teilschnittmaschine mit Bagger (EXS) oder Schräme (RHS) ..	55

1 Vorbemerkung

Die vorliegende Empfehlung zeigt anhand von verfahrenstechnischen und geotechnischen Kriterien Entscheidungsgrundlagen zur Auswahl von Tunnelbohrmaschinen für den Einsatz in unterschiedlichem Baugrund (Fels und Boden) auf. Dabei werden auch bestehende Zusammenhänge zwischen den geotechnischen, örtlichen und umwelttechnischen Randbedingungen sowie der Verfahrens- und Maschinentechnik berücksichtigt. Sie stellt damit ein Hilfsmittel für die projektspezifische Analyse und Entscheidungsfindung zur Auswahl einer geeigneten Tunnelbohrmaschine dar.

Insbesondere ergänzt die vorliegende Empfehlung die Vergabe- und Vertragsordnung für „Untertagebauarbeiten“ DIN 18312 [18]. Für die Auswahl von Vortriebsmaschinen für Rohrvortriebe wird zusätzlich auf das Arbeitsblatt DWA-A 125 [3] der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. verwiesen.

Die Bezeichnung der vorliegenden Empfehlung wurde im Rahmen der Überarbeitung in „Empfehlung zur Auswahl von Tunnelbohrmaschinen“ geändert, um sich an den internationalen Bezeichnungen zu orientieren. Die zuvor verwendete Bezeichnung „Tunnelvortriebsmaschine“ für Lockergesteinsmaschinen entfällt daher in dieser Empfehlung. Zudem wurden die Bezeichnungen der Tunnelbohrmaschinen dahingehend angepasst, dass sie kohärent zum internationalen Sprachgebrauch genutzt werden können.

2 Regelwerke, Vorschriften, Empfehlungen und Literatur

Für die Auswahl von Tunnelbohrmaschinen sind insbesondere folgende Unterlagen zu berücksichtigen.

2.1 Nationale Regelwerke, Vorschriften, Gesetze und Empfehlungen

- [1] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING) der Bundesanstalt für Straßenwesen, Teil 5 Tunnelbau Abschnitt 3 Maschinelle Schildvortriebsverfahren, Stand 2018/01.
- [2] Richtlinie 853 „Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten“ der DB Netz AG, 9. Aktualisierung vom 01.09.2018:
 - a. Modul 853.2001 „Standortsicherheitsuntersuchungen“ (mit Regelungen zu den Einwirkungen aus Pressenkräften von TVM).
 - b. Modul 853.4001 „Allgemeine Grundsätze für Vortrieb, Sicherung und Ausbau“.
 - c. Modul 853.4005 „Tübbingausbau“ (u. a. mit Regelungen zur Ringspaltverpressung).
 - d. Modul 853.6001 „Baudurchführung, bautechnische Unterlagen und Dokumentation“ (mit Regelungen zur Kontrolle von Schildvortriebsarbeiten).
- [3] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.: Arbeitsblatt DWA-A 125: Rohrvortrieb und verwandte Verfahren.
- [4] Verordnung über Arbeiten in Druckluft (Druckluftverordnung).
- [5] Regeln zum Arbeitsschutz auf Baustellen (RAB 25): Konkretisierung zur Druckluftverordnung.
- [6] DIN EN 16191:2014-09: Tunnelbaumaschinen – Sicherheitstechnische Anforderungen; Deutsche Fassung EN 16191:2014.
- [7] DIN EN 12110:2014-10: Tunnelbaumaschinen – Druckluftschleusen – Sicherheitstechnische Anforderungen; Deutsche Fassung EN 12110:2014.
- [8] DIN 4020:2010-12: Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-2.
- [9] DIN EN ISO 14688-1:2018-05: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14688-1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14688-1:2018.
- [10] DIN EN ISO 14689:2018-05: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels (ISO 14689:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14689:2018.
- [11] DIN EN ISO 17892-12:2018-10: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 12: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen (ISO 17892-12:2018); Deutsche Fassung EN ISO 17892-12:2018.
- [12] DIN EN ISO 17892-11:2019-05: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 11: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit (ISO 17892-11:2019); Deutsche Fassung EN ISO 17892-11:2019.

- [13] DIN 18130-2:2015-08: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts – Teil 2: Feldversuche.
- [14] DIN 18196:2011-05: Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke.
- [15] DIN 1054:2010-12: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1.
- [16] DIN EN 1997-1:2014-03: Eurocode 7 – Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 1997-1:2004 + AC:2009 + A1:2013.
- [17] DIN EN 1997-1/NA:2010-12: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln.
- [18] DIN 18312:2019-09: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Untertagebauarbeiten .
- [19] Recommendations for Face Support Pressure Calculations for Shield Tunnelling in Soft Ground, Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB), 2016.
- [26] Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG).
- [27] Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV).
- [28] Deponieverordnung (DeponieV).
- [29] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau: Merkblatt zur Herstellung, Wirkungsweise und Anwendung von Mischbindemitteln, R 2, Ausgabe 2012.
- [30] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau: Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau, W1, Ausgabe 2012.

2.1.1 Gesetze und Verordnungen zum Einsatz von Konditionierungsmitteln

- [20] Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen (VwVwS), 1999.
- [21] Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Änderung der Verwaltungsvorschrift wassergefährdender Stoffe, 2005.
- [22] Gesetz über die Umweltverträglichkeit von Wasch- und Reinigungsmitteln (WRMG), 2007.

2.1.2 Gesetze und Verordnungen zur Deponierung

- [23] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA); Mitteilung M20; Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln (Stand 6. November 2003).
- [24] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts, 2009.
- [25] Deutscher Bundestag: Verordnung zur Umsetzung der Ratsentscheidung vom 19.12.2002 zur Festlegung von Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien, 2006.

2.1.3 Empfehlungen

- [31] „Mindestmaßnahmen zur Vermeidung von Personenschäden bei den wesentlichen Gefährdungen Brand, Gaseintritt, Wassereintrich sowie Verbruch/Niederbruch“ (Anhang A des Leitfadens für Planung und Umsetzung eines Sicherheits- und Gesundheitsschutzkonzeptes auf Untertagebaustellen, erarbeitet vom DAUB-Arbeitskreis „Ereigniskonzepte“), Stand 09.02.2007.
- [32] DAUB-Empfehlung „Konfliktarmer Bauvertrag im Tunnelbau“, April 2020.

2.2 Internationale Regelwerke, Vorschriften und Empfehlungen

- [33] Leitfaden für Planung und Umsetzung eines Sicherheits- und Gesundheitsschutzkonzeptes auf Untertagebaustellen. Herausgeber: DACH; DAUB; FSV; SIA/FGU, 2007.
- [34] SIA 198:2007 (SN 507198) Allgemeine Bedingungen Untertagebau; Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Ausgabe 11/2007.
- [35] ÖNORM B 2203-2:2005-01-01 Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm Teil 2: kontinuierlicher Vortrieb, Ausgabe 2005.
- [36] Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb der ÖVGG, Ausgabe 2013.
- [37] Recommendations on the development process for mined tunnels Working group No. 14 Mechanized Tunnelling ITA, 2016.
- [38] BS 6164:2011, Code of Practice for safety in tunnelling in the construction industry.
- [39] Detergenzienverordnung, Verordnung (EG) Nr. 648/2004 des europäischen Parlamentes und des Rates (2004).

- [40] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), guidelines 201-203; 301 B und 302 B: Freshwater Alga and Cyanobacteria, Growth Inhibition Test, 2011; Daphnia sp. Acute Immobilisation Test, 2004; Fish, Acute Toxicity Test, 1992; Ready Biodegradability, CO2 Evolution Test, 1992; Inherent Biodegradability: Zahn-Wellens/EMPA Test, 1992).
- [41] NF P94-430-1:2000-10-01: Gestein – Bestimmung der Schleifbarkeit von Gestein – Teil 1 : Ritzprobe mittels Spitzhacke.
- [42] NF P18-579:2013-02-09: Gesteinskörnungen – Bestimmung der Koeffizienten der Abrasivität und Mahlbarkeit.
- [43] ASTM D6032/D6032-17: Standard Test Method for Determining Rock Quality Designation (RQD) of Rock Core (2017).
- [44] Richtlinien zum Risikomanagement von Tunnelprojekten („The Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works“) der International Tunnelling Insurance Group (ITIG) (2006).
- [45] Bewirtschaftung und Wiederverwertung von Ausbruchmaterial – Inventar Schweizer Großprojekte, FGU Fachgruppe für Untertagebau, Esslingen (CH) 2016.
- [46] Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr (FSV): RVS 09.01.51 Sicherheit und Gesundheitsschutz auf Untertagebaustellen, 2017.
- [47] Thewes, M.; Hollmann, F. (2016): Assessment of clay soils and clay-rich rock for clogging of TBMs. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 57, pp. 122-128.
- [48] Anagnostou, G.; Kovari, K. (1994): The Face Stability of Slurry-shield-driven Tunnels. In: Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 9, No. 2, S. 165–174.
- [49] Bayer, L.; Diete, P.; Thewes, M.; Schöber, B.; Seegers, J.; Tirpitz, E.-R.; Fahlbusch, D.; Wehrmeyer, G. (2016): Suspensionen mit erhöhter Dichte anstelle von Ballastierung beim Hydroschildvortrieb U5 Berlin. In: Taschenbuch für den Tunnelbau 2016, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.), Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 39-80.
- [50] Burger, W.; Straesser, M.; Schöber, B. (2015): Variable Density Maschine: Eine hybride Schildmaschine aus Erddruck- und Flüssigkeitschild. In: Taschenbuch für den Tunnelbau 2015, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, S. 188-229.
- [51] Kilchert, M.; Karstedt, J. (1984): Schlitzwände als Trag- und Dichtungswände – Standsicherheitsberechnungen von Schlitzwänden nach DIN 4126. Volume 2. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin/Köln.
- [52] Praetorius, S.; Schöber, B. (2016): Bentonithandbuch – Ringspaltschmierung für den Rohrvortrieb. Verlag Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin.
- [53] Straesser, M.; Klados, G.; Thewes, M.; Schöber, B. (2016): Entwicklung des LDSM und HDSM Konzepts für die Variable Density-TBM. In: Fachzeitschrift Tunnel 7, S. 18-37.
- [54] Maidl, B.; Herrenknecht, M.; Maidl, U.; Wehrmeyer, G. (2011): Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- [55] Thuro, K.; Singer, J.; Käsling, H.; Bauer, M. (2006): Abrasivitätsuntersuchungen an Lockergesteinen im Hinblick auf die Gebirgslösung, Beiträge zur 29. Baugrundtagung 2006, S. 283-290.
- [56] Thuro, K.; Käsling, H. (2009): Klassifizierung der Abrasivität von Boden und Fels, Geomechanik und Tunnelbau, 2, S.179-188.
- [57] Zum Gahr, K.-H. (1987): Microstructure and Wear of Materials, Elsevier.

2.3 Ergänzende Literatur

3 Definitionen und Abkürzungen

3.1 Definitionen

Abrasivität	Die Abrasivität bezeichnet die geologisch bedingten Einflüsse auf den Verschleiß von Werkzeugen. Zur Charakterisierung der Abrasivität werden im Hartgestein häufig neben der mineralogischen Zusammensetzung und der Festigkeit der CAI-Test (CERCHAR Abrasivity Index) und in Lockergesteinen oftmals der Test des „Laboratoire Central des Ponts et Chaussées“ (LCPC-Test) verwendet. Im Zuge der Überarbeitung der DIN 18312 sind für Untertagebauarbeiten die Werte A_{IN} , A_{BR} und B_R aus den oben genannten Versuchen im Rahmen des Geotechnischen Berichts anzugeben.
Aktive Ortsbruststützung	Messtechnisch überwachte Stützung der Ortsbrust durch ein geeignetes Medium (beispielsweise Stützflüssigkeit oder Erdbrei) auf der Grundlage einer Stützdruckberechnung.
äquivalenter Quarzgehalt (äQu)	Ein Maß für die zur Bestimmung der Abrasivität entscheidende Mineralhärte eines Lockergesteins.
Aufbruchssicherheit	Sicherheit gegen Aufbruch des überlagernden Baugrundes aufgrund des Ortsbruststützdruckes.
Ausbläser	Unkontrolliertes Entweichen der Druckluft an die Geländeoberfläche oder Gewässersohle unter Verlust der Stützwirkung.
Ballastierung	Herstellung einer zusätzlichen Belastung des Bodens in Vortriebsbereichen mit geringer Bodenüberlagerung, z. B. durch Aufschüttungen.
Baugrundprofil	Geometrische Annahmen über den Schichtenverlauf (DIN 4020).
Baugrundverhalten	Verhalten des ungestützten Hohlraumes ohne Berücksichtigung des Bauverfahrens. Das Baugrundverhalten wird durch die mechanischen, hydraulischen und chemischen Eigenschaften des Materials sowie seines Gefüges bestimmt. Im Fels wird das Baugrundverhalten auch als Gebirgsverhalten bezeichnet. Hier sind beispielsweise das Trennflächengefüge, die Spannungs- und Bergwassersituation sowie die Hohlraumform und -größe entscheidend.
Beseitigung	Teil der Entsorgung von Aushubmaterial. Material, welches sich nicht zur Verwertung eignet, wird oftmals gemäß Deponieverordnung (DepV) deponiert.
Bohrbarkeit	Von den Gesteinseigenschaften abhängige Möglichkeit, Gestein im Vollschnitt mit einer Tunnelbohrmaschine (TBM) zu lösen. Wichtige verfahrenstechnische Parameter zur quantitativen Beschreibung der Bohrbarkeit sind die Penetration und der Anpressdruck.
Bohrkopf	Ein mit Rollenmeißeln bestückter, für den vollflächigen Abbau bestimmter Werkzeugträger bei Hartgesteinsmaschinen. Die Förderung des Aushubmaterials erfolgt über rückwärtige Schurren ins Bohrkopfszentrum mit der Übergabe auf ein Förderband.
Brustplattenverbau	Zusätzliche mechanische Stützung der Ortsbrust mit verfahrbaren Platten.
CAI (CERCHAR Abrasivity Index)	Wert des gleichnamigen Testverfahrens zur Charakterisierung der Abrasivität von Festgestein. Die Durchführung erfolgt gemäß NF P94-430-1:2000-10-01. Im Zuge der normgerechten Untersuchungen wird der Abriebindex A_{IN} bestimmt.
Deponierung	Möglichkeit der Beseitigung von Aushubmaterial.
Druckluftbeaufschlagung	Die Abbaukammer wird zur Verdrängung des Grundwassers mit Druckluft beaufschlagt. Eine Stützung der Ortsbrust gegen Erddruck ist dabei nur in nahezu undurchlässigen Böden oder bei Versiegelung der Ortsbrust z. B. durch einen Filterkuchen möglich.

Entsorgung	Oberbegriff für Verwertung und Beseitigung von Aushubmaterial .
Fingerschild	Der aufgelöste Schildmantel hinter dem Bohrkopf.
Gebirgsverhalten	Siehe Baugrundverhalten.
Gelenkschild	Schildmaschine mit mehreren Schildteilen, die mittels aktiver Steuerzylinder oder passiv geschalteter Hydraulikzylinder zur Verbesserung der Kurvenfahrt gelenkig verbunden sind.
Geotechnischer Bericht	Darstellung der Baugrunduntersuchungen und charakteristischen Werte für die Kenngrößen von Boden und Fels nach DIN 4020.
Geschlossener Modus	Im geschlossenen Modus wird die Abbaukammer einer Tunnelbohrmaschine unter einem mess- und regeltechnisch kontrollierbaren Überdruck gehalten. Die Druckbeaufschlagung erfolgt entweder über eine Flüssigkeit, einen Erdbrei oder über Druckluft.
Gripper	Seitliche, radial wirkende Verspanneinrichtung bei Hartgesteinsmaschinen, um die Vortriebskräfte in das umliegende Festgestein zu übertragen, der Verrollung entgegenzuwirken und die TBM zu stabilisieren.
Homogenbereich	Ein begrenzter Bereich, bestehend aus einzelnen oder mehreren Gesteinsschichten, der für Untertagebauarbeiten vergleichbare Eigenschaften aufweist (DIN 18312). Das Tunnelprojekt wird entlang seiner Trasse in Homogenbereiche unterteilt.
LCPC-Abrasivitäts-Koeffizient (LAK)	Wert des gleichnamigen Testverfahrens zur Charakterisierung der Abrasivität von Lockergesteinen oder gebrochenem Fels benannt nach dem „Laboratoire Central des Ponts et Chaussées“. Die Durchführung erfolgt gemäß NP-P18-579:2013-02-09. Im Zuge der normgerechten Untersuchungen werden der Abriebwert A_{BR} und der Brechbarkeitskoeffizient B_R bestimmt.
Mechanische Ortsbruststützung	Stützung der Ortsbrust mit Verbauplatten.
Öffnungsverhältnis des Schneidrads	Prozentuales Verhältnis der Öffnungen im Schneidrad an der Gesamtfläche der Ortsbrust.
Offener Modus	Im offenen Modus ist die Abbaukammer nicht druckbeaufschlagt.
Penetration	Eindringtiefe der Abbauwerkzeuge in den Baugrund pro Umdrehung des Schneidrads.
Primärverschleiß	Abnutzung der Abbauwerkzeuge allein durch den Lösevorgang an der Ortsbrust; beeinflusst durch die Festigkeit, Klüftung und Abrasivität des Gesteins.
Ringspalt	Hohlraum, der verfahrensbedingt zwischen der Ausbruchlaibung (Baugrund) und der erdseitigen Tübbingoberfläche entsteht.
Ringspaltverfüllung	Verfüllung des Ringspalts mit geeignetem Verfüllmaterial zur Gewährleistung der Kraftübertragung und zur Verminderung von Oberflächensetzungen.
RQD-Index (Rock-Quality-Designation-Index)	Wert zur Charakterisierung der Felsqualität auf Basis der Summe der Länge von Bohrkernstücken größer 10 cm an der Gesamtprobenlänge der genommenen Bohrkerns gemäß ASTM D6032-02.
RMR (Rock Mass Rating)	Wert zur Gebirgsklassifizierung auf Basis von 6 Gebirgsparametern.
Rollenmeißel (Schneidrolle, Diske)	Abbauwerkzeug mit rotierendem und gehärtetem Schneidring, welches das Gefüge des Gesteins an der Ortsbrust zerstören kann.
Schildmaschinen	Eine Tunnelbohrmaschine mit vollständigem Schildmantel, in dessen Schutz der Tunnelausbau errichtet wird.

Schneidrad	Mechanische Vorrichtung zum vollflächigen Abbau des Tunnelquerschnittes im Lockergestein. Der Abbau erfolgt rotierend, das Design und die Werkzeugbestückung des Schneidrades werden auf die Baugrundeigenschaften abgestimmt. Das gelöste Aushubmaterial sammelt sich in der Sohle und wird von dort weiter entgegen der Vortriebsrichtung abtransportiert.
Sekundärverschleiß	Verschleiß, der durch die reibende und schleifende Einwirkung des bereits gelösten Baugrunds entsteht. Schlechter Materialfluss und Verklebung erhöhen den Sekundärverschleiß.
Separation	Bezeichnung für die Trennung von Flüssigkeit und Feststoff bei der hydraulischen Förderung.
Standfestigkeit	Die Standfestigkeit beschreibt die Stabilität des Gebirges unter Berücksichtigung des Bauverfahrens. Der Nachweis der Standfestigkeit ist rechnerisch zu erbringen.
Standzeit des Gebirges	Mögliche Zeit, die das Gebirge ungestützt standfest ist. Maßgebend für die abschließende Beurteilung und Auswahl der Tunnelbohrmaschine bleibt allerdings der rechnerische Nachweis der Ortsbruststabilität und Standsicherheit der Ausbruchlaibung.
Systemverhalten	Verhalten des Gesamtsystems aus Baugrund/Gebirge und Tunnelbohrmaschine.
TBM (Tunnelbohrmaschine)	Für den Vortrieb im Lockergestein oder im Fels.
Überschnitt	Differenzmaß zwischen Bohr- und Schildradius gemessen an der Schildschneide. Der Überschnitt dient z. B. der Verbesserung der Kurvenfahrt, der Reduzierung der Mantelreibung oder der Gebirgsentspannung.
Verklebung	Anhaften von Abraum an Abbauwerkzeugen sowie Blockieren von Förderwegen und -einrichtungen in tonhaltigem Gebirge durch Adhäsion, Brückenbildung, Kohäsion und geringe Dispersionsfähigkeit.
Verschleiß	Oberbegriff von Sekundär- und Primärverschleiß.
Verschleißprognose	Im Vorfeld von Tunnelvortrieben üblicherweise durchgeführte Abschätzung des Primärverschleißes.
Verspannplatten	Siehe Gripper.
Verwertung	Möglichkeit der Entsorgung des Aushubmaterials durch Einbau in geeignete Bauwerke. Dabei sind die LAGA-Klassifikationen sowie geotechnischen Eigenschaften zu beachten.
Vortriebsabschnitt	Ein Teilabschnitt eines Tunnels, der unter planerischen Aspekten eine Einheit darstellt. Ein Vortriebsabschnitt kann mit einem Homogenbereich übereinstimmen, aber auch Teil eines Homogenbereichs sein. Für jeden Vortriebsabschnitt wird eine Prognose der Anteile der Vortriebsklassen erstellt.
Vortriebsklasse	Klassifizierung aufgrund der Art der Stützung bzw. Sicherung der Ortsbrust (nach DIN 18312:2019). Im weiteren Sinne wird der Begriff manchmal projektintern zur Klassifizierung bestimmter Vortriebssituationen (z. B. unterschiedlicher Stützdruckniveaus oder Konditionierungsanforderungen) verwendet. Diese erweiterte Bedeutung wird im vorliegenden Dokument nicht angewandt, da hierfür der Begriff des Vortriebsabschnitts definiert wurde.
Vorübergehende Standsicherheit	Für den Bauzustand kann der Nachweis der Standsicherheit mit reduzierten Sicherheitsbeiwerten bei den Einwirkungen geführt werden.

3.2 Abkürzungen

ABR	Abriebwert
A_{IN}	Abriebindex
B_R	Brechbarkeitskoeffizient
CAI	CERCHAR-Abrasivitätsindex (CERCHAR Abrasivity Index)
DepV	Deponieverordnung
DOS	Doppelschildmaschine
EPB	Earth Pressure Balance (Erddruck-)Schild
EXS	Teilschnitt-Schildmaschine mit Bagger
GV	Gebirgsverhalten
GRT	Gripper-TBM
HYS	Hybridschildmaschine
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LAK	LCPC-Abrasivitäts-Koeffizient
OPS	(offener) Einfachschild
RHS	Teilschnitt-Schildmaschine mit Fräse
RMR	Rock Mass Rating
RQD	Rock Quality Designation
SLS	Slurryschildmaschine
SV	Systemverhalten
TBM	Tunnelbohrmaschine
VDS	Variable-Density-Schildmaschine
XTS	Erweiterungstunnelbohrmaschinen
ZFSV	Zeitweise fließfähiger, selbstverdichtender Verfüllbaustoff

4 Anwendung und Struktur der Empfehlung

Für die Auswahl einer Tunnelbohrmaschine (TBM) wird eine Vorgehensweise in sieben Schritten entsprechend **Abbildung 1** empfohlen. Die Schritte bzw. die jeweiligen Ergebnisse sind nachfolgend erläutert.

4.1 Analyse des geotechnischen Berichts

Der geotechnische Bericht (nach DIN EN 1997 [16, 17] bzw. DIN 4020 [8]) enthält einen Vorschlag zur Einteilung in Homogenbereiche und sollte eine Darstellung der Homogenbereiche im geotechnischen Längsschnitt enthalten. Ein Homogenbereich besteht aus einzelnen oder mehreren Boden- oder Felsschichten, die für die Untertagebauarbeiten vergleichbare Eigenschaften aufweisen. Maßgebend für einen TBM-Vortrieb ist die Situation an der Ortsbrust. Hierbei können auch gemeinsam im Tunnelquerschnitt abzu-

bauende Schichten mit unterschiedlichen Eigenschaften einen Homogenbereich bilden. Gegebenenfalls sind auch andere als die mechanischen Eigenschaften bei der Definition der Homogenbereiche zu berücksichtigen.

Eventuell ergeben sich aus der Analyse des geotechnischen Berichts bereits mögliche Vortriebsklassen (gemäß DIN 18312 [18]) und/oder vorläufige Vortriebsabschnitte. Die endgültigen Vortriebsabschnitte werden aber erst im Zuge der Festlegung auf den Maschinentyp abschließend gewählt.

4.2 Analyse des Systemverhaltens

Das Systemverhalten umfasst die Interaktion zwischen Tunnelbohrmaschine und Baugrund. Dazu zählen insbesondere Nachweise zur Stabilität der Ortsbrust und der Ausbruchlaibung sowie Setzungsrechnungen. Weitere Baugrundaspekte sind die Bohrbarkeit, Verschleißprognosen, Beurteilung von Verklebungen und Materialfluss. Neben den Baugrundeigenschaf-

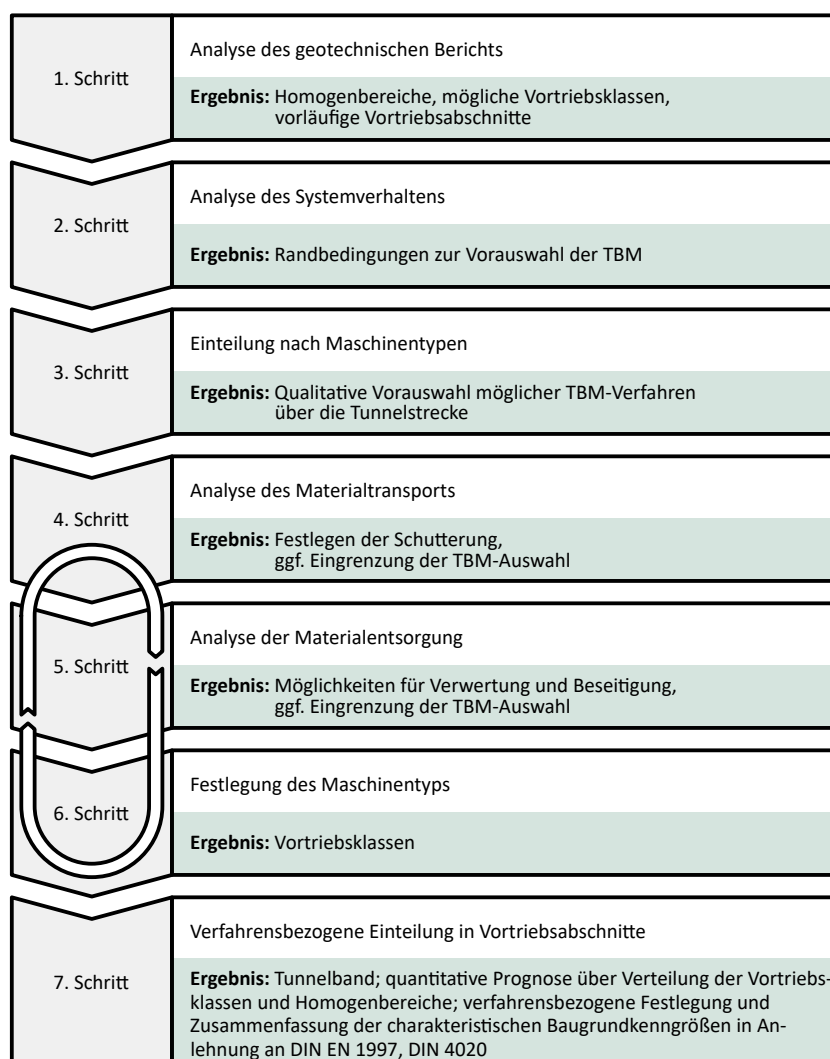


Abbildung 1 Ablaufschema zur Anwendung der vorliegenden Empfehlung

ten spielt auch die ober- und unterirdische Bebauung und Infrastruktur im Einflussbereich des Tunnels eine wichtige Rolle. Durch diese können sich erweiterte Sicherheitsanforderungen und ggf. Restriktionen in der Anwendung bestimmter Maschinentypen ergeben. Nach der Analyse des Systemverhaltens können Basisanforderungen an den Maschinentyp formuliert werden. Hinweise enthalten die **Kapitel 6.2 bis 6.5** dieser Empfehlung.

4.3 Vorauswahl der Maschinentypen

Nach dem Prinzip des Ausschlussverfahrens können geeignete Maschinentypen für einzelne Homogenbereiche vorselektiert werden, so dass eine qualitative Vorauswahl möglicher TBM-Verfahren über die Tunnelstrecke möglich ist. **Kapitel 5** und die **Anhänge** der vorliegenden Empfehlung geben Hinweise zur Bezeichnung und Auswahl der Maschinentypen.

4.4 Analyse des Materialtransports

Für die vorselektierten Maschinentypen ist der Materialtransport unter Berücksichtigung von Verfahrenstechnik, Verschleiß, Verklebung, Konditionierung und Materialentsorgung zu untersuchen. Weitere Hinweise zum Materialtransport enthält **Kapitel 6.6**.

4.5 Analyse der Materialentsorgung

Für die vorselektierten Maschinentypen und unter Berücksichtigung des Materialtransportes ist die Materialentsorgung (Verwertung oder Beseitigung) zu untersuchen. Umwelttechnische und wirtschaftliche Aspekte sind in die Untersuchungen einzubeziehen. Hinweise enthält **Kapitel 6.7**.

4.6 Festlegung des Maschinentyps

Auf Basis der zuvor durchgeführten Analysen zum Materialtransport bzw. zur Materialentsorgung erfolgt eine Festlegung des bestmöglichen Maschinentyps unter Betrachtung von projektspezifischen und wirtschaftlichen Fragestellungen bzw. Risiken. Als Ergebnis dieses Schritts werden auch die Vortriebsklassen nach DIN 18312 [18] festgelegt.

4.7 Verfahrensbezogene Einteilung in Vortriebsabschnitte

Zum Abschluss der Auswahl von Tunnelbohrmaschinen soll auf Basis der durchgeführten Analysen und Festlegungen der Vortriebsklassen (gemäß DIN 18312:2019 [18]) die Tunnelstrecke in Vortriebsabschnitte unterteilt werden, die sich z. B. aufgrund unterschiedlicher Homogenbereiche, Betriebsmodi,

Abrechnungsgrundlagen oder sonstiger Randbedingungen unterscheiden. Für einen Vortriebsabschnitt sind der Maschinentyp sowie der Betriebsmodus festzulegen. Für den geschlossenen Modus sollte zusätzlich der Betriebsdruckbereich angegeben werden. Ausführliche Hinweise dazu finden sich in **Kapitel 6**.

Für die Darstellung der Vortriebsabschnitte eignet sich besonders der tunnelbautechnische Längsschnitt, der auch als technische und kalkulatorische Vertragsgrundlage dienen kann und deshalb sämtliche vertragsrelevanten geotechnischen bzw. festgelegten Parameter enthalten sollte. Im Fall einer BIM-basierenden Planung sollten die entsprechenden Parameter im Modell verknüpft sein. Als Ergebnis dieses Schrittes sollen daher das Tunnelband, die quantitative Prognose über die Verteilung der Vortriebsklassen, die Vortriebsabschnitte sowie eine verfahrensbezogene Festlegung und Zusammenfassung der charakteristischen Baugrundkenngößen in Anlehnung an DIN EN 1997 [16, 17] bzw. DIN 4020 [8] zusammengeführt werden.

5 Typisierung der Tunnelbohrmaschinen

5.1 Einteilung von Tunnelbohrmaschinen

Tunnelbohrmaschinen (TBM) bauen entweder den gesamten Tunnelquerschnitt mit einem Bohrkopf oder Schneidrad im Vollschnitt oder teilflächig durch geeignete Lösevorrichtungen ab. Eine systematische Einteilung der Tunnelbohrmaschinen zeigt **Tabelle 1**.

5.2 TBM für den Bodenabbau im Vollschnitt

5.2.1 Gripper-Tunnelbohrmaschinen (GRT)

Gripper-Tunnelbohrmaschinen (**Abbildung 2**) werden im Festgestein mit mittlerer bis hoher Standzeit eingesetzt. Dabei erfolgt keine aktive Stützung der

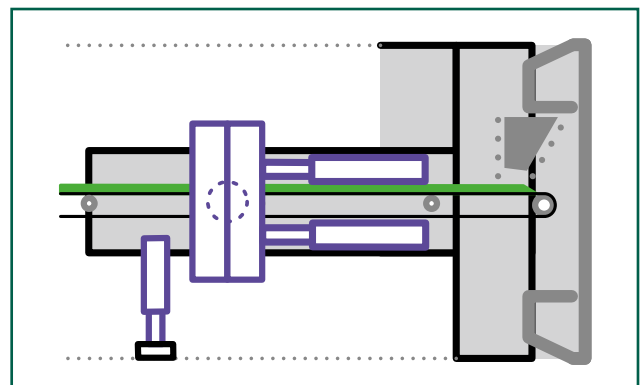


Abbildung 2 Systemskizze GRT

Tabelle 1 Einordnung von Tunnelbohrmaschinen

Bezeichnung			Betriebsmodi			Übliche Vortriebsklassen gemäß DIN 18312:2019*
deutsch	englisch	kurz	Open (OM)	Closed (CM)	Transition (TM) Teilfüllung	
Vollschnittmaschinentypen						
Gripper-TBM	Gripper TBM	GRT	X	-	-	VS1
Einfachschild	Single Shield	OPS	X	-	-	VS1
Doppelschild	Double Shield	DOS	X	-	-	VS1
Flüssigkeitsschild	Slurry Shield	SLS	X	X	X	VS2
Erddruckschild	Earth Pressure Balance Shield	EPB	X	X	X	VS3
Variable-Density-Schild	VD Shield	VDS	X	X	X	VS2/VS3
Hybrid-/Multimodeschilde	Hybrid Shield	HYS	X	X	X	VS2/VS3
Erweiterungs-TBM	Extension TBM	XTS	X	-	-	VS1
Teilschnittmaschinentypen						
TS-Schilde mit Bagger	Excavator Shield	EXS	X	(X)		VS1
TS-Schilde mit Schräme	Roadheader Shield	RHS	X	(X)		VS1

*Aufgrund der komplexen und ineinander übergehenden Verfahrenstechnik der verschiedenen Tunnelbohrmaschinen, insbesondere bei den Maschinen mit Schild, werden im Rahmen der vorliegenden Empfehlung die Vortriebsklassen der Schildmaschinen im Vollschnittabbau gemäß DIN 18312:2019 genutzt. Eine Angabe von Vortriebsklassen der Tunnelbohrmaschinen gemäß DIN 18312:2019 ist projektspezifisch zu überprüfen.

Ortsbrust und der Ausbruchlaibung. Sie besitzen keinen vollständigen Schildmantel, lediglich im unmittelbaren Bereich hinter dem Bohrkopf kommt ein kurzer Bohrkopfschild mit Haube, Seitenschwingen und Sohlschuh zum Einsatz. Ein wirtschaftlicher Einsatz kann bei ungünstiger Abweichung von der Gebirgsprognose durch aufwändige konventionelle Sicherungsmaßnahmen und Verschleißkosten der Abbaugeräte stark beeinflusst und begrenzt sein.

Um den Anpressdruck auf den Bohrkopf aufbringen zu können, wird die Maschine radial mit Hydraulikzylindern und Gripperplatten gegen die Ausbruchlaibung gespannt. Mit Erreichen des Maximalhubs der Vorschubzylinder wird der Vortrieb gestoppt und die Maschine über eine zusätzliche hintere Abstützung stabilisiert, ehe die Gripperplatten von der Ausbruchlaibung gelöst werden. Mit dem Umsetzen der Gripperplatten wird die Verspannebene in Vortriebsrichtung verfahren und anschließend der Vortrieb fortgesetzt.

Der Abbau erfolgt gebirgsschonend und profilgenau durch Rollenmeißel, die auf dem rotierenden Bohrkopf angebracht sind. Je nach Durchmesser füllt die Maschine mit dem Bohrkopfschild bzw. dem Maschinenrahmen einen großen Teil des Querschnittes aus. Die systematische Sicherung der Tunnellaibung

erfolgt im Schutz des Fingerschilds bzw. unmittelbar hinter dem Bohrkopfschild (5 m bis 10 m hinter der Ortsbrust) und wird im rückwärtigen Nachläuferbereich vervollständigt. Zur Bewältigung von Störzonen mit wenig standfestem und besonders nachbrüchigem Gebirge muss aber auch der Einbau von Ausbaubögen, Spritzbeton, Spießen und Ankern in möglichst kurzem Abstand hinter dem Bohrkopf möglich sein.

Eine systematische Spritzbetonauskleidung sollte erst im rückwärtigen Nachläuferbereich eingebaut werden, um die Verschmutzung der Antriebs- und Steuereinheiten im vorderen Maschinenbereich möglichst zu vermeiden. Die Spritzbetonapplikation kann mechanisch per Roboter oder händisch erfolgen. Ebenfalls sollte eine Vervollständigung der Gebirgssicherung mit Ankern im Nachlaufbereich vorgesehen werden.

Falls abschnittsweise geringere Standfestigkeiten oder heterogene Gebirgsbedingungen (hoher Klüftungsgrad, Störzonen) angetroffen werden können, wird empfohlen, die Tunnelbohrmaschine mit Einrichtungen zur Vorauserkundung und gegebenenfalls auch zur vorauseilenden Gebirgsverfestigung auszustatten.

Beim Abbau an der Ortsbrust entsteht in der Regel kleinstückiges Material (Chips) unter entsprechender

Staubentwicklung. Daher sind für diese Maschinen Vorrichtungen zur Reduzierung der Staubentwicklung und zur Entstaubung erforderlich. Hier wird unterschieden zwischen:

- a) Bedüsung mit Wasser am Bohrkopf
- b) Staubwand hinter dem Bohrkopf
- c) Staubabsaugung im Bereich der Abbaukammer mit Entstaubung auf dem Nachläufer.

5.2.2 Einzelschilde (Single Open Shield, OPS)

Bei standfester Ortsbrust, z. B. in Tonböden mit fester Konsistenz und ausreichender Kohäsion oder im Festgestein, kann mit Einzelschilden (**Abbildung 3**) gearbeitet werden. Einzelschilde, auch als offene Schilde bezeichnet, bestehen aus einem Schild, der mit seinem Schildmantel die Tunnellaubung sichert. Im Schild wird der Tunnelausbau in Form eines Tübbingrings errichtet. Der Bodenabbau erfolgt üblicherweise durch einen mit Rollenmeißeln versehenen Bohrkopf. Der gelöste Boden wird über Förderbänder abtransportiert. Die Vortriebskräfte und das Bohrkopfdrehmoment werden über die Vortriebszylinder auf den zuletzt gebauten Tübbingring übertragen.

In nachbrüchigem Festgestein werden meist Vortriebsschilde eingesetzt, die einen weitgehend geschlossenen Bohrkopf besitzen und durch diesen, in Verbindung mit dem Schildmantel, vor nachbrechendem Baugrund schützen.

Falls abschnittsweise geringere Standfestigkeiten oder heterogene Gebirgsbedingungen (hoher Klüftungsgrad, Störzonen) angetroffen werden können, wird empfohlen, die Tunnelbohrmaschine mit Einrichtungen zur Vorauserkundung und gegebenenfalls auch zur vorauseilenden Gebirgsverfestigung auszustatten.

Beim Abbau an der Ortsbrust entsteht in der Regel kleinstückiges Material unter entsprechender Staubentwicklung. Daher sind für Einzelschilde Vorrichtungen zur Reduzierung der Staubentwicklung und zur Entstaubung erforderlich. Hier wird unterschieden zwischen:

- a) Bedüsung mit Wasser am Bohrkopf
- b) Staubwand hinter dem Bohrkopf
- c) Staubabsaugung im Bereich der Abbaukammer mit Entstaubung auf dem Nachläufer.

5.2.3 Doppelschildmaschinen (Double Shield, DOS)

Doppelschildmaschinen (**Abbildung 4**) bestehen aus zwei hintereinander angeordneten Maschinenteilen. Sie werden in Festgestein oder Böden mit standfester Ortsbrust eingesetzt. Der vordere Teil ist der Frontschild mit dem Bohrkopf und den Rollenmeißeln, dem Bohrkopftrieb und den Hauptvortriebszylindern. Der hintere Maschinenteil wird als Gripperschild bezeichnet und beherbergt die Verspanneinrichtung und die Hilfsvortriebszylinder. An den Gripperschild angeschlossen sind der Schildschwanz und die Tübbingversetzeinrichtung (Erektor). Der vordere Maschinenteil kann durch die Hauptvortriebszylinder um eine komplette Ringlänge gegenüber dem hinteren Teil vorgeschoben werden. Der entstehende Freiraum zwischen beiden Schildteilen an der Tunnellaubung wird als Teleskopfuge bezeichnet und durch den Teleskopschild verschlossen.

Im standfesten Festgestein nehmen die Verspannplatten das Vortriebsdrehmoment und die Vorschubkräfte auf. Durch die sichere Fixierung des hinteren Maschinenteils mit den Verspannplatten kann im Schildschwanzbereich der Bau des Tübbingringes erfolgen, während der Frontschild vorgepresst wird und der Bohrhub erfolgt. Diese Betriebsart wird als Double-Shield-Mode bezeichnet. In standfestem Gebirge kann gegebenenfalls auf einen Tübbingeinbau verzichtet werden. In Baugrund, in dem die Verspannplatten kein ausreichendes Widerlager finden, erfolgt der Vortrieb durch Abstützung auf dem zuletzt gebauten Tübbingring. Diese Betriebsart wird als Single-Shield-Mode bezeichnet. Der vordere und hintere Maschinenteil werden hierfür zusammengefahren, die Vortriebskräfte werden durch die Hilfsvortriebszylinder auf den Tübbingring aufgebracht.

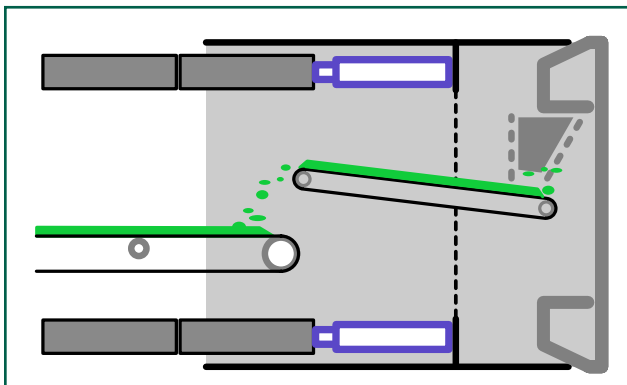


Abbildung 3 Systemskizze OPS

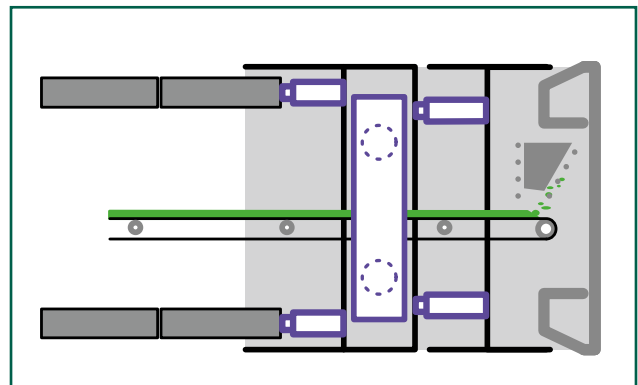


Abbildung 4 Systemskizze DOS

In der Regel besteht keine Möglichkeit zur aktiven Ortsbruststützung. Im Double Shield Mode wird auch die Ausbruchlaibung nicht durch einen Schild gesichert. Das Gebirge muss eine ausreichende Standzeit für die vorgesehene Sicherung aufweisen. Im Single Shield Mode können auch Bereiche mit kürzerer Standzeit aufgefahren werden. Wenn die Möglichkeit besteht, dass abschnittsweise geringere Standfestigkeiten oder heterogene Gebirgsbedingungen (hoher Klüftungsgrad, Störzonen) angetroffen werden, wird empfohlen, die Tunnelbohrmaschine mit Einrichtungen zur Vorauserkundung und gegebenenfalls auch zur vorauseilenden Gebirgsverfestigung auszustatten.

Beim Abbau an der Ortsbrust entsteht kleinstückiges Material unter entsprechender Staubeentwicklung. Daher sind für Doppelschildmaschinen Vorrichtungen zur Reduzierung der Staubeentwicklung und zur Entstaubung erforderlich. Hier wird unterschieden zwischen:

- a) Bedüsung mit Wasser am Bohrkopf
- b) Staubwand hinter dem Bohrkopf
- c) Staubabsaugung im Bereich der Abbaukammer mit Entstaubung auf dem Nachläufer.

5.2.4 Flüssigkeitsschilde (Slurry Shield, SLS)

Bei Tunnelbohrmaschinen mit Flüssigkeitsstützung (**Abbildung 5**) wird die Ortsbrust aktiv durch eine unter Druck stehende Flüssigkeit gestützt. Die Abbaukammer wird dabei durch eine Druckwand gegen den Tunnel abgeschlossen. Neben der aktiven Ortsbruststützung bieten die geschlossenen Schildmaschinen den Vorteil der Abdichtung gegenüber der Staubeentwicklung beim Lösen des Materials an der Ortsbrust.

Flüssigkeitsschilde werden üblicherweise unter Bedingungen eingesetzt, in denen die Ortsbrust aktiv gestützt und das Maschineninnere gegen eindringenden Boden und Wasser geschützt werden muss.

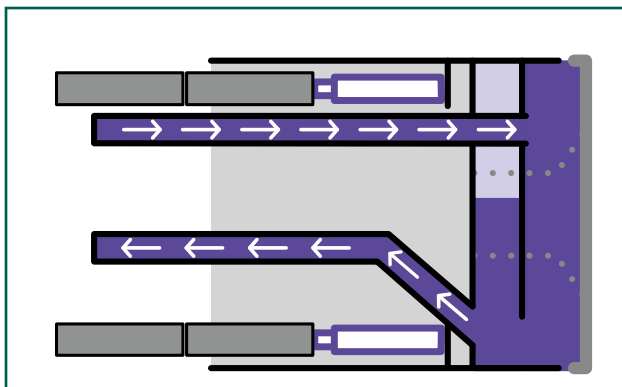


Abbildung 5 Systemskizze SLS

Der Tunnelausbau erfolgt im Schutze des Schildmantels durch Errichten von Tübbingringen.

Die verwendete Stützflüssigkeit ist in Abhängigkeit von der Wasserdurchlässigkeit des anstehenden Baugrunds festzulegen. Ihre Dichte bzw. Viskosität muss variiert werden können. Besonders bewährt haben sich hierbei Bentonitsuspensionen. Der erforderliche Stützdruck kann sehr genau über ein Luftpilster hinter einer eingebauten Tauchwand und über die abgestimmten Förderleistungen der Förder- und Speisepumpe geregelt werden. Vor Beginn des Vortriebs muss der erforderliche und maximale Stützdruck über die gesamte Vortriebslänge berechnet werden (Stützdruckberechnung). Der Boden wird vollflächig durch ein werkzeugbestücktes Schneidrad abgebaut und hydraulisch gefördert. Eine anschließende Separation ist zwingend notwendig.

Sind Einstiege in die Abbaukammer erforderlich, z. B. zum Werkzeugwechsel, bei Reparaturarbeiten oder zur Bergung von Hindernissen, muss die Stützflüssigkeit teilweise oder komplett durch Druckluft ersetzt werden. Die Stützflüssigkeit bildet dann an der Ortsbrust eine nur wenig luftdurchlässige Membran, deren Standzeit jedoch zeitlich begrenzt ist (Gefahr der Austrocknung). Diese Membran erlaubt die Stützung der Ortsbrust mittels Druckluft und ist gegebenenfalls regelmäßig zu erneuern. Die Stützflüssigkeit kann vollständig (Vollabsenkung) oder nur teilweise (Teilabsenkung) durch Druckluft ersetzt werden. Die erforderliche Teilabsenkung wird insbesondere durch die erforderliche Größe des Arbeitsraumes bzw. die zulässige maximale Absenkhöhe bestimmt. Dieser ist so groß zu wählen, dass jederzeit ein sicheres Arbeiten möglich ist und ein hinreichend großer Rückzugsraum für das Personal vorhanden ist. Teilabsenkungen von weniger als der Hälfte des Schneidradurchmessers ermöglichen keinen Zugang zu allen Werkzeugen.

Bei offenen Schneidrädern ist bei Stillstand der Maschine zum Schutz des in der Abbaukammer arbeitenden Personals ein mechanischer Abschluss der Ortsbrust durch verschleißbare Segmente im Schneidrad oder durch von hinten ausfahrbare Platten möglich und wegen der zeitlich eingeschränkten Wirkung der Membran zweckmäßig. Eine möglicherweise vorhandene zusätzliche mechanische Stützung der Ortsbrust durch das Schneidrad oder durch Sicherungsplatten ist lediglich als zusätzliche Sicherheit zu betrachten. Ein rechnerischer Ansatz der Stützwirkung ist nicht zulässig.

Steine oder Felsbänke können durch Rollenmeißel am Schneidrad und/oder Steinbrecher in der Arbeitskammer auf eine förderfähige Größe zerkleinert werden. Der Flüssigkeitsschild kann in standfestem Gebirge auch ohne Druckbeaufschlagung mit teilweise gefüllter Abbaukammer und Wasser als Förder-

medium betrieben werden. Verfahrenstechnisch kann es erforderlich sein, einen Mindestbetriebsdruck zur Vermeidung von Kavitation und Druckschwankungen der Förderpumpen sowie Verstopfungen des Ansaugbereiches zu vermeiden. In Stützdruckberechnungen werden diese verfahrenstechnisch erforderlichen Mindestbetriebsdrücke jedoch üblicherweise nicht berücksichtigt.

5.2.5 Erddruckschilde (Earth Pressure Balance Shield, EPB)

Bei Vortriebsmaschinen mit Erddruckstützung (**Abbildung 6**) kann die Ortsbrust aktiv durch einen Brei aus abgebautem Boden gestützt werden. Dabei ist die Abbaukammer des Schildes vollständig oder teilweise mit Erdbrei gefüllt und zum Tunnel hin durch eine Druckwand abgeschlossen. Die Betriebsart mit vollständig mit Erdbrei gefüllter Abbaukammer wird als Closed Mode bezeichnet.

Werkzeugbestückte, mehr oder weniger geschlossene Schneidräder bauen den Boden ab. Mischflügel an der Rückseite des Schneidrades (Rotoren/Rückräumer) und an der Druckwand (Statoren) unterstützen dabei, bindigem Boden eine gleichmäßige und geeignete Konsistenz zu geben bzw. gemischt- und grobkörnigem Lockergestein eine adäquate Verarbeitbarkeit zu verleihen. Der Druck wird über Druckmessdosen kontrolliert, die über die Vorderseite der Druckwand verteilt sind. Eine druckhaltende Schnecke fördert den Boden aus dem Arbeitsraum.

Der Stützdruck wird durch die Förderschneckendrehzahl und Vorschubgeschwindigkeit sowie die druck-volumengesteuerte Injektion von geeigneten Konditionierungsmitteln gesteuert. Der Druckabbau zwischen Abbaukammer und Tunnel stellt sich durch Reibung in der Förderschnecke ein. Das Bodenmaterial in der Schnecke oder zusätzliche mechanische Einrichtungen müssen die Dichtigkeit in der jeweiligen Austragsvorrichtung sicherstellen. Eine vollständige Stützung der Ortsbrust, insbesondere im oberen Bereich, gelingt nur dann, wenn der Boden so konditio-

niert wird, dass er als Stützmedium geeignete Eigenschaften aufweist. Hierbei hat der Anteil des Feinkorns mit einem Korndurchmesser kleiner 0,06 mm wesentlichen Einfluss. Durch die Bodenconditionierung z. B. mit Bentonit, Polymeren oder Schaum kann der Einsatzbereich des Erddruckschildes erweitert werden. Dabei ist auf die umweltverträgliche Entsorgung des Materials zu achten.

Der Erddruckschild kann in standfestem Gebirge auch ohne Druckbeaufschlagung mit teilgefüllter Abbaukammer betrieben werden. Diese Betriebsart ohne aktive Stützung der Ortsbrust wird als Open Mode bezeichnet. In standfestem Gebirge ist bei Gebirgswasserzufluss auch ein Betrieb mit teilgefüllter Abbaukammer und Druckluftbeaufschlagung möglich (Transition Mode).

Bei hohem Grundwasserdruck und bei Baugrund, der zur Verflüssigung neigt, kann die – in diesem Fall kritische – Materialübergabe von der Schnecke zum Förderband durch ein geschlossenes System (Pumpförderung) ersetzt werden (siehe **Kapitel 5.2.7** „Hybrid/Multimodeschilde“).

5.2.6 Variable-Density-Schilde (Variable Density Shield, VDS)

Die geschlossenen Schilde nach dem Variable-Density-Prinzip (**Abbildung 7**) kombinieren die Prinzipien der aktiven Ortsbruststützung von Flüssigkeitsschild und Erddruckschild in einer Maschine. Die Schilde verfügen deshalb über zwei miteinander über kommunizierende Röhren verbundene Kammern mit einem Luftpolster zur genauen Regelung des Stützdrucks. Die Extraktion des Materials aus der Abbaukammer erfolgt sowohl im flüssigkeits- als auch im erddruckgestützten Modus über einen Schneckenförderer. Die Regelung des Stützdrucks erfolgt dabei je nach Modus über Schneckendrehzahl und Vorschubgeschwindigkeit oder über ein automatisch geregeltes Druckluftpolster.

Das Stütz- und Förderprinzip eines Variable-Density-Schildes sieht in der Grundausrüstung hinter der

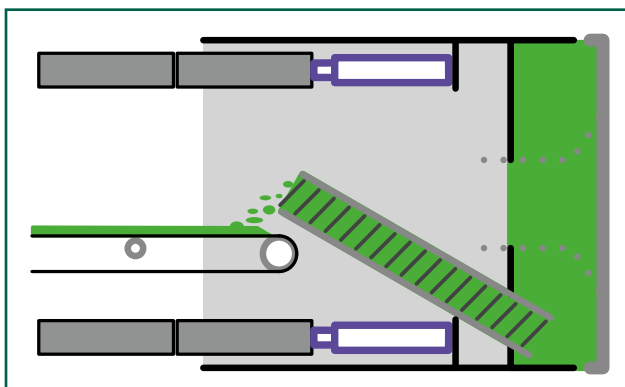


Abbildung 6 Systemskizze EPB

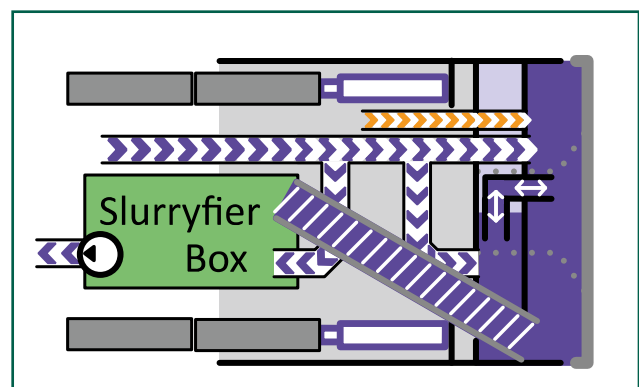


Abbildung 7 Systemskizze VDS

Förderschnecke einen geschlossenen, druckbeaufschlagten hydraulischen Förderkreis mit übertägiger Separationsanlage vor. Im Flüssigkeitsmodus kann entweder eine normale Bentonitsuspension mit geringer Dichte genutzt oder alternativ eine Suspension mit hoher Dichte in die Abbaukammer gepumpt werden. Für den Erddruckbetrieb im Closed Mode mit und ohne zusätzliche Zugabe von Bentonitsuspension kann dieses Förderprinzip ebenfalls genutzt werden. Da der Durchflussanteil des Gesamtförderkreislaufts, der durch die Abbaukammer geleitet wird, beliebig eingestellt werden kann, lässt sich die Dichte in der Abbaukammer stufenlos zwischen der eines Flüssigkeitsschildes und dem eines Erddruckschildes einstellen. Dabei erfolgt eine fortwährende Stützung der Ortsbrust und es sind keine Umbauarbeiten in der Abbaukammer erforderlich.

Falls die flüssigkeitsgestützten Betriebsmodi nicht benötigt werden, kann an Stelle der hydraulischen Förderung mit übertägiger Separationsanlage ein Bandfördersystem im Tunnel installiert werden. In diesem Fall ist auch eine Konditionierung des abgebauten Bodens mit Schaum möglich, der bei hydraulischer Förderung nicht eingesetzt werden kann.

5.2.7 Hybrid-/Multimodeschilde (Hybrid Shield, HYS)

Eine Vielzahl von Tunneln führt durch stark wechselhafte Baugrundverhältnisse, die von Fels bis zu locker gelagertem Boden reichen können. Daher sind die

Verfahrenstechniken auf die geotechnischen Voraussetzungen abzustimmen und entsprechend anpassbare Schildmaschinen einzusetzen. Dabei kommen Schildmaschinen zum Einsatz, bei denen ein Wechsel der Verfahrenstechnik durch einen Umbau der Förderung möglich ist. Diese Maschinen werden als Hybrid- oder Multimodeschilde bezeichnet (**Abbildung 8**).

Die Förderung wird in Primärförderung innerhalb der Maschine und Sekundärförderung im Tunnel untergliedert. Je nach möglichem Wechsel der Verfahrenstechnik werden folgende Multimodeschilde unterschieden:

- Änderung der Primärförderung innerhalb der Maschine (vgl. **Abbildung 8**):
 - a) Wechsel zwischen Schneckenförderung und Bandförderung
 - b) Wechsel zwischen hydraulischer Förderung und Bandförderung mit Schurren an der Bohrkopfückseite
- Wechsel der Sekundärförderung im Tunnel zwischen hydraulischer Förderung und Bandförderung

Bei Multimodeschilden für den Wechsel zwischen hydraulischer Förderung und Bandförderung im Tunnel sind die Primärförderung in der Maschine und die Ortsbruststützung nicht direkt betroffen. Hier ist die Konsistenz des abgeforderten Materials entscheidend. Bei Einsatz von Suspensionen oder Wasser zur Kondi-

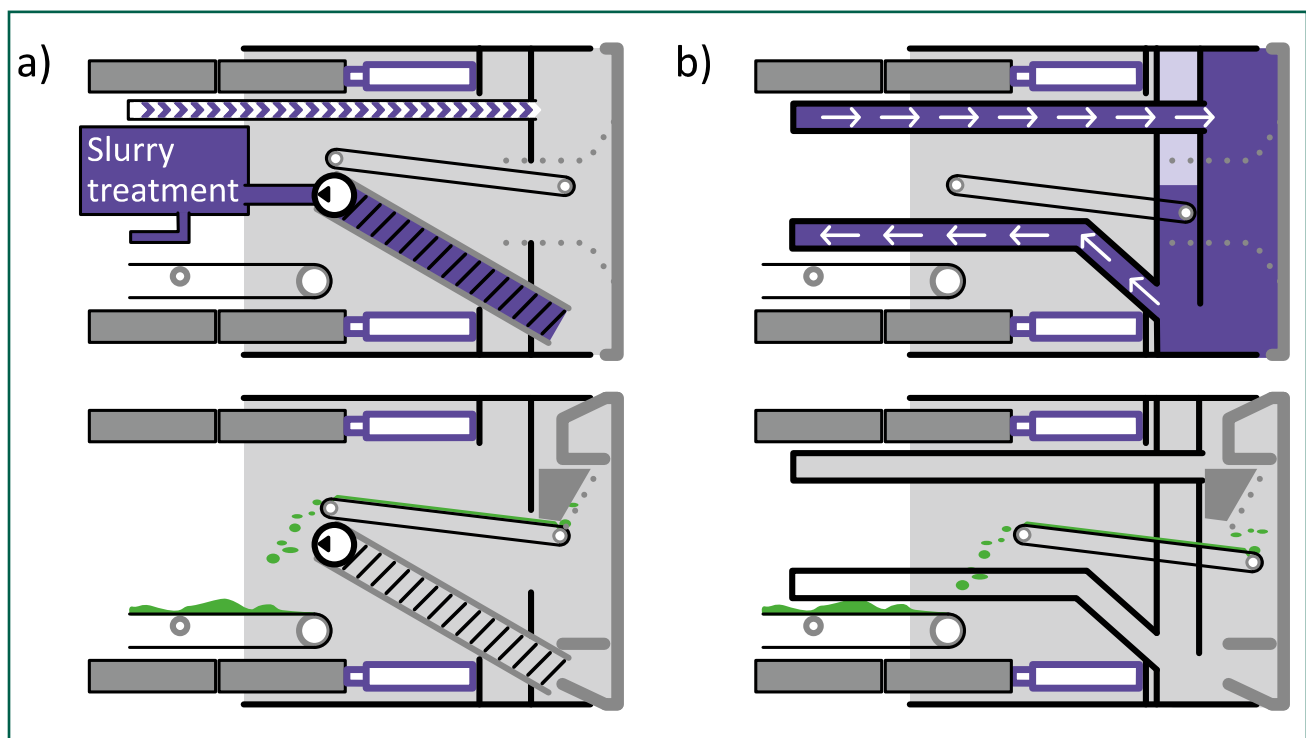


Abbildung 8 Systemskizzen HYS

tionierung oder Unterstützung der Stützwirkung kann eine hydraulische Förderung oder eine Separation auf der Maschine erforderlich werden. Schaumkonditionierter oder höherviskoser Abraum kann im Tunnel auf Förderbändern transportiert werden.

Beim Wechsel der Primärförderung von Schneckenförderung zu Schurren und Förderband entfällt die aktive Ortsbruststützung. Der Vortrieb erfolgt dann nach dem Prinzip des Einfachschilds (OPS). Die Umbauarbeiten nehmen in der Regel mehrere Schichten in Anspruch.

5.2.8 Erweiterungstunnelbohrmaschinen (Extension TBM, XTS)

Erweiterungstunnelbohrmaschinen (Aufweitungsmaschinen, **Abbildung 9**) werden im Festgestein eingesetzt, um einen zuvor hergestellten durchgehenden Pilotstollen auf den geplanten endgültigen Durchmesser zu vergrößern. Die Aufweitung auf den vollen Querschnitt erfolgt in ein oder zwei Arbeitsgängen durch einen entsprechend gestalteten Bohrkopf.

Die Hauptelemente dieser Maschine sind der Bohrkopf, die Verspannung und die Vortriebsmechanik. Die Verspannung dieser speziellen Maschine ist vor dem Bohrkopf angeordnet und stützt sich mit Grippern im Pilotstollen ab. Der Bohrkopf der Maschine wird während des Bohrvorganges zur Verspannung hingezogen. In gestörten Felsformationen können aus dem zuvor gebohrten Pilotstollen heraus Maßnahmen zur Ertüchtigung der Störzonen durchgeführt und damit die Vortriebsrisiken bei der Bohrung des Haupttunnels minimiert werden. Die systematische Sicherung der Tunnellaubung erfolgt hinter dem Aufweitungsbohrkopf mit Ausbaubögen, Ankern und Spritzbeton. Auf Fragestellungen hinsichtlich der Entstaubung des Bohrvorganges ist besonders zu achten.

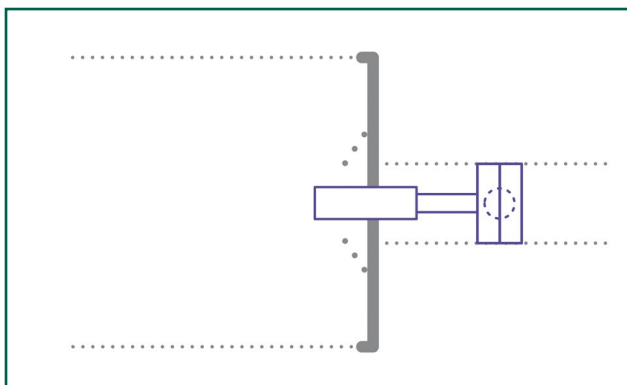


Abbildung 9 Systemskizze XTS

5.3 Schildmaschinen mit Bodenabbau im Teilschnitt

Diese Schildtypen können bei senkrechter oder steiler Böschung einer standfesten Ortsbrust eingesetzt werden. Die Maschine besteht aus dem Schildmantel, dem entsprechenden Abbauwerkzeug, der Fördereinrichtung, den Vortriebszylindern, dem Schildschwanz und der Tübbingversetzeinrichtung. Der Boden wird über Förderbänder oder Kratzbänder ausgetragen.

Teilweise verfügen die Schilde mit Bodenabbau im Teilschnitt über eine Installation von Bühnen und/oder Brustplatten, die eine mechanische Stützung der Ortsbrust ausüben sollen. Da eine solche Stützung aber nicht regel- und kontrollierbar ist, ist sie zur zuverlässigen Verhinderung größerer Setzungen nicht geeignet.

Grundwasser kann bei Schilden mit Bodenabbau im Teilschnitt durch Druckluft zurückgehalten werden. Dazu wird entweder der gesamte Tunnel unter Druckluft gesetzt oder die Maschine weist eine Druckwand auf. Das Ausbruchmaterial wird entweder hydraulisch gefördert oder trocken ausgeschleust.

5.3.1 Teilschnittschilde mit Bagger (Excavator shields, EXS)

Die Maschine (**Abbildung 10**) besteht aus dem Schildmantel, dem Abbauwerkzeug (Bagger oder Reißzahn), der Fördereinrichtung, den Vortriebspresen, dem Schildschwanz und der Tübbingversetzeinrichtung. Der Boden wird über Förderbänder oder Kratzbänder ausgetragen.

5.3.2 Teilschnittschilde mit Schräme (Roadheader shields, RHS)

Die Maschine besteht aus dem Schildmantel, einer Schräme als Abbauwerkzeug, der Fördereinrichtung, den Vortriebspresen, dem Schildschwanz und der Tübbingversetzeinrichtung. Der Boden wird über Förderbänder oder Kratzbänder ausgetragen.

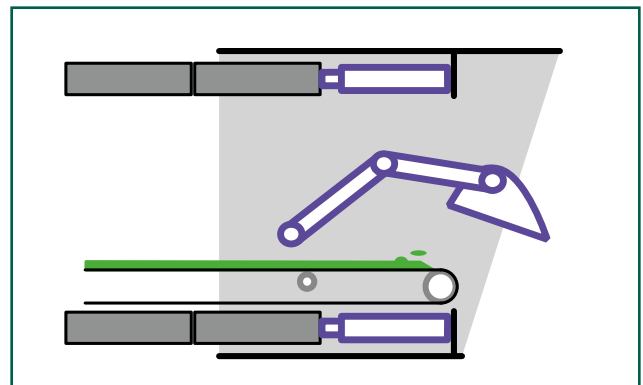


Abbildung 10 Systemskizze EXS

6 Baugrund- und Systemverhalten

6.1 Vorbemerkungen

Von maßgeblicher Bedeutung für die Auswahl einer TBM ist das Systemverhalten, d. h. das Verhalten des Gesamtsystems, bestehend aus Gebirge und gewähltem Vortriebsverfahren [35]. Beim Einsatz einer TBM unterscheiden sich die zu beachtenden Kenngrößen (vgl. **Anhang 2**) maßgeblich von denen beim konventionellen Tunnelbau.

Grundlage für die notwendigen Kenntnisse des Systemverhaltens sind geotechnische Untersuchungen, die generell auf Basis der DIN 4020 [8] durchzuführen sind. Die Festlegung der charakteristischen Werte, die Darstellung und die Bewertung der geotechnischen Untersuchungsergebnisse sowie die Folgerungen, Empfehlungen und Hinweise sollten bereits im frühen Planungsstadium auf das (voraussichtliche) spätere Vortriebsverfahren abgestimmt werden.

Je umfangreicher und aussagekräftiger die Ergebnisse der Voruntersuchungen sind, umso besser sind die Voraussetzungen für die Wahl der Verfahrenstechnik und der Tunnelbohrmaschine. Diesbezüglich wird empfohlen, bereits bei der Planung der geotechnischen Untersuchungen die gesamte Prozesskette beginnend mit dem Gebirgsabbau an der Ortsbrust und weiterfolgend mit dem Aushubtransport sowie der Entsorgung des Aushubs zu berücksichtigen.

Die wesentlichen geotechnischen Kenngrößen sind in **Anhang 2** prozessbezogen zusammengestellt und dienen der Orientierung bei der Auswahl der Tunnelbohrmaschine. Sie sind projektspezifisch für den jeweiligen Baugrund zu ermitteln. Hierbei ist zu beachten, dass Soll-Ist-Abweichungen der Baugrundparameter innerhalb der Prozesskette komplexe und uneinheitliche verfahrenstechnische Konsequenzen hervorrufen können. Es wird deshalb empfohlen, für die Ausführung entsprechende vertragliche Regelungen vorzusehen.

Die zu erwartenden Baugrundverhältnisse werden zweckmäßigerweise in einem geotechnischen Längsschnitt dargestellt und entsprechenden Vortriebsabschnitten zugeordnet.

Nachfolgend werden grundlegende Hinweise und Empfehlungen zur prozessorientierten Analyse des Systemverhaltens gegeben. Eine Zusammenstellung der erforderlichen charakteristischen Werte – differenziert nach Lockergestein und Festgestein – ist in den **Anhängen 2.1 und 2.2** angegeben.

6.2 Standfestigkeit und Ortsbruststützung

Das Baugrundverhalten sowie die ggf. notwendige Stützung der Tunnellaubung und der Ortsbrust sind die primären Kriterien zur Auswahl der Tunnelbohrmaschine. Grundlage bilden dabei die Nachweise für die globale und lokale Stabilität der Ortsbrust.

Dabei kann in einem ersten Schritt untersucht werden, ob der Baugrund an sich standfest ist oder ob es einer aktiven Ortsbruststützung bedarf. Zur übersichtlichen Beurteilung der Standfestigkeit, beispielsweise nach [35, Tab.1], können im Hartgestein auf Basis der RMR-Klassifizierung die Zuordnungen gemäß **Tabelle 2** herangezogen werden.

Insbesondere bei größeren Ausbruchquerschnitten sind fundiertere Untersuchungen zu Gebirgsstandfestigkeit erforderlich.

Im Lockergestein kommen je nach geotechnischen Randbedingungen verschiedene analytische oder numerische Verfahren zum Einsatz, mit denen sich – wiederum verfahrensabhängig – die erforderlichen Maßnahmen zur Ortsbruststützung ermitteln lassen. In diesem Zusammenhang wird auf einschlägige Richtlinien verwiesen [1, 2, 19].

Darüber hinaus müssen gegebenenfalls Kriterien bezüglich erwarteter Baugrundverformungen und Oberflächensetzungen berücksichtigt werden. Dies ist insbesondere beim innerstädtischen Tunnelbau oft entscheidend für die Wahl eines Vortriebsverfahrens. Hier sind entsprechende rechnerische Nachweise, beispielsweise zur Gefährdung existierender Bebauung, zu führen.

6.3 Boden- und Felsabbau

Die Effizienz des Boden- und Felsabbaus hängt neben den Baugrundeigenschaften maßgeblich von der Wahl der Abbauwerkzeuge, der Geometrie und dem Design des Schneidrads bzw. des Bohrkopfes sowie

Tabelle 2 RMR-Klassifizierung

A1	standfest	RMR 81-100
A2	nachbrüchig	RMR 61-80
B1	gebräch	RMR 51-60
B2	stark gebräch	RMR 41-50
B3	rollig	RMR 21-40
C	druckhaftes Gebirge	RMR < 20

den Vortriebsparametern der TBM ab. Änderungen in den geotechnischen Parametern können den Vortrieb erschweren oder auch erleichtern. Äußerst komplexe Interaktionen zwischen Baugrund und Verfahrenstechnik erfordern daher detaillierte Analysen zur Steigerung der Effizienz.

Insbesondere Verklebungen in der Abbaukammer, hoher Verschleiß der Abbauwerkzeuge sowie instabile Ortsbrustverhältnisse sind die häufigsten Ursachen für einen geringeren Baufortschritt und höhere Kosten. Sie stellen wichtige Kriterien zur Wahl einer geeigneten TBM dar.

6.3.1 Verklebung

Das Verklebungspotential des Baugrunds kann bei maschinellen Vortrieben maßgeblich die Vortriebsleistung beeinflussen. Durch Verklebungen sinkt die durchschnittliche Vortriebsgeschwindigkeit, weil z. B. die Abbaukammer bei flüssigkeitsgestützten Vortrieben gespült werden muss oder aufwändige manuelle Reinigungsarbeiten zu zusätzlichen Stillständen führen. Zudem können Verklebungen in Verbindung mit hohen Gehalten an verschleißrelevanten Mineralien zu starkem Verschleiß im Bereich von Schneidrad, Abbaukammer oder Fördereinrichtungen sowie zu Beschädigungen des Dichtungssystems des Hauptantriebs führen. Deshalb sollte das Verklebungspotential des Baugrunds unbedingt im geotechnischen Bericht beschrieben werden.

Tonhaltige Lockergesteine oder tonmineralhaltige Festgesteine können zu erheblichen Behinderungen durch Verklebungen führen. Ein besonders hohes Verklebungspotential haben ausgeprägt plastische Tone sowie tonhaltige Sedimentgesteine, wie z. B. tonmineralhaltige Konglomerate/Brekzien, Schluffsteine und insbesondere Tonsteine. Verklebungen entstehen häufig im Zusammenspiel mit Wasser, das sowohl als natürliches Bergwasser bei offenen Schilden und Erddruckschildvortrieben als auch in Form von Prozesswasser (Stützsuspension, Bodenconditionierung, Bohrkopfbedüsung im Festgestein) vorhanden sein kann.

Ausführungsproblemen durch Verklebungen kann am wirksamsten begegnet werden, wenn das vorhandene Verklebungspotential vor Projektbeginn erkannt und sowohl die Ausstattung der gesamten Vortriebsanlage als auch die geplante Vortriebsleistung entsprechend angepasst werden. An geotechnische Untersuchungen sind in dieser Hinsicht die folgenden Anforderungen zu stellen:

- Bestimmung der Zustandsgrenzen und der Konsistenz des Bodens zur Indikation des Verklebungspotentials nach DIN EN ISO 17892-12 bei Lockergestein.

- Tonmineralogische Analysen zur Bestimmung des Massenanteils der wichtigsten Minerale (Montmorillonit, Kaolinit, Illit, Smektit, Quarz, etc.).
- Verdichtetes Aufschlussraster im Bereich von tonmineralreichem Baugrund zur genaueren Abschätzung des betroffenen Streckenanteils und des Anteils der tonigen Bestandteile an der Ortsbrust.

Zudem können weiterführende Untersuchungen z. B. mit Indexversuchen durchgeführt werden, um das Verklebungspotential bestmöglich zu beschreiben.

6.3.2 Verschleiß

Der Verschleiß der Abbau- und Förderkomponenten hängt von der Abrasivität des Gebirges, von der Art der mechanischen Beanspruchung, von der Werkstoffwahl und von den Betriebsparametern der Tunnelbohrmaschine ab. Die Wechselwirkungen im sogenannten tribologischen System beinhalten die vier grundlegenden Mechanismen Adhäsion, Abrasion, Oberflächenermüdung und tribochemische Reaktionen [55, 56, 57]. **Anhang 2** enthält tabellarische Zusammenstellungen der wichtigsten Kennwerte, u. a. für den Verschleiß im Boden und Fels.

In grob- und gemischtkörnigen Böden bestimmen die Brechbarkeit und Festigkeit der Grobkornfraktionen, Steine und Blöcke sowie der äquivalente Quarzgehalt (äQu) maßgebend den Primärverschleiß. Der Sekundärverschleiß erhöht sich mit zunehmendem äquivalenten Quarzanteil und einer Verschlechterung des Materialflusses und der Lösbarkeit besonders in weitgestuften Korngemischen. In Abhängigkeit von der eingesetzten TBM und Werkzeugbestückung ist deshalb zur Abschätzung des Verschleißes zu untersuchen, ob es beim Lösen und Fördern des Bodens zu Bruch- und Mahl- oder Schleifvorgängen kommt.

Für die Abschätzung der Abrasivität von Lockergestein sind gemäß DIN 18312:2019 Bandbreiten für den Abriebwert A_{BR} und für den Brechbarkeitskoeffizienten B_R gemäß NF P18-579:2013-02-09 im Rahmen des geotechnischen Berichts anzugeben. Bei dem umgangssprachlich als „LCPC-Test“ bezeichneten Versuch, der beim Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) entwickelt wurde, werden normgerecht nur ggf. zuvor gebrochene Körner mit einem Durchmesser von 4 mm bis 6,3 mm untersucht. Eine genormte Klassifizierung der Ergebnisse des Abriebwerts A_{BR} besteht nicht. Da der Versuch zur Bestimmung des Abriebwerts nicht die Randbedingungen des Verschleißes bei Tunnelbohrmaschinen abbilden kann, wird dieser Versuch, gleichwohl dessen Ergebnisse gemäß DIN 18312:2019 in Bandbreiten anzugeben sind, in der Fachwelt kontrovers diskutiert und daher nicht in **Anhang 3** als geotechnischer Kennwert betrachtet.

Aus diesem Grund werden z. T. weitere Kennwerte auf Grundlage nicht genormter Untersuchungsmethoden zur Verfügung gestellt, um die Abrasivität des Bodens bzw. den Verschleiß an Werkzeugen besser zu beschreiben.

Um basierend auf dem Abriebwert A_{BR} auch größere Bandbreiten zu untersuchender Korngrößenfraktionen zu berücksichtigen, werden z. T. zusätzliche Versuche zur Bestimmung des Abriebwerts durchgeführt, bei denen auch die schleifende Wirkung der Sand-, Schluff- und Tonfraktion mit einem Durchmesser kleiner 4 mm untersucht werden. Hier kann sich ein vergleichbarer Versuch mit der gesamten Bandbreite von 0 mm bis 6,3 mm eignen, der als $A_{BR,0-6,3}$ bezeichnet werden sollte.

In Anlehnung an den Versuch zur Bestimmung des Abriebwerts nach NF P18-579:2013-02-09 können auch Untersuchungen mittels des an der TU Wien entwickelten Versuchsstands durchgeführt werden, bei dem im Gegensatz zum oben beschriebenen Versuch zur Bestimmung des Abriebwerts A_{BR} weitere Randbedingungen des maschinellen Tunnelvortriebs berücksichtigt werden können. Weitere Versuche wurden von auch von anderen nationalen und internationalen Instituten entwickelt.

Da die mineralogische Zusammensetzung des Lockergesteins wesentlichen Einfluss auf die Abrasivität bzw. den Verschleiß haben kann, wird empfohlen, den äquivalenten Quarzgehalt (äQu) des Lockergesteins zu bestimmen und anzugeben. Für den äquivalenten Quarzgehalt besteht bisher keine Klassifizierung. Für die Auswahltabellen in **Anhang 3** wird daher eine Aufteilung in äQu-Bereiche in die in **Tabelle 3** aufgeführten Bereiche ohne verbale Klassifizierung in Anlehnung an [56] vorgenommen.

Es wird darauf hingewiesen, dass die ermittelten Indexwerte sowie die verbalen Beschreibungen der Abrasivität zu keiner eindeutigen Korrelationsanalyse oder analytischen Ermittlung des Werkzeugverschleißes herangezogen werden können. Die mechanische Beanspruchung der Werkzeuge unterscheidet sich fundamental von den Versuchsbedingungen. Wichtige geometrische und verfahrenstechnische Kenngrößen und Einflussparameter sind bislang unberücksichtigt. Weiterführende Informationen finden sich beispielsweise in [55, 56].

Im Fels kann der Verschleiß in Abhängigkeit der Gesteinsfestigkeit, der mineralogischen Zusammensetzung, der Klüftung und der Tunnelorientierung zur

Gebirgstextur stark variieren. Der CERCHAR-Abrasivitäts-Index (CAI) dient zur Klassifizierung der Abrasivität von Fels. Mit Hilfe des CAI-Tests kann der Abriebwert A_{IN} (gemäß NF P94-430-1:2000-10-01) bestimmt werden, der gemäß aktueller Norm DIN 18312:2019 anzugeben ist. Eine genormte Klassifizierung der Ergebnisse des Abriebwerts A_{IN} besteht nicht. Für die Auswahltabellen in **Anhang 3** wird eine Aufteilung in die Bereiche mit verbaler Klassifizierung nach [56] vorgenommen.

Weitere wichtige Kennwerte sind der äquivalente Quarzanteil, die Zähigkeit des Gebirges und die Gesteinsfestigkeit. Hohe Gesteinsfestigkeiten und folglich ein hoher Abriebwert führen in kompaktem Fels zu hohem Primärverschleiß. Falls abrasive, schwer brechbare Blöcke unkontrolliert aus dem Gebirgsverband gelöst werden (instabile Ortsbrust), kann der Verschleiß durch unzulässige Spitzenbelastungen (Shock Loads) und das Brechen großer Blöcke vor dem Schneidrad überproportional zunehmen. Bei schlechtem Materialfluss durch Verklebung oder strömungsungünstiges Design der Schneidradöffnungen ist mit einer weiteren Erhöhung des Verschleißes zu rechnen (Sekundärverschleiß).

Weitere verschleißbestimmende geotechnische Parameter sind: Sprödhheit, Duktilität, Korngröße, Textur, Porosität, Mineralhärte und mögliche Schieferungen. Materialtechnische Parameter sind u. a. die Härte der Abbauwerkzeuge (Rockwell-Härte) und das eingestellte Drehmoment der Rollenmeißel sowie die Schnittbreite des Schneidrings. Entwurfparameter sind u. a. die Form des Rollenmeißels (flache oder gewölbte Flanken), der Ausrundungsradius im Kaliberbereich, die Anordnung der Rollenmeißel auf dem Bohrkopf (speichen- oder spiralförmig), der Schneidspurenabstand (Spacing), der Rollenmeißeldurchmesser sowie der Abstand der Schneidspuren von der Schneidradoberfläche. Zudem bestimmen die Betriebsweise und das Werkzeugmanagement (Überwachung und Wechselzyklen) den Verschleiß.

Es wird empfohlen, zur Beurteilung des Werkzeugverschleißes Referenzdaten heranzuziehen. Neben vergleichbaren Boden- und Gebirgseigenschaften sind zur Abschätzung des Werkzeugverschleißes Betriebsdaten und Designmerkmale der TBM einzubeziehen. Darüber hinaus sind die mineralogische Zusammensetzung, das Schneidraddesign und die Werkzeugart sowie die verfahrenstechnischen Aspekte beim Abbauvorgang zu berücksichtigen.

Tabelle 3 Bereichsaufteilung des äquivalenten Quarzgehalts (äQu) für Lockergesteinsvortriebe

0 % ≤ äQu < 5 %	5 % ≤ äQu < 15 %	15 % ≤ äQu < 35 %	35 % ≤ äQu < 75 %	75 % ≤ äQu ≤ 100 %
-----------------	------------------	-------------------	-------------------	--------------------

6.4 Bodenkonditionierung beim EPB

Bei Vortrieben mit erddruckgestützter Ortsbrust werden mittels der Bodenkonditionierung die geotechnischen Eigenschaften des abgebauten Bodens in der Regel so verändert, dass das konditionierte Bodenmaterial für den Vortrieb geeignete Eigenschaften als Stützmedium aufweist und einen möglichst störungsfreien und wirtschaftlichen Vortrieb gewährleistet. Die Ziele der Konditionierung bei Vortrieben mit erddruckgestützter Ortsbrust können wie folgt zusammengefasst werden [54]:

- Temporäre Verbesserung der Eigenschaften des Stützmediums, vor allem des Fließverhaltens, zur Sicherstellung des Materialflusses in der Abbaukammer und im Schneckenförderer.
- Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit, um mögliche destabilisierende Sickerströmungen von der Ortsbrust in die Abbaukammer zu vermeiden oder zu verringern.
- Erhöhung der Kompressibilität des Stützmediums, um verfahrenstechnisch bedingte Volumen- und Stützdruckschwankungen in der Abbaukammer zu dämpfen.
- Stützung der gesamten Ortsbrust mit annähernd homogenem Material zur Übertragung des Stützdrucks auf den anstehenden Baugrund.
- Verringerung der inneren Reibung des Stützmediums, um die Antriebsdrehmomente bzw. den Energiebedarf von Schneidrad und Schneckenförderer zu senken sowie den Materialverschleiß an Abbauwerkzeugen und anderen Maschinenkomponenten zu reduzieren.

In grob- oder gemischtkörnigen Lockergesteinen werden üblicherweise Tensidschäume unter möglicher zusätzlicher Verwendung von Polymeren oder Feinstoffsuspensionen zugegeben, während in feinkörnigen Lockergesteinen Polymer-, Bentonit- und Tonsuspensionen oder auch lediglich Wasser zum Einsatz kommen können.

Die ursprünglichen geotechnischen Eigenschaften des anstehenden Bodens werden durch die Nutzung und Zugabe von Konditionierungsmitteln verändert. Dies ist beim weiteren Transport und bei der Entsorgung zu berücksichtigen.

Die Konzentration des jeweiligen Konditionierungsmittels kann auf Basis von Erfahrungen, den charakteristischen Werten des Baugrunds und Ergebnissen von Versuchen abgeschätzt werden. Das Schneidraddesign, maschinentechnische Parameter und der erforderliche Stützdruck sind ebenfalls zu berücksichtigen. Die Konditionierungsmittel sind so zu wählen, dass sie eine homogene Bodendurch-

mischung ermöglichen und nicht unkontrolliert in den Baugrund abfließen.

Die dem Lockergestein zugeführten Additive sollten mindestens folgende Kriterien erfüllen:

- Einfache und kontrollierbare Dosierung (Gewährleistung durch die Verwendung flüssiger Additive)
- Vermeidung von Verstopfungen in den Zufuhrleitungen und Austrittsdüsen der Additive und bei der Förderung des konditionierten Materials aus der Abbaukammer
- Schnelle Wirksamkeitsentfaltung
- Vermeidung einer Umweltgefährdung, respektive einer Verschlechterung der Deponieklassen für die Entsorgung

Bei Vortrieben mit erddruckgestützter Ortsbrust, insbesondere in veränderlichen tonhaltigen Sedimentgesteinen (z. B. Ton- und Schluffsteinen) sowie in überkonsolidierten feinkörnigen Böden mit Tonanteil (bindige Böden von steifer, halbfester oder fester Konsistenz) zeigt die Beschaffenheit des losen, unverdichteten Aushubs zunächst keine ausgeprägte Neigung zu Verklebungen; allerdings ist bei diesen Konsistenzen das Verformungsverhalten des Aushubs in der Regel nicht für einen geschlossenen Modus mit vollflächiger Ortsbruststützung geeignet. Beispielhaft von einer halbfesten Konsistenz des gelösten Baugrunds ausgehend nimmt im Zuge der Zugabe von Konditionierungsmitteln (oder auch durch einen Bergwasserzufluss) die Konsistenzzahl I_C des Bodengemischs ab. Dabei steigt zunächst das Verklebungspotential im Bereich steifer und weicher Konsistenz stark an, bevor sie im Bereich weicher Konsistenz wieder abnimmt [47]. Es besteht daher bei der Konditionierung von bindigem Baugrund eine sensitive Wechselwirkung zwischen der Verarbeitbarkeit und der Verklebungsneigung. Folglich muss für den geschlossenen Modus eines Vortriebs mit erddruckgestützter Ortsbrust eine Mindestmenge an geeigneten Konditionierungsmitteln sichergestellt werden, um eine gute Verarbeitbarkeit bei hinreichend geringer Verklebungsneigung zu erhalten.

Während des Vortriebs dringen Konditionierungsmittel nicht oder nur wenig in den umgebenden Baugrund ein, sondern werden mit dem Aushub aus dem Tunnel entfernt und beeinflussen damit im Wesentlichen die Entsorgung des Aushubs.

Das abgeförderte Bodengemisch kann ggf. keine ausreichenden geotechnischen Eigenschaften aufweisen, damit der Abraum wirtschaftlich transportiert oder entsorgt werden kann. Es besteht daher eine Wechselwirkung zwischen Konditionierung und Entsorgung. Mögliche Maßnahmen zur Veränderung der

geotechnischen Eigenschaften im Hinblick auf die Entsorgung werden in **Abschnitt 6.7** beschrieben.

In jedem Fall sollten im Vorfeld Versuchsreihen durchgeführt werden, die die Veränderung des anstehenden geogenen Bodens durch die Zugabe von allen nachfolgend beschriebenen Konditionierungsmitteln ermitteln, um bereits im Vorfeld der Baumaßnahme die Entsorgungssicherheit sicherstellen zu können. Dies kann im Extremfall zum Ausschluss bestimmter Konditionierungsmittel und in der Folge zum Ausschluss bestimmter Vortriebsverfahren führen.

Die Konditionierungsmittel können in verschiedene Kategorien eingeteilt werden. Dazu gehören Wassergefährdungsklassen (WGK 0, WGK 1, WGK 2, WGK 3), die Abbaubarkeit (mind. 60 % primäre Abbaubarkeit und mind. 80 % biologische Abbaubarkeit) und die toxikologischen Grenzwerte für Säugetiere (LD50) und Wasserorganismen (EC50).

Aufgrund der Vielzahl von Konditionierungsmitteln, der Zusammensetzung von Lockergesteinsböden und deren Eigenschaften ist eine generelle Einteilung von konditionierten Böden nicht möglich. Es muss im Einzelfall betrachtet werden, welche Grenzwerte eingehalten werden und wie das konditionierte Material weiter behandelt wird. Hinweise liefern die Regelwerke in **Kapitel 2**.

6.4.1 Schaum

Der Einsatz von Schaum ist bei Vortrieben mit erddruckgestützter Ortsbrust außerhalb der klassischen Einsatzbereiche erforderlich und einzuplanen. So erfordern wasserdurchlässige, grob- oder gemischtkörnige Böden mit zunehmendem Wasserdruck Tensidschäume mit oder ohne Polymerzusatz.

Es zeigt sich, dass sowohl die Konstruktion der Schaumdüse als auch die Wahl der Konditionierungsmittel bzw. Konditionierungsmittelprodukte einen maßgeblichen Einfluss auf die Eigenschaften der Schäume und die Stoffmengen haben.

Bei der TBM-Auswahl sind folgende Aspekte und Anforderungen an die Schaumtechnologie zu berücksichtigen:

- ausreichende Anzahl an Schaumerzeugungseinheiten
- Planung der Drehdurchführung und Injektionspunkte im Schneidrad
- Abschätzung der Tensid- und Polymerkonzentration (gegebenenfalls Eignungsversuche)
- Berücksichtigung der Anforderungen an die Entsorgung des Aushubmaterials

In stark durchlässigen Böden kann bei hohem Grundwasserdruck die Kombination von Schaum und suspensionsartigen Konditionierungsmitteln sinnvoll sein. Zu berücksichtigen ist, dass die Schaumqualität

durch einige Tonminerale beeinträchtigt wird. Die mineralogischen Wechselwirkungen zwischen dem Baugrund und Konditionierungsmitteln sind projektspezifisch zu analysieren.

6.4.2 Flüssige Konditionierungsmittel

Als flüssige Konditionierungsmittel eignen sich Wasser, Ton- und Polymersuspensionen. In feinkörnigen Böden ist beim Einsatz von Wasser und Bentonitsuspensionen jedoch eine mögliche Erhöhung der Verklebungsneigung zu untersuchen. In grobkörnigen Böden eignen sich mit zunehmender Durchlässigkeit üblicherweise hochviskose Suspensionen oder Suspensionen hoher Dichte, um einer Verflüssigung des Bodengemischs entgegenzuwirken. Die Zugabevolumina möglicher Konditionierungsmittel sowie deren Einflüsse auf den abgebauten Boden sind beim Transportfluss und bei der Entsorgung zu berücksichtigen.

6.5 Stützmedien beim Flüssigkeitsschild

6.5.1 Bentonitsuspensionen

Bei Flüssigkeitsstützung wird die Standsicherheit der Ortsbrust durch eine an die geotechnischen Randbedingungen angepasste Bentonitsuspension und einen ausreichend hohen Stützdruck in der Abbaukammer aufrechterhalten. Die relevanten rheologischen Parameter sind die Fließgrenze und die Viskosität der Suspension. Diese Eigenschaften bestimmen die Fähigkeit des Stützmittels, den Stützdruck auf das Korngerüst des Bodens in Form von effektiven Spannungen zu übertragen.

Derzeit sind drei Mechanismen zur Stützdruckübertragung in Abhängigkeit von der Hohlraumgröße im Baugrund bekannt [51, 52]: (a) äußere Filterkuchenbildung im feinkörnigen Lockergestein, (b) reine Eindringung bei grobkörnigem Lockergestein und (c) innere Filterkuchenbildung in mittलगrobem Lockergestein (**Abbildung 11**).

Die Fließgrenze ist der entscheidende Parameter, wenn es im Zuge des Eindringvorgangs in den Baugrund zur Übertragung von Schubspannungen kommt. Die Suspension stagniert, wenn die Eindringtiefe so groß geworden ist, dass das über die Kornoberflächen gebildete Integral der Schubspannungen der Differenz aus Stützdruck in der Abbaukammer und anstehendem Erd- und/oder Grundwasserdruck entspricht [51].

Infolge der Viskosität der Stützflüssigkeit und der damit verbundenen geringeren Fließfähigkeit wird das Risiko herabgesetzt, dass ein Verlust des Stützmittels durch plötzliches, unkontrolliertes Abfließen in den Baugrund stattfindet. Die etwas höhere Dichte der Bentonitsuspension gegenüber der Dichte von Wasser führt dazu, dass der in der Firste anstehen-

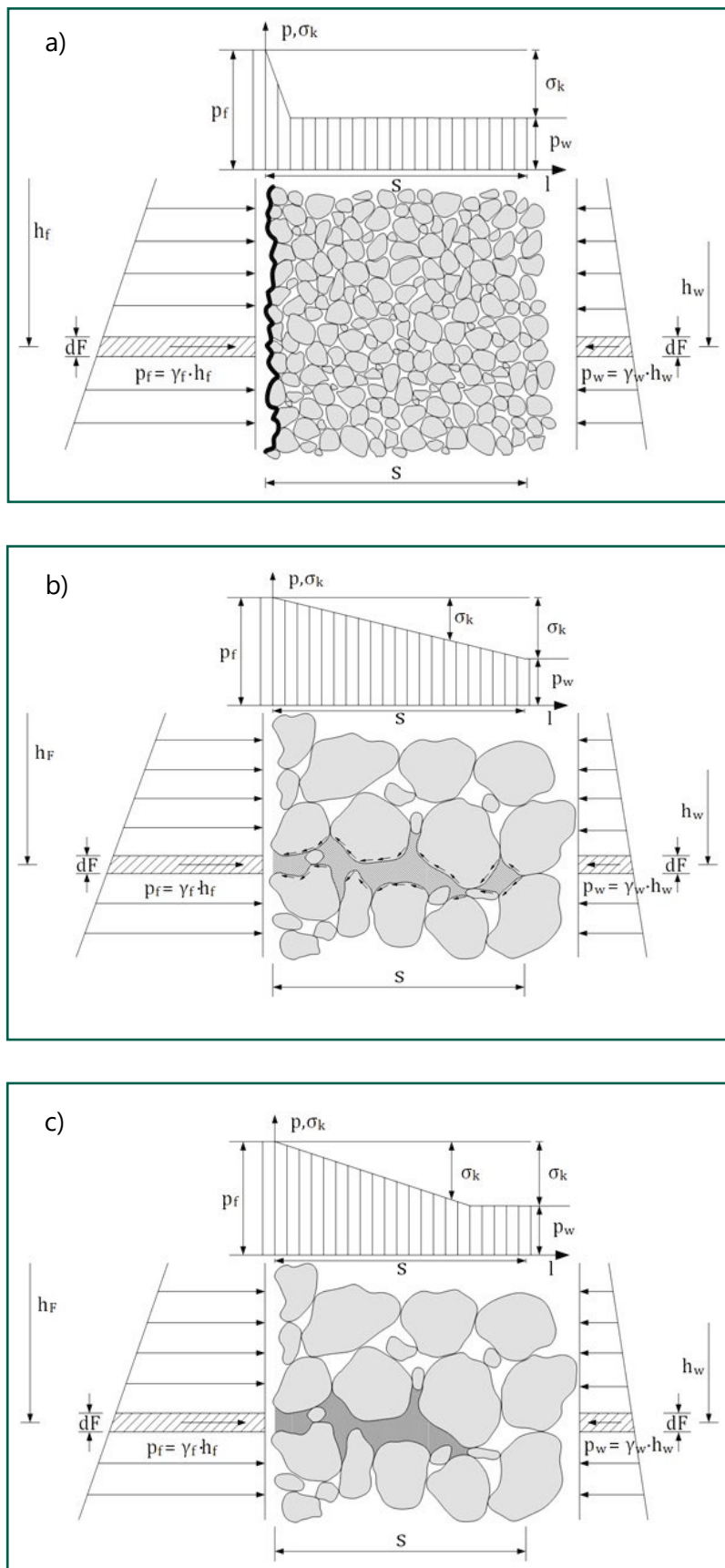


Abbildung 11 Mechanismen der Stützdruckübertragung:
a) Filterkuchenbildung, b) Penetration, c) innerer Filterkuchen

de Überdruck des Stützmediums und damit die Gefahr von Ausbläsern und die Aufbruchgefahr geringer sind [48].

Darüber hinaus dient die Bentonitsuspension als Fördermedium für den Abtransport des abgebauten Bodenmaterials aus der Abbaukammer bis zur Separieranlage. Für die hydraulische Förderung ist eine niedrige Fließgrenze und niedrige Viskosität für die erforderliche Pumpenleistung günstig.

Ein eventueller Einsatz von Additiven beim Slurryschild ist hinsichtlich der Wirksamkeit und Umweltverträglichkeit sowie der technischen Kompatibilität für jedes Verfahren individuell zu prüfen.

6.5.2 Suspensionen mit erhöhter Dichte (High Density Slurry)

Für einen stark durchlässigen Baugrund jenseits des Kornverteilungsbereichs mittlerer und grober Kiese (Lockergestein) und im stark geklüfteten oder verkarsteten Festgestein ist ein Stützmedium erforderlich, das im Baugrund einen geeigneten Übertragungsmechanismus entwickelt. Für diesen Einsatzfall wurde das Konzept der Suspensionen mit erhöhter Dichte (High Density Support Medium, Dichtebereich ca. 1,4 bis 1,8 t/m³) entwickelt [50, 53]. Die High-Density-Suspension ist auch für Vortriebssituationen geeignet, in denen bereichsweise eine geringe Überdeckung vorliegt, wie z. B. bei Flussunterquerungen mit geringer Überdeckung [49].

Die erhöhte Dichte der Stützflüssigkeit ergibt bei gleichbleibender Gesamtstützkraft eine geringere Druckordinate im Firstbereich (vgl. **Abbildung 12**). Dadurch kann eine höhere Sicherheit gegen das Aufbrechen unter Suspensionsstützung (Ausbläser und Aufbruch) gewährleistet und die Gefahr eines Suspensionsaustritts an der Geländeoberfläche reduziert werden. Der hohe Feststoffgehalt führt zu höherer Viskosität und Fließgrenze der Suspension, so dass eine geringere Eindringtiefe im Baugrund erzielt und unkontrollierte Suspensionsverluste vermieden werden [53].

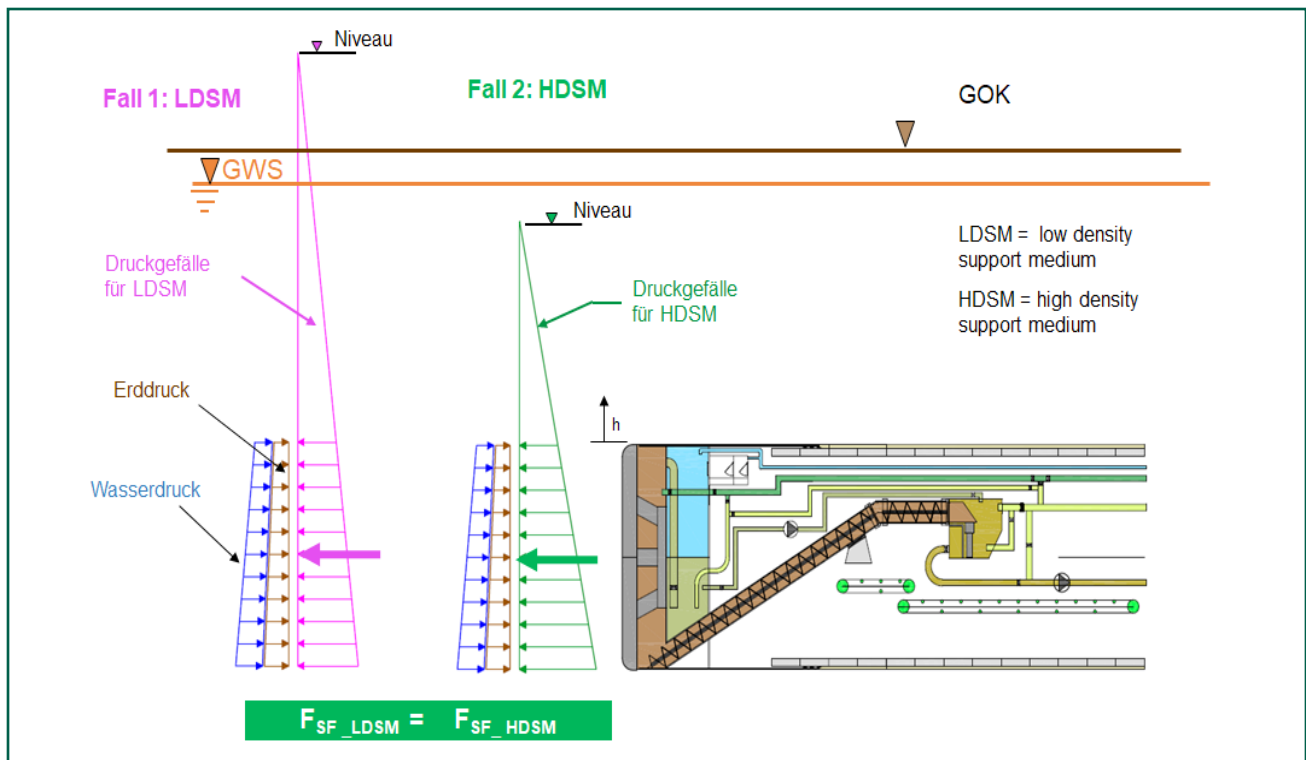


Abbildung 12 Druckgradienten des Stützdrucks in der Abbaukammer für die Standard-Suspension (LDSM) und die Suspension mit erhöhter Dichte (HDSM) [53]

6.6 Bodentransport und Trennung

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung ist der Bodentransport bei der Auswahl der TBM zu berücksichtigen. Dieser bezieht sich auf den Transport des abgebauten Materials in der Abbaukammer, den Transport innerhalb der TBM und des Nachläufers, sowie vom Nachläufer zur obertägigen Zwischendeponie/Separationsanlage bis hin zum Transport von der Zwischendeponie/Separationsanlage zum späteren Ort der Entsorgung.

Hier ist es wichtig zu beachten, dass die Auswahl der TBM zunächst auf der Ortsbruststützung beruht. Die Anforderungen an die Ortsstützung beeinflussen jedoch auch den Bodentransport. Beim Vortrieb mit erddruckgestützter Ortsbrust wird üblicherweise der Bodentransport durch die gewählte Art der Bodenkonditionierung beeinflusst, bei Flüssigkeitsschilden wird der abgebaute Boden zunächst im Stützmedium transportiert und muss nachfolgend von diesem in einem Separationsprozess wieder getrennt werden. Der Aufwand für den Bodentransport und die notwendigen Trennungsprozesse sind bei der Kostenbetrachtung zu berücksichtigen.

Für den Transport des abgebauten Materials in der Abbaukammer ist vor allem die Interaktion zwischen Abbauvorgang und Baugrund zu berücksichtigen. So sollen z. B. das Schneidraddesign und die Abbau-

werkzeuge auf den Baugrund abgestimmt sein, um Verklebungen während des Transports des abgebauten Materials zu vermeiden und die Korngröße und -form des gelösten Materials zu optimieren.

Bei Hartgesteinsvortrieben ist hier auf einen möglichst geringen Anteil an grobblockigem Material sowie andererseits auf möglichst wenig Feinanteil zu achten. Die Bohrkopfbedüsung zur Staubreduktion muss entsprechend abgestimmt werden, um Schlammabildung auf den Förderbändern zu vermeiden.

Bei Vortrieben mit erddruckgestützter Ortsbrust in bindigem Boden ist eine breiige Konsistenz anzustreben, um einerseits Verklebungen zu vermeiden, andererseits aber auch bei zu flüssiger Konsistenz ein Zurückfließen des Bodenmaterials auf geeigneten Förderbändern zu vermeiden.

Bei Vortrieben mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust muss die Pumpbarkeit durch die Förderleitungen gewährleistet sein.

6.6.1 Transport und Zwischenlagerung im Bereich der Tunnelbaustelle

Der Transport des gelösten Aushubmaterials von der TBM zur obertägigen Zwischenlagerfläche wird einerseits von der Vortriebsart, andererseits von logistischen Überlegungen in Abhängigkeit vom Baubetrieb beeinflusst. Folgende Transportarten finden Anwendung:

- Hydraulische Förderung über Rohrleitungen zu einer Separationsanlage mit nachgeschalteten Zentrifugen oder Filteranlagen
- Kontinuierliche Bandförderung zur Zwischenlagerfläche
- Diskontinuierliche Förderung mit Gleisbetrieb
- Diskontinuierliche Förderung mit Pneumbetrieb

Die Wahl zwischen den drei letztgenannten Förderarten wird im Wesentlichen durch den Baubetrieb im nachlaufenden Tunnel sowie durch den Platzbedarf an der Oberfläche bestimmt, und ist somit sehr stark projektabhängig. Um zu bestimmen, ob die Art des Bodentransports ausschlaggebend für die Auswahl der Vortriebsmaschine ist, sind die für den Transport maßgebenden Baugrundeigenschaften wie Korngrößenverteilung, Scherfestigkeit, Verflüssigungseigenschaften, mögliche Beschädigungen der Transporteinrichtungen durch Blöcke und Steine sowie bei feinkörnigen Böden Anforderungen an die Konsistenz des Abraums zu beachten. Bei der hydraulischen Förderung lässt sich zwischen einer Kreislaufförderung und einer reinen Pumpförderung differenzieren.

Bei hydraulischer Förderung ist insbesondere darauf zu achten, dass Blöcke und Steine die Fördereinrichtungen beschädigen können. Darüber hinaus sind Kavitationseffekte bei schaumkonditionierten Böden, Dispergiereigenschaften und Klumpenbildung im Förderkreislauf sowie Einflüsse von Polymeren und Tensiden auf die Pumpbarkeit zu berücksichtigen.

Für die konventionelle Förderung sind insbesondere die geotechnischen Eigenschaften, wie z. B. bei feinkörnigen Böden die Konsistenz des Abraums, entscheidend. Hinzu kommen Wasserabgabe und Verklebungsneigung, welche den Prozess der Schutterung sowohl im Zug als auch mit Bandförderung beeinträchtigen können.

Außerhalb des Tunnels ist der Einfluss der Witterung (z. B. starker Regen bei feinkörnigen Böden) zu berücksichtigen.

6.6.2 Bodenseparierung

Die hydraulische Förderung des abgebauten Materials durch einen Förderkreislauf erfordert eine Separation der Feststoffe und die nachfolgende Rückführung des Transportmediums in den Kreislauf. Je nach Aufbau kann eine Trennung der Gesteinsarten aus Gründen der Materialbewirtschaftung erfolgen, um z. B. Gesteinskörnungen für Beton zu gewinnen. Auch konditionierte Böden aus Vortrieben mit erddruckgestützter Ortsbrust erfordern gegebenenfalls eine Bodentrennung unter Berücksichtigung der eingebrachten Konditionierungsmittel.

Sowohl hinsichtlich der möglichen Verwertung als auch für den Transport des Ausbruchmaterials muss

dieses spezifische geotechnische Eigenschaften aufweisen. Diese lassen sich oft nur durch Separierung der Kornfraktionen und getrennte Weiterverarbeitung sicherstellen. Bei Vortrieben in feinkörnigen Lockergesteinen oder bei einem fein zerkleinernden Abbauprozess einer TBM im Festgestein bietet das abgebaute Material möglicherweise keine ausreichenden Eigenschaften (z. B. hinsichtlich der Scherfestigkeit) für den Einsatz des gewählten Transportmittels (LKW, Bandförderung, etc.) von der Baustelleneinrichtung zur Entsorgungsstelle. In diesem Fall sind Maßnahmen erforderlich, um die geotechnischen Eigenschaften des abgebauten Materials zu verändern (vgl. **Abschnitt 6.7.2**).

Die Separierung und die ggf. erforderliche Aufbereitung des Abraums können bei ansonsten gleichwertiger Eignung der verschiedenen Vortriebsmaschinentypen ausschlaggebend sein. Es ist also zu untersuchen, mit welchem Dispergierungsgrad zu rechnen ist, welche Anforderungen der Abraum an die Separierung stellt und welche Kosten oder Umweltauswirkungen damit verbunden sind.

Bei Verwendung von Bentonitsuspension als Fördermedium verbleiben geringe Bentonitreste im separierten Bodenmaterial. Durch dieses Bentonit ändert sich i. d. R. die abfallrechtliche Einstufung (s. u.) des Bodens jedoch nicht. Je nach Einstufung des gelösten Bodens gemäß Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) ist daher eine Verwertung der separierten Bestandteile möglich.

Die Abtrennung der Feinstufe in Zentrifugen wird durch die vorherige Zugabe von Flockungsmitteln erleichtert. Aufgrund der Vielzahl von am Markt verfügbaren Flockungsmitteln ist eine generelle Aussage bezüglich der Umweltverträglichkeit dieser Produkte nicht möglich. Aufschluss hierüber gibt das vom jeweiligen Produkthersteller zu erstellende Sicherheitsdatenblatt.

Das aus Zentrifugen, Filterpressen und Hochleistungszyklonen gewonnene Material ist sehr feinkörnig und zumeist von breiiger Konsistenz. Eine Verwertung scheidet i. d. R. aus, so dass dieses Material beseitigt wird. Gleiches gilt für verbrauchte Bentonitsuspensionen, die als flüssiger Abfall entsorgt werden.

6.6.3 Transport von der Baustelle

Der Transport von der Baustelle erfolgt entweder gleis- oder pneugebunden, in seltenen Fällen auch auf dem Wasserweg. Beim Transport des Ausbruchmaterials ist darauf zu achten, dass die jeweils geltenden Umweltvorschriften eingehalten werden.

Grundsätzlich ist Ausbruchmaterial so zu transportieren, dass es nicht durch Umwelteinflüsse (Regen, Wärme etc.) beeinflusst und in seinen Eigenschaften verändert wird. Dies gilt grundsätzlich auch bereits für die Zwischenlagerung auf der Baustelleneinrichtungs-

fläche. Im Zweifelsfall müssen Förderanlagen und Lagerflächen eingehaust werden.

Transportfahrzeuge müssen falls erforderlich abgedeckt werden, um sowohl das Eindringen von Regen als auch die Staubbildung durch Austrocknung zu vermeiden. Bei Pneumbetrieb sind immer Reifenwaschanlagen vorzusehen.

Material aus Separationsanlagen und Kammerfilterpressen hat in der Regel einen höheren Restfeuchtegehalt als Material aus Vortrieben ohne Ortsbruststützung oder mit erddruckgestützter Ortsbrust. Daher müssen für den Transport dichte LKW-Mulden oder Waggonen vorgesehen werden, die ein Ausfließen des Restwassers in die Umwelt ausschließen.

Material aus Vortrieben mit erddruckgestützter Ortsbrust muss möglicherweise für den Transport aufbereitet werden, z. B. durch die Zugabe von Kalk. Hierfür sind möglichst staubfreie Dosierungseinrichtungen zu wählen.

6.7 Entsorgung des Aushubmaterials

In Abhängigkeit vom jeweiligen Maschinentyp wird durch den Abbauprozess und die Verfahrenstechnik ein Aushubmaterial produziert, welches andere Eigenschaften aufweist als der ursprüngliche Baugrund. Während bei Vortrieben mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust durch die Separierung Boden in unterschiedlichen Kornfraktionen zur Verfügung gestellt wird, werden bei Vortrieben mit erddruckgestützter Ortsbrust unterschiedliche Bodenarten durchmischt, die ggf. zudem noch von Konditionierungsmitteln beeinflusst wurden. In Abhängigkeit des Maschinentyps sind daher neben der Separierung (vgl. **Abschnitt 6.6.2**) gegebenenfalls Bodenaufbereitungen erforderlich. Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung sind bei der Auswahl der TBM auch die Verwertung und Beseitigung (z. B. Deponierung) des abgebauten Materials zu berücksichtigen.

Die Eigenschaften des Baugrundes bzw. des abgebauten Materials werden durch den Abbauprozess, eine eventuelle Bodenkonditionierung bzw. Separierung des Materials oder auch durch die individuelle Bedienung der Vortriebsanlage maßgeblich verändert. Zudem kann ein unkontrollierter Gebirgswasserzufluss bei Vortriebsverfahren ohne aktive Ortsbruststützung zur Veränderung der Konsistenz von feinkörnigem abgebautem Material führen.

Sofern das abgebaute Material keine ausreichenden Eigenschaften (z. B. hinsichtlich der Scherfestigkeit) für die Entsorgung aufweist, sind zusätzliche Maßnahmen erforderlich. Für eine Beurteilung der geotechnischen Eigenschaften können bei Vortrieben in feinkörnigen Böden im Rahmen der für den Geotechnischen Bericht erforderlichen Untersuchungen

Scherfestigkeiten des abgebauten Materials bei unterschiedlichen Konsistenzzahlen bestimmt werden.

Bei der Prüfung der Verwertung des anfallenden Aushubmaterials zeigen sich nachfolgende ökonomische und ökologische Aspekte als bestimmend, die im Rahmen eines Konzepts zur Entsorgung des Aushubmaterials berücksichtigt werden sollten:

- Transporte von Aushubmaterial bzw. aufbereiteten Produkten von der Baustelle zur Entsorgungsstelle
- Anlegen von Zwischenlagern
- Schaffung von Beseitigungsmöglichkeiten
- Behandlung von Material (Aufbereitung von Material)
- Planung der Tunnelarbeiten (Ausbruch, Ausbau)
- Zu berücksichtigende Auswirkungen im Rahmen des Planfeststellungsbeschlusses

6.7.1 Verantwortlichkeiten und gesetzliche Regelungen

Grundsätzlich müssen die Vorhabenträger, also die späteren Betreiber, bereits während des Planfeststellungsverfahrens respektive der Genehmigungsplanung ausreichend Entsorgungsraum vorsehen. In der Regel ist die Wahl der Vortriebsmethode bereits zur Ausschreibung getroffen und daher sowohl die geogene Vorbelastung als auch mögliche Beeinträchtigungen durch Konditionierungsmittel bekannt. Der Auftraggeber sollte daher für die entsprechende Entsorgungssicherheit sorgen.

Bei einer möglichen Verwertung des Ausbruchmaterials sollte der Auftraggeber bereits den Prozentanteil des geeigneten Materials abschätzen. Der Auftragnehmer kann in der meist kurzen Bearbeitungszeit der Ausschreibungen den Entsorgungsaufwand nicht abschätzen.

6.7.2 Bodenverwertungskonzept

Im Hinblick auf die möglichst wirtschaftliche und nachhaltige Verwendung des Abraums ist in der Projektierungsphase ein entsprechendes Bodenverwertungskonzept (in der Schweiz als „Materialbewirtschaftungskonzept“ bezeichnet) durch den Auftraggeber erforderlich. Dieses sollte grundsätzlich vom Prinzip der möglichst weitgehenden Verwertung des Abraums ausgehen.

Mit Rücksicht auf Umweltgesichtspunkte, möglichst kurze und effiziente Transportwege und eine wirtschaftliche Verwertung des abgebauten Materials ergeben sich möglicherweise klare Präferenzen für bestimmte Vortriebsmaschinentypen. Wenn beispielsweise eine Trennung der Kornfraktionen für die Verwertung ohnehin sinnvoll ist, ist der Einsatz einer Separieranlage trotz des höheren Aufwands gerecht-

fertigt, den sie gegenüber einer Beseitigung des unbehandelten Abraums hätte.

Aushubmaterial, das nicht weiterverwendet werden kann, ist hinsichtlich der Entsorgungskosten besonders kritisch zu betrachten. Hier sollte die Auswahl des Vortriebsverfahrens auch mit Rücksicht auf die mögliche Vergrößerung des Volumens durch Konditionierungsmittel oder den hydraulischen Förderkreislauf sowie eine Durchmischung mit wiederverwendbaren Bestandteilen erfolgen.

6.7.3 Veränderung der geotechnischen Eigenschaften des Aushubmaterials

Soll abgebautes Material zum Beispiel als Gesteinskörnung für Beton oder als Baustoff für Erdbauwerke verwertet werden, muss es dafür geeignet sein und entsprechende geotechnische Anforderungen erfüllen. Für den Fall, dass eine solche Verwertung nicht möglich ist, sondern nur eine Beseitigung infrage kommt, gelten ebenfalls Mindestanforderungen an die Einbaubarkeit und Befahrbarkeit des deponierten Materials. Ähnliches gilt auch für den Transport von der Baustelle zum Ort der Entsorgung.

Erfüllt das abgebaute, ggf. konditionierte oder durch Separationsprozesse beeinflusste Abraummaterial die erforderlichen Eigenschaften nicht, sind noch auf der Baustelle oder in entsprechenden Zwischenlagern geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um die Eigenschaften des zu entsorgenden Materials zu verbessern.

Die Eigenschaften des Aushubmaterials sind wesentlich durch die geotechnischen Randbedingungen des Baugrunds bestimmt. Zudem besteht eine Interaktion zwischen Tunnelbohrmaschine und Baugrund. In Anlehnung an [45] ist die Wahl der Ausbruchmethode ein bestimmender Faktor bei der Beurteilung der Verwertungsmöglichkeit und wird durch nachfolgende Parameter beeinflusst:

- Form (z. B. Chips bei Hartgesteinsvortrieben)
- Korngrößenverteilung
- Auflockerungen
- Geogene Belastungen (Asbest, Metalle, Pyrit etc.)
- Anthropogene Belastungen (Konditionierungsmittel, Verlustfetttschmierung etc.)
- Chemische Zusammensetzungen (z. B. Aushubaufbereitung und Kohlenwasserstoffe im TBM-Ausbruchmaterial)
- Mechanische Eigenschaften

Die speziellen Maßnahmen zur Entsorgung des abgebauten Materials sind neben dem späteren Verwendungszweck in der Regel wesentlich von der geogenen Vorbelastung sowie vom aktuellen Wassergehalt

bzw. möglicherweise zugegebenen Konditionierungsmitteln abhängig. Der Wassergehalt beeinflusst dabei die Einbaufähigkeit und Verdichtbarkeit des abgebauten Materials. Zur Verbesserung der Eigenschaften des Materials im Hinblick auf die Entsorgung ist üblicherweise die Reduzierung des aktuellen Wassergehaltes sinnvoll.

Als einfachste, gleichzeitig auch flächen- und zeitintensive Maßnahme bietet sich die offene Lagerung und Trocknung der Böden durch Wind, Sonne und „Ausbluten“ (die sog. Schwerkraftentwässerung) an. Der Trocknungsprozess kann durch Auflockerung (z. B. durch Fräsen) oder Umlagerung und/oder durch eine besondere Ausbildung der Lagerflächen (z. B. Anordnung eines durchlässigen Filtermaterials unter dem zu entwässernden Boden) beschleunigt werden. Diese relativ einfache Maßnahme ist allerdings stark witterungsabhängig (Staubbildung/Durchnässung).

Weiterhin stehen Varianten der mechanischen Bodenverbesserung zur Verfügung, bei denen die Einbaufähigkeit des abgebauten Materials durch die Zumischung von geeigneten Baustoffen verbessert wird. Hierbei wird entweder die Korngrößenverteilung durch Einmischen eines i. d. R. trockenen und gröberen Bodenmaterials verändert oder der Wassergehalt durch den zugefügten Baustoff reduziert. Die Verfahren eignen sich auch im Zusammenhang mit der Nutzung als Sekundärbaustoff wie Recyclingbaustoffe aus Bauschutt oder industriell hergestellten Gesteinskörnungen wie Braunkohleflugaschen und dienen so der Ressourcenschonung.

Alternativ kann der Wassergehalt durch die Zugabe von Bindemitteln reduziert werden. In Abhängigkeit der Korngrößenverteilung des abgebauten Materials bietet sich z. B. die Verwendung von Mischbindemitteln an. Mischbindemittel sind Kombinationen aus genormten hydraulischen Bindemitteln oder deren hydraulischen Hauptbestandteilen und Baukalk. Durch die bodenspezifische Wahl des Mischbindemittels lassen sich die Reduktion des Wassergehalts (durch den Kalkanteil) und die Festigkeitsentwicklung (durch den Anteil an hydraulischen Bindemitteln) steuern. Die Zugabemengen sind von den Anforderungen an die Verwertung abhängig, mögliche Zugabemengen können nach [29] abgeschätzt werden.

Eine weitere, mögliche Variante kann die Herstellung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (ZFSV) aus den konditionierten Böden sein [30]. Um die gleichbleibende Qualität eines ZFSV zu gewährleisten, ist neben der grundsätzlichen Eignung der Böden eine ausreichende Homogenität sicherzustellen. Die Fließfähigkeit ist entscheidend für die selbstverdichtende und somit hohlraumfreie Verfüllung. Der Wasseranspruch wird durch die geförderten Böden, die zuzugebenden hydraulisch erhärtenden Bindemittel (z. B. Zement nach DIN 197-1) und

physikalisch bindende Zusatzstoffe (z. B. Bentonit) beeinflusst. Im Normalfall besitzt das geförderte Bodenmaterial bereits einen höheren Wassergehalt, so dass die Fließfähigkeit vergleichsweise einfach zu realisieren ist. Verschiedene Arbeitsschritte zur Auswahl von Maßnahmen zur Veränderung der geotechnischen Eigenschaften von abgebautem und zu entsorgendem Material sind in **Abbildung 13** dargestellt.

6.7.4 Beseitigung

Das aus dem Vortrieb gewonnene Aushubmaterial sollte möglichst verwertet werden. Ist dies trotz verschiedener Maßnahmen beispielsweise aufgrund

der Materialeigenschaften oder mangelndem Bedarf nicht möglich bzw. sinnvoll, muss das Bodenmaterial beseitigt werden. Insbesondere bei der Nutzung von Konditionierungsmitteln ist darauf zu achten, dass das abgebaute Gestein aus chemischer und physikalischer Sicht den Ansprüchen zur Beseitigung genügt. Grundlage sind hier die einschlägigen Gesetze und Verordnungen [26, 27, 28].

Mögliche Beseitigungswege sind bereits in einer frühen Planungsphase durch den Auftraggeber (AG) zu verifizieren. Je nach Beschaffenheit und Zusammensetzung des Materials sind Ablagerungs- und Deponieflächen in Abhängigkeit der erwarteten Zu-

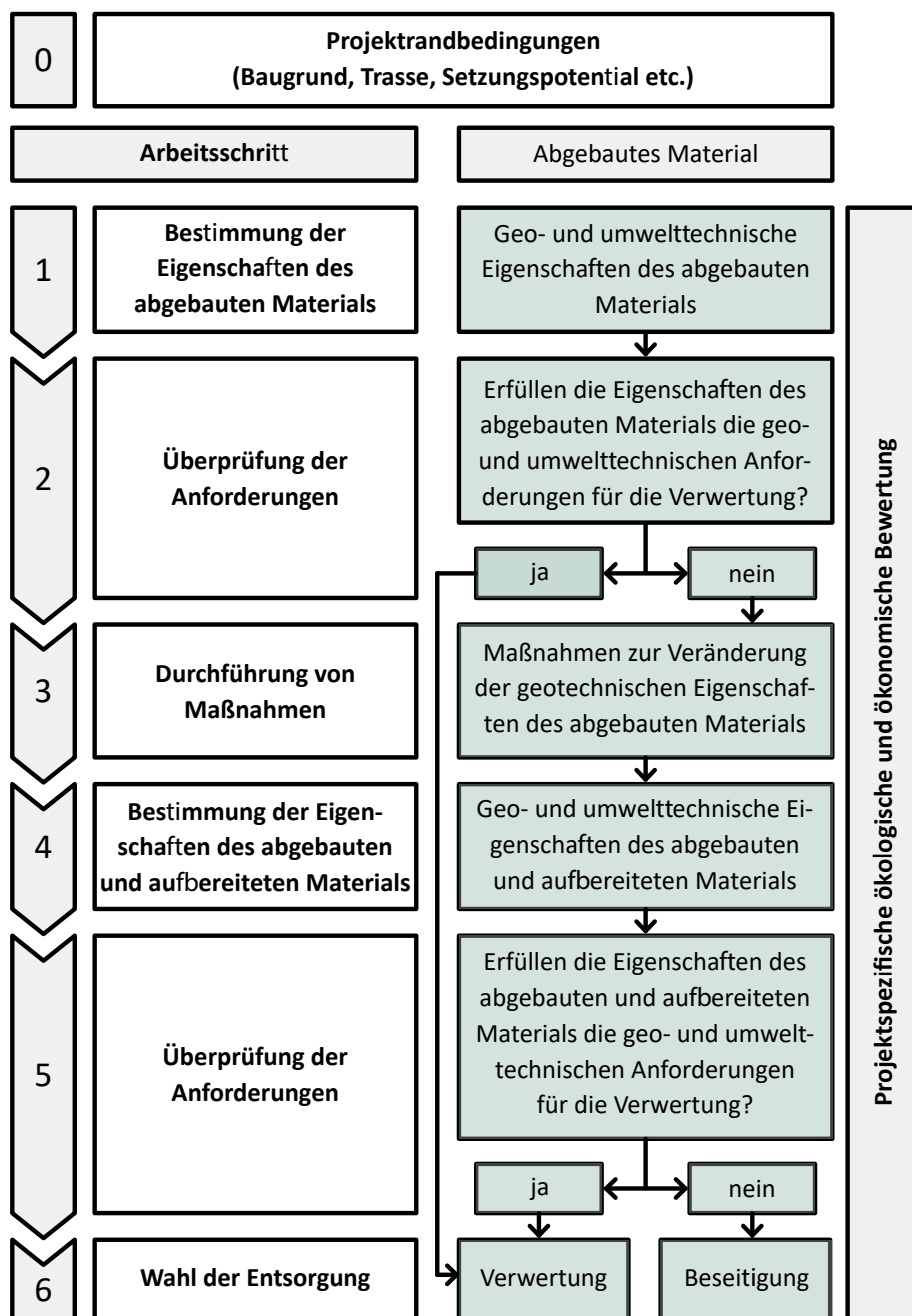


Abbildung 13
Darstellung von verschiedenen Arbeitsschritten zur Auswahl von Maßnahmen zur Veränderung der geotechnischen Eigenschaften von abgebautem und zu entsorgendem Material

ordnungs- oder Deponieklasse zu bestimmen und für das Projekt zu sichern. Mit Festlegung der Vortriebsart sind hieraus erwachsende Einflüsse auf die Materialeigenschaften abzuschätzen und bei der Bestimmung der Beseitigungswege zu berücksichtigen.

Lässt der AG die Wahl der Vortriebsart offen, muss er für die zur Auswahl stehenden Alternativen möglicherweise mehrere verschiedene Entsorgungskonzepte vorsehen und entwickeln. Aufgrund seiner Kenntnisse im frühen Projektstadium sollte sich der AG an der Planung der Entsorgung des Materials beteiligen.

Der Auftragnehmer (AN) hat während des Vortriebs besonderes Augenmerk auf den möglichst umweltschonenden Einsatz von Konditionierungsmitteln zu legen, ohne dabei die Effektivität des Materialabbaus zu beeinträchtigen. Unter Beachtung des Standes der Technik durch den AN trägt der AG neben dem Baugrund- auch das Entsorgungsrisiko.

Bezüglich der Verwertung von Böden werden in Deutschland zunächst die Merkblätter der LAGA und hier insbesondere das Merkblatt Nr. 20 „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln“ [23] berücksichtigt. Dieses Merkblatt regelt die Verwertung von Bodenaushub und damit auch die Ablagerung des Ausbruchmaterials im Tunnelbau. Erst wenn aufgrund der analytisch ermittelten Gehalte an chemischen Inhaltsstoffen und physikalischen Eigenschaften eine Verwertung gemäß des LAGA-Merkblatts nicht mehr gestattet ist, muss eine Deponierung des Materials erfolgen.

Material aus der Grob- und Mittelstufe der Hydrozyklone von Separieranlagen kann in der Regel verwertet werden. Der Anteil an Feinbestandteilen liegt zumeist unter 5 %. Allerdings weisen diese Böden spezielle bodenmechanische Eigenschaften auf. Die verbliebenen Bentonitreste oder Tonkoagulate können bei Wasserzutritt erneut aufquellen und dem Material mit bindigen Böden vergleichbare Eigenschaften verleihen. Das Material sollte dann nur in Bereichen eingebaut werden, die vor Wasserzutritt geschützt sind. So kann das Material beispielsweise zur Verfüllung des Tunnels unterhalb der Fahrbahn verwendet werden. Alternativ kann in einer Separieranlage eine weitere Aufbereitungsstufe zum Waschen des Materials vorgesehen werden. Im einfachsten Fall wird dazu das Bodenmaterial auf dem Schwingentwässerer mit Wasser bedüst. Der verbleibende Bentonitanteil im Boden kann so deutlich reduziert werden, wodurch die Qualität des Bodens und die Möglichkeit der Wiederverwendbarkeit steigen.

Im Dickstrom gefördertes Material (Dickstoffförderung) und der Abwurf von Filterpressen und Zentrifugen können i. A. nicht ohne weiteres abgelagert werden. Mögliche Maßnahmen zur Verbesserung

der geotechnischen Eigenschaften sind in **Abschnitt 6.7.3** beschrieben.

Hinsichtlich der Entsorgung von Böden, die mit Additiven behandelt wurden, ist der Hinweis der Hersteller auf die biologische Abbaubarkeit der Zusätze allein nicht ausreichend. Insbesondere bezüglich der Restbestandteile an Kohlenwasserstoffen sind die entsprechenden Vorschriften bezüglich der Schadstoffinhalte für die jeweiligen Einbau- bzw. Deponieklassen unbedingt zu beachten und in Hinsicht auf die Verwertung bzw. Beseitigung zu überprüfen. Nicht zuletzt auch aus wirtschaftlichen Gründen sollte die Verwendung von Zusatzmitteln sowohl beim Hydroschildvortrieb als auch beim Erddruckschild auf ein Minimum beschränkt bleiben.

Die zu entsorgenden Böden sollten bereits in der Planungsphase in verschiedene Kategorien eingeteilt werden. Dazu bieten sich z. B. die Zuordnungsklassen nach LAGA [23] und die Deponieklassen [28] an. Für die Entsorgung des Aushubmaterials sollte im Vorfeld des Projekts ein entsprechendes Konzept erarbeitet werden. Dieses sollte, in Anlehnung an die Empfehlung der Schweizer Fachgruppe für Untertagebau, folgende Punkte berücksichtigen:

- Prognostizierte Materialmengen des Aushubmaterials unter Berücksichtigung der geotechnischen und umwelttechnischen Eigenschaften sowie des Vortriebsverfahrens, z. B. im Rahmen der Definition von Homogenbereichen.
- Verfügbare und/oder erforderliche Flächen zur Zwischenlagerung bzw. zur Aufbereitung
- Prognostizierte Volumen bzw. prognostizierter Volumenstrom an Aushubmaterial
- Verfügbarkeit von Beseitigungsstellen
- Kapazität einer aufzubauenden Aufbereitungsanlage
- Bewirtschaftung von Ausschuss bzw. Überproduktion

Zudem sollten negative Auswirkungen auf die Umwelt durch geeignete Maßnahmen reduziert werden. Auf Basis der bisherigen Erfahrungen sollten folgende Punkte innerhalb des Tunnelbauprojekts geklärt werden:

- Wiederverwertung von Material, dessen spezifische Ausprägung rechtlich nicht erfasst ist
- Umgang mit geogen belastetem Aushubmaterial
- Berücksichtigung von aus Ausbruchmaterial gewonnenen Betonzuschlagsstoffen im Hinblick auf die EN 206

6.8 Ringspaltverfüllung

Der am Schildschwanz beim Vortrieb mit Tunnelbohrmaschinen mit Schild entstehende Spalt zwischen der Tunnellaubung und der Außenseite des Tübbingrings muss fortlaufend verfüllt werden. Diese Füllung hat in erster Linie den Zweck, den Kraftschluss der Auskleidung zum Baugrund herzustellen, wodurch diese in mechanische Wechselwirkung treten. Der Baugrund wird durch die Auskleidung gestützt, die hierdurch belastete Auskleidung stützt sich ihrerseits in Form einer elastischen Bettung gegen den Baugrund ab. Die Ringspaltfüllung verhindert das Nachbrechen des Baugrundes und begrenzt so die durch den Vortrieb bedingten Setzungen. Zugleich gewährleistet sie die Lagestabilität der Tübbingröhre.

Die kraftschlüssige Füllung des Ringspalts kann bei Vortrieben im Festgestein mit Feststoff vorgenommen werden, der hinter dem Schild durch Öffnungen in die Tübbings eingeblasen wird. Im Regelfall wird Perl kies verwendet. Bei Tunnelbohrmaschinen mit einem aktiven Stützmedium hat die Ringspaltfüllung auch die Aufgabe, dessen Abfließen nach hinten zu verhindern. Zu diesem Zweck muss die Ringspaltfüllung den Spalt abdichten und deshalb selbst dicht sein. Hierfür ist ein Verpressmaterial, wie z. B. Mörtel, besser geeignet als eine poröse Füllung.

Stand der Technik ist das Einpressen von speziell hierfür entwickeltem Mörtel oder speziell entwickelte Materialien aus zwei Komponenten über mehrere, über den Umfang des Schildschwanzes verteilte Leitungen direkt in den am Ende des Schildschwanzes fortlaufend entstehenden Spalt. Das jeweilige Material muss einerseits für das Pumpen hinreichend flüssig sein, andererseits soll er nach seinem Einbringen aber nicht wegfließen und möglichst bald ansteifen und erhärten. Die frühe Erhärtung ist wichtig zum Schutz vor einem Aufschwimmen der Tübbingröhre und zur Abtragung der vom TBM-Nachläufer auf die Sohle ausgeübten Kräfte. Das rechtzeitige Ansteifen und Erhärten des Ringspaltverpressmaterials und die vollständige Ringraumfüllung sind durch geeignete Kontrollen, z. B. an Kontrollöffnungen in den Tübbings sicherzustellen.

Das Ringspaltverpressmaterial kann auf verschiedene Art hergestellt, transportiert und injiziert werden:

- Transport der Komponenten auf die TBM und Herstellen des Verpressmaterials „just in time“ im Bereich des Nachläufers
- Transport des fertig gemischten Verpressmaterials über Behälter auf die TBM und ggf. Verpressen unter Zugabe eines Beschleunigers
- Verwendung eines Zwei-Komponenten-Systems, wobei sowohl die Grundkomponente als auch Be-

schleuniger vom Portalbereich direkt auf die TBM und zu den Verpressöffnungen gepumpt wird. Die Komponenten werden erst unmittelbar am Schildschwanz gemischt und führen so zu einer unmittelbaren Erhärtung des Ringspaltmaterials im Ringraum.

Die letztgenannte Methode hat sich in den letzten Jahren zunehmend durchgesetzt.

Beim einschaligem Ausbau, bei dem die Auskleidung des Tunnels ausschließlich aus den versetzten Tübbingen besteht, ist neben dem Dichtungssystem auch die Funktionalität des Ringspaltverpressmaterials für eine vollständige Abdichtung des Tunnels verantwortlich. Dies kann unter anderem dadurch erreicht werden, dass bei Hartgesteinsvortrieben der Perl kies zusätzlich verpresst wird. Bei Einsatz von Ringspaltmörtel kann ein Nachverpressen (secondary grouting) erforderlich werden.

7 Auswahlkriterien und sonstige Projekttrandbedingungen

7.1 Hinweise zur Anwendung der Auswahl tabellen

Die Empfehlungen zu den Einsatzbereichen und Auswahlkriterien sind in den Tabellen in **Anhang 3** für jeden Maschinentyp zusammengefasst. Die Systemeignung wird zunächst auf Basis der geotechnischen Schlüsselp Parameter und -prozesse bewertet. Wirtschaftliche Bewertungskriterien bleiben weitgehend unberücksichtigt. Die Tabellen eignen sich zu einer Vorauswahl nach dem Ausschlussprinzip. Falls mehrere Maschinentypen möglich sind, erfolgt die abschließende Gesamteignungsbewertung im Weiteren nach Analyse aller projektspezifischen Parameter und Prozesse (vgl. Vorgehensweise in **Abbildung 1**) unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und umwelttechnischer Aspekte.

In den Auswahl tabellen sind Haupteinsatzbereiche, erweiterte Einsatzbereiche und eingeschränkte Einsatzbereiche angegeben, deren Bedeutung neben den Eingangsparametern im Folgenden erläutert wird.

7.1.1 Eingangsparameter für die Auswahl tabellen

Als Eingangsparameter für die Auswahl tabellen aus **Anhang 3** dienen zunächst die charakteristischen Kennwerte aus dem geotechnischen Bericht und ggf. Bandbreiten und Kennwerte aus den Gutachten der tunnelbautechnischen Sachverständigen.

Für die in den Auswahl tabellen angegebenen Stützdruckbandbreiten ist zu beachten, dass der Stützdruck nicht unbedingt dem wirkenden Wasserdruck entspricht. In jedem Fall ist eine Stützdruck-

berechnung nach den jeweils gültigen Normen und Richtlinien erforderlich, bei dem der erforderliche Stützdruck aus Erd- und Wasserdruck ermittelt wird. Wenn die Ortsbrust standfest ist, kann der Stützdruck auch unterhalb des Wasserdrucks liegen, wenn geeignete Drainagemaßnahmen getroffen werden und zulässig sind. Bei entsprechenden hydrogeologischen Verhältnissen und zulässigen Randbedingungen kann sogar ohne Ortsbruststützung gefahren werden. Dazu müssen jedoch Standsicherheits- und Wasserzuflussberechnungen angestellt werden.

7.1.2 Haupteinsatzbereiche

Die schwarz markierten Felder (Symbol „+“) beschreiben Bereiche von Schlüsselparametern, in denen der Maschinentyp bereits erfolgreich bei weitgehendem Verzicht auf Zusatzmaßnahmen eingesetzt worden ist. Die technische Leistungsfähigkeit der TBM kann sich herstellerbedingt unterscheiden. Die Erfahrungen des bauausführenden Unternehmens spielen ebenfalls eine maßgebende Rolle. Die für einen Parameter dargestellten Haupteinsatzbereiche können sich unter Einbeziehung weiterer Parameter erweitern oder reduzieren.

7.1.3 Erweiterte Einsatzbereiche

Der Einsatz einer TBM in den dunkelgrau markierten Bereichen (Symbol „o“) erfordert gegebenenfalls besondere technische Maßnahmen. Die technische Machbarkeit ist allerdings grundsätzlich nachgewiesen. Die erzielbare Vortriebsleistung und Wirtschaftlichkeit können gegenüber dem Haupteinsatzbereich reduziert sein.

7.1.4 Eingeschränkte Einsatzbereiche

Der Einsatz einer TBM in den hellgrau markierten Bereichen (Symbol „–“) erfordert mit hoher Wahrscheinlichkeit erhebliche Zusatzmaßnahmen zur Gebirgsmodifizierung oder es ist mit Erschwernissen zu rechnen. Die erzielbare Vortriebsleistung und Wirtschaftlichkeit der TBM sind gegenüber dem Haupteinsatzbereich deutlich reduziert. Eine fundierte technische, wirtschaftliche und vertragliche Risikoanalyse sowie ein Variantenvergleich mit anderen Vortriebsverfahren werden dringend empfohlen.

7.1.5 Klassifizierung im Lockergestein

Die Kornverteilung stellt direkt und indirekt das wesentliche Bewertungskriterium für die Standfestigkeit und die Durchlässigkeit des Baugrundes dar. Auf Basis der Scherfestigkeitsparameter und des Wasserdrucks unter Berücksichtigung der Kornverteilung sind zunächst die Standfestigkeit des Gebirges zu bewerten und der erforderliche Stützdruck zu bestimmen. Mit zunehmendem Erd- und Grundwasserdruck steigen die technischen Anforderungen an die TBM.

7.1.6 Klassifizierung im Fels

Die Tabellenempfehlungen dienen primär zur Auswahl der TBM und nicht zur Beurteilung der Bohrbarkeit. Die Gebirgsklassifizierung und Bewertung der Standfestigkeit erfolgen auf Basis des RMR-Systems. Es wird empfohlen, TBM- und projektspezifisch alle sechs Parameter des RMR-Systems zu analysieren. Der rechnerische Nachweis der Standfestigkeit bzw. die Bestimmung des Stützdrucks werden ebenfalls empfohlen.

7.2 Sonstige Projekttrandbedingungen

Neben den Vorgaben aus Baugrund und der Lage der Baumaßnahme im Umfeld können auch genehmigungsrechtliche oder arbeitssicherheitsbedingte Argumente die Auswahl einer TBM beeinflussen. Im Folgenden sind einige Randbedingungen aufgeführt. Sie stellen keine abschließende Aufzählung dar, sondern sollen vielmehr Beispiele aufführen, die in der Praxis für die Auswahl einer TBM von Bedeutung sein können.

7.2.1 Planfeststellungsbeschluss, wasserrechtliche Vorgaben

Genehmigungsrechtliche Vorgaben, wie sie z. B. der Planfeststellungsbeschluss vorgibt, schränken oftmals die Auswahl von Tunnelbohrmaschinen ein. So können beispielsweise die temporäre Grundwasserentnahme und die damit verbundene Absenkung des Grundwasserspiegels stark beschränkt oder sogar ausgeschlossen sein, so dass statt offener Vortriebe geschlossene, wasserdruckhaltende Vortriebsverfahren genutzt werden müssen. Ein weiterer diesbezüglicher Aspekt sind Auflagen zur Wasserqualität für die Einleitung von Wasser in Vorfluter.

7.2.2 Setzungen und Gebäudeunterfahrungen

Im innerstädtischen Bereich und insbesondere bei der Unterfahrung von Gebäuden und Infrastruktureinrichtungen sind die zulässigen Baugrundverformungen an der Geländeoberfläche i. d. R. begrenzt. Neben den maximalen Absolutwerten der Verformung ist die Ausdehnung und Neigung der Setzungsmulde als Kriterium einzubeziehen. Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen, die in der Planungsphase bereits ermittelt werden müssen, ist die geeignete Tunnelbohrmaschine zu wählen, die die Einhaltung der Grenzwerte ermöglicht.

7.2.3 Arbeitssicherheit

Einschlägige Verordnungen zur Arbeitssicherheit [5, 31, 33] dienen in Verbindung mit dem Arbeitsschutzgesetz der Umsetzung der EG-Richtlinie 92/57/EWG über die auf zeitlich begrenzte oder ortsveränderliche Baustellen anzuwendenden Mindestvorschriften für die Sicherheit und den Gesundheitsschutz. Sie gelten

grundsätzlich für alle Baustellen und somit auch im unterirdischen Bauen. Durch ihre Anwendung soll bereits in der Planungsphase der Arbeitsschutz berücksichtigt werden, wodurch eine Beeinflussung des Auswahlprozesses für das Vortriebsverfahren besteht. Der vom DAUB und den nationalen Tunnelbauverbänden aus Österreich und der Schweiz (DACH) erarbeitete Leitfaden [33] basiert u. a. auf den o. a. Vorschriften und enthält wesentliche Anforderungen für den Einsatz von Tunnelbohrmaschinen. In Österreich gilt die neuere, von der FSV herausgegebene Richtlinie RVS 09.01.51 [46]. Im DAUB ist der Leitfaden [33] momentan in Überarbeitung.

Zur Bewertung der Arbeitssicherheit ist eine Risikoanalyse unter Berücksichtigung des Bauverfahrens und der örtlichen Randbedingungen zu erstellen. Das Ergebnis der Risikoanalyse fließt mit einer hohen Gewichtung in den Entscheidungsprozess zur Auswahl einer Tunnelbohrmaschine ein.

Ist beispielsweise mit austretenden Gasen wie Methan oder Argon aus dem Gebirge zu rechnen, muss die Baubelüftung daraufhin konzipiert werden oder es müssen schlagwettergeschützte Geräte eingesetzt werden. Ebenfalls besondere Beachtung erfordert auch das Vorhandensein von Asbest im Gestein. Entsprechende ständig erfassende Messgeräte sind im Maschinenbereich und im Tunnel fest zu installieren und mit einer optischen sowie akustischen Warnanlage zu kombinieren, die bei Erreichen kritischer Messwerte automatisch ausgelöst werden. Geschlossene Maschinentypen mit aktiver Ortsbruststützung (SLS, EPB, VDS, HYS) bieten bei ebenfalls geschlossenem Materialfördersystem Vorteile. Die Anforderungen an die Tübbingdichtungen sind ebenfalls zu definieren. Für den Endzustand sind gegebenenfalls zweischalige Ausbausysteme zu untersuchen. ■

Anhänge

Anhang 1 Anwendungsbeispiel

Gewässerunterquerung mit zwei unterschiedlichen Lockergesteinsschichten

Im Folgenden wird die Anwendung der vorliegenden Empfehlung anhand eines Beispiels veranschaulicht. Der Vorgang folgt dabei dem in **Kapitel 4** angegebenen Ablaufschema aus sieben Schritten, von denen einige ggf. iterativ durchlaufen werden müssen, um alle Randbedingungen zu berücksichtigen. Die **Abbil-**

dungen A1 und A2 illustrieren den Auswahlprozess für das Anwendungsbeispiel, in dem die einzelnen Schritte für einen TBM-Vortrieb mit Gewässerunterquerung dargestellt werden.

Der **erste Schritt** zeigt die Analyse des geotechnischen Berichts. Hier ist zunächst der geologische

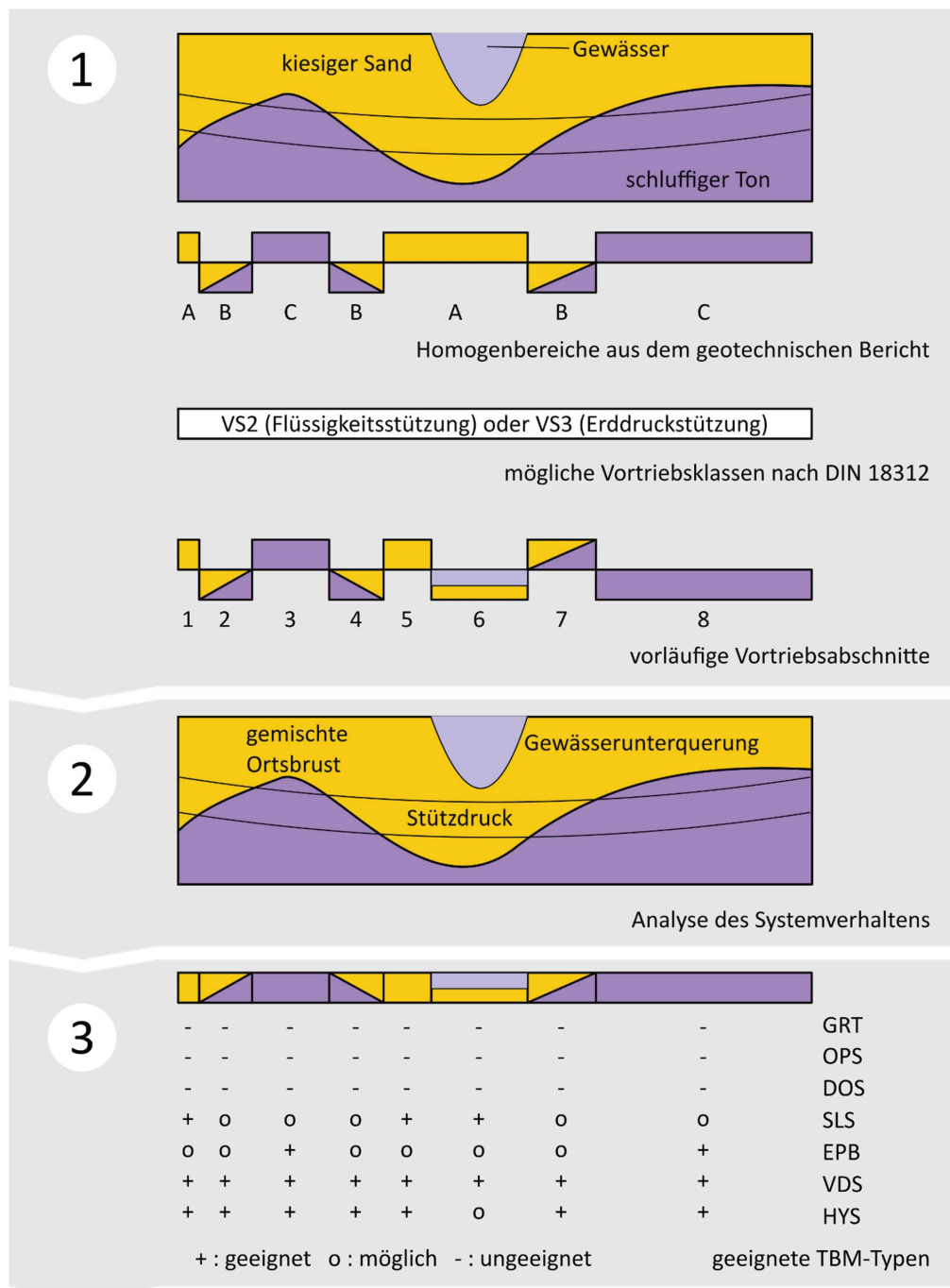
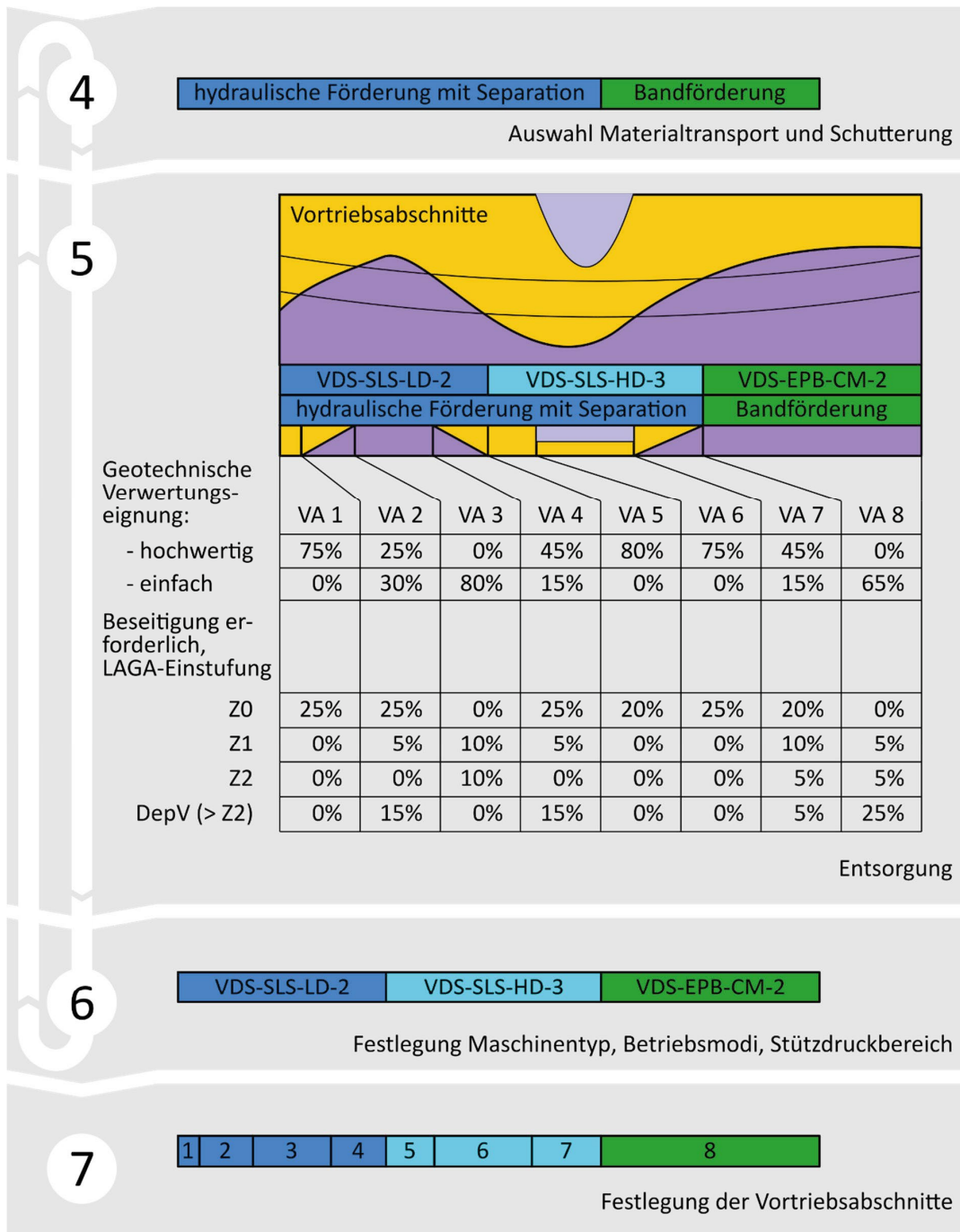


Abbildung A1
Ablaufschema,
Schritte 1–3

Abbildung A2
Ablaufschema,
Schritte 4–7



Längsschnitt abgebildet, der eine wannenförmige Tunnelgradienten zeigt, die ein Gewässer mit geringer Überdeckung unterfährt. Im Beispiel gibt es zwei geologische Schichten: eine Schicht aus kiesigem Sand liegt über einer Schicht aus schluffigem Ton. Der Tunnelhorizont schneidet die Schichtgrenze drei Mal. Aus dem geotechnischen Bericht werden geotechnische Homogenbereiche abgeleitet. Hier gibt es vier Bereiche, die vollständig in einer der beiden Bodenschichten liegen (Homogenbereiche A und C). Dazwischen liegen insgesamt drei Bereiche mit ge-

mischten Ortsbrustbedingungen (Homogenbereich B), in denen die Schichtgrenze durchfahren wird. Für alle Homogenbereiche ergeben sich nach DIN 18312 die möglichen Vortriebsklassen VS 2 (Flüssigkeitsstützung) und VS 3 (Erddruckstützung). Unter Berücksichtigung der Homogenbereiche und möglicher Vortriebsklassen ergeben sich vorläufige Vortriebsabschnitte (VA), die sich hinsichtlich der TBM-Auswahl und der Betriebsmodi aus den geotechnischen und projektspezifischen Randbedingungen ergeben. Im Beispiel wird der Homogenbereich A unterhalb des

Gewässers weiter unterteilt, um den spezifischen Anforderungen an die Gewässerunterquerung Rechnung zu tragen. Es ergeben sich also für das Beispiel acht Vortriebsabschnitte.

Im **zweiten Schritt** wird das Systemverhalten untersucht. Dabei werden neben den geotechnischen Bedingungen auch zusätzliche tunnelbautechnische Aspekte berücksichtigt. Im Beispiel ergeben sich die besonderen Herausforderungen hoher Stützdrücke, einer Gewässerunterquerung bei geringer Überdeckung sowie gemischter Ortsbrustverhältnisse. Das Systemverhalten kann maßgeblichen Einfluss auf die Eignung bestimmter Maschinentypen haben.

Im **dritten Schritt** wird unter Berücksichtigung der zuvor ermittelten Homogenbereiche und der Analyse des Systemverhaltens für jeden der acht Vortriebsabschnitte in einer Eignungsmatrix aufgetragen, welche TBM-Typen gemäß der vorliegenden DAUB-Empfehlung sich grundsätzlich eignen bzw. möglich sind und welche TBM-Typen ausgeschlossen werden müssen. Im Beispiel wird davon ausgegangen, dass der Bereich unterhalb des Gewässers aufgrund der geringen Überdeckung in einem engen zulässigen Stützdruckband aufgefahren werden muss, der einer genaueren Stützdruckregelung bei SLS und VDS den Vorzug gegenüber erddruckgestützten Varianten (EPB) gibt.

Im **vierten Schritt** wird, in Abstimmung mit den Überlegungen zur Entsorgung der Materialtransport sowohl in der Maschine als auch aus dem Tunnel heraus und auf der Baustelleneinrichtung analysiert. Der fünfte Schritt, die Analyse der Entsorgung, bildet neben den technischen Randbedingungen ein weiteres Kriterium für die Maschinenauswahl. Im hier dargestellten abstrakten und künstlichen Beispiel mit frei gewählten Annahmen werden die umwelttechnischen Eigenschaften des Aushubmaterials und seine geotechnische Eignung zur Verwertung betrachtet. Material, welches jenseits der LAGA-Einbauklassen (also > Z2) klassifiziert wird, muss beseitigt werden und fällt unter die DepV. Aushubmaterial der Einbauklassen Z0, Z1 und Z2 kann bei geotechnischer Eignung verwertet werden. Dabei ist eine möglichst hochwertige Verwertung anzustreben.

Im Beispiel wird davon ausgegangen, dass sich der kiesige Sand nach Separation der Kornfraktionen weitestgehend für den Straßenbau eignet, also einer hochwertigen Verwertung zugeführt werden kann, während sich der schluffige Ton bei umwelttechni-

scher Eignung im Erdbau einsetzen lässt. Im unteren Teil der Tabelle in **Abbildung A2** sind die Aushubanteile angegeben, die beseitigt werden müssen. Im Beispiel lässt sich das Vorgehen an VA 8 zeigen. Da hier ohnehin 25 % des Aushubs in die Deponieklassen fällt, sich aber gleichzeitig 65 % des Aushubs als nicht kontaminiertes Material für die Verwertung im Erdbau eignen, kann auf eine aufwändige Separation verzichtet und lediglich eine stetige Beprobung vorgenommen werden. Dies ermöglicht wiederum die Umstellung auf Bandförderung in diesem Abschnitt. Andererseits bilden die hohen Anteile im Straßenbau verwertbaren Materials in den Vortriebsabschnitten VA 1, VA 4, VA 5 und VA 6 einen großen Anreiz, eine auf die Verwertungsanforderungen abgestimmte Separation des Abraums durchzuführen.

Im **sechsten Schritt** wird dann der Maschinentyp unter Berücksichtigung aller zuvor aufgestellten Randbedingungen festgelegt. Zudem werden nun die geeignetsten Kombinationen aus Maschinentyp, entsprechender Schutterungsmethode, Betriebsmodi und Vortriebsparameter ermittelt. Die Schritte 4 bis 6 werden gegebenenfalls iterativ durchlaufen, falls sich aus den Überlegungen zu Schritt 6 geänderte Randbedingungen für die Schutterung und/oder die Entsorgung ergeben.

Nach diesen Festlegungen wird schließlich im **siebten Schritt** das Planungsgebiet in die abschließenden Vortriebsabschnitte eingeteilt. Die Vortriebsabschnitte enthalten nun klare Festlegungen zu den Betriebsmodi, der Schutterung und der Wertebereiche der Vortriebsparameter.

Für das hier gezeigte Beispiel ergibt sich eine Variable-Density-Schildmaschine, die in den Abschnitten VA 1 bis VA 7 als Slurry-Schild (VDS-SLS) betrieben und für den VA 8 auf einen reinen EPB-Betrieb (Closed Mode = CM) mit Bandförderung (VDS-EPB) umgebaut wird. Zudem wird für die Abschnitte VA 5 bis VA 7 der High-Density-Modus (Zusatz bei der Betriebsmodusbezeichnung HD) gewählt, während für die Vortriebsabschnitte VA 1 bis VA 4 der Low-Density-Modus (LD) ausgewählt wird. Auch die Stützdruckbereiche (bis 2 bar in VA 1 bis VA 4 sowie in VA 8; bis 3 bar in VA 5 bis VA 7) sind in den Kurzbezeichnungen der Vortriebsmodi vermerkt. Aus diesen Festlegungen ergeben sich zudem die Schutterungsvarianten, die schließlich auch mit dem Entsorgungskonzept interagieren.

Anhang 2 Prozessbezogene Kenngrößen

In den folgenden Tabellen werden übliche geotechnische und verfahrenstechnische Kenngrößen für Lockergestein und Fels aufgeführt. Für jede Kenngröße ist markiert, ob diese für bestimmte Vortriebsklassen gemäß DIN 18312 relevant ist. Die Zuordnung der in dieser Empfehlung behandelten Typen von Tunnelbohrmaschinen erfolgt gemäß **Kapitel 4** wie folgt:

Vortriebsklasse VS1: Ausbruch ohne Stützung der Ortsbrust

- GRT: Gripper-TBM
- OPS: Einfachschild
- DOS: Doppelschild
- EXS/RHS: Teilschnittmaschinen
- EPB im Open Mode

Vortriebsklasse VS2/VS3: Ausbruch mit Stützung der Ortsbrust

- SLS: Flüssigkeitsschildmaschine
- EPB: Erddruckschild
- VDS: Variable-Density-Schildmaschine
- HYS: Hybrid-/Multimode-Schildmaschine

Anhang 2.1 Prozessbezogene Kenngrößen für Lockergestein

Prozessbezogene Kenngrößen für Lockergestein	Symbol	Einheit	VS1	VS2/VS3
Ortsbruststützung + Setzungsanalyse Face support + settlement analysis				
Korngrößenverteilung Grain size distribution		%	X	X
Wichte/Wichte unter Auftrieb Unit weight/submerged unit weight	γ / γ'	kN/m ³		X
Lagerungsdichte Relative density	D	–	X	X
Reibungswinkel Friction angle	φ'	°	X	X
Kohäsion Cohesion	c'	kN/m ²	X	X
E-Modul Young's modulus	E	MN/m ²	X	X
Dilatanzwinkel Dilatancy angle	ψ	°	X	X
Porenanteil Porosity	n	–	X	X
Porenzahl Void ratio	e	–	X	X
Durchlässigkeitsbeiwert Permeability	k	m/s	X	X
Erddruckbeiwert (horizontal) Coefficient of lateral earth pressure	K_h	–	X	X
Grundwasserdruck Water pressure	p_{GW}	kN/m ²	X	X
undrainierte Kohäsion Undrained cohesion	c_u	kN/m ²		X
Bodenabbau Soil excavation				
Verklebung Stickiness				
Plastizitätszahl ($I_p = w_L - w_p$) Plasticity index	I_p	%	X	X
Konsistenzzahl ($I_c = (w_l - w) / I_p$) Consistency index	I_c	–	X	X
Fließgrenze Liquid limit	w_L	%	X	X
Ausrollgrenze Plastic limit	w_p	%	X	X

Prozessbezogene Kenngrößen für Lockergestein	Symbol	Einheit	VS1	VS2/VS3
Wassergehalt Water content	w	%	X	X
Mineralogische Zusammensetzung inkl. Anteil quellfähiger Tonminerale Mineralogical composition			X	X
Gebirgswasserzufluss Water inflow	Q _W	l/s	X	X
Feinstkornanteil (Massenanteil < 0,002 mm) Clay and silt content		%	X	X
Verschleiß Wear				
Abriebwert A _{BR} ("LCPC-Wert") Abrasivity Coefficient LCPC-index	A _{BR}	g/t	X	X
Brechbarkeitskoeffizient Breakability Coefficient	B _R	%	X	X
äquivalenter Quarzanteil Equivalent quartz content	äQu	%	X	X
Steinanteil (Massenanteil mittl. Korngröße > 63 – 200 mm) Cobble content		%	X	X
Blockanteil (Massenanteil mittlere Korngröße > 200 mm) Boulder content		%	X	X
Abrasivität der Blöcke (CAI) Boulder abrasivity (CAI)	A _{In}	–	X	X
Einaxiale Druckfestigkeit Unconfined compressive strength	q _u	kN/m ²	X	X
Scherfestigkeit Shear strength	τ	kN/m ²	X	X
Lagerungsdichte Relative density	D	–	X	X
Bodenkonditionierung Soil conditioning				
Korngrößenverteilung Grain size distribution		%		X
Feinstkornanteil (Massenanteil < 0,002 mm) Clay content		%		X
Feinkornanteil (Massenanteil < 0,06 mm) Silt content		%		X
Plastizitätszahl Plasticity index	I _p	%		X
Konsistenzzahl (I _C = (W _l – W) / I _p) Consistency index	I _C	–	X	X

Prozessbezogene Kenngrößen für Lockergestein	Symbol	Einheit	VS1	VS2/VS3
Fließgrenze Liquid limit	w_L	%	X	X
Ausrollgrenze Plastic limit	w_P	%	X	X
Wassergehalt Water content	w	%	X	X
Stützdruck Confinement pressure	p_s	bar		X
Porenanteil Porosity	n	–		X
Durchlässigkeitsbeiwert Permeability	k	m/s		X
Chemische Grundwasseranalyse Chemical groundwater analysis				X
Organischer Anteil (Kationen) Organic substances content (cations)		%		X
Restbentonitgehalt Residual bentonite content		%		X
Restgehalt an chemischen Additiven Residual chemical additives content		%		X
undrainierte Kohäsion Undrained cohesion	c_u	kN/m ²		X
Setzmaß Slump measure	h	cm		X (EPB)
Bodenseparierung Soil separation				
Restbentonitgehalt Residual bentonite content		%		X
Restgehalt an chemischen Additiven Residual chemical additives content		%		X
Feinstkornanteil (Massenanteil < 0,002 mm) Clay content		%		X
Feinkornanteil (Massenanteil < 0,06 mm) Silt content		%		X
Plastizitätszahl Plasticity index	I_P	%		X
Konsistenzzahl ($I_C = (W_L - W) / I_P$) Consistency index	I_C	–	X	X
Fließgrenze Liquid limit	w_L	%	X	X

Prozessbezogene Kenngrößen für Lockergestein	Symbol	Einheit	VS1	VS2/VS3
Ausrollgrenze Plastic limit	w_p	%	X	X
Wassergehalt Water content	w	%	X	X
undrainierte Kohäsion Undrained cohesion	c_u	kN/m ²		X
Bodentransport und -deponierung Soil transport and disposal				
Korngrößenverteilung Grain size distribution		%		X
Feinstkornanteil (Massenanteil < 0,002 mm) Clay content		%		X
Feinkornanteil (Massenanteil < 0,06 mm) Silt content		%		X
Plastizitätszahl Plasticity index	I_p	%		X
Konsistenzzahl ($I_c = (W_L - W) / I_p$) Consistency index	I_c	–	X	X
Fließgrenze Liquid limit	w_L	%	X	X
Ausrollgrenze Plastic limit	w_p	%	X	X
Wassergehalt Water content	w	%	X	X
Feinstkornanteil (Massenanteil < 0,002 mm) Clay content		%		X
Reibungswinkel Friction angle	ϕ'	°	X	X
Kohäsion Cohesion	c'	kN/m ²	X	X
E-Modul Young's modulus	E	kN/m ²	X	X
Restbentonitgehalt Residual bentonite content		%		X
Restgehalt an chemischen Additiven Residual chemical additives content		%		X
Gebirgswasserzufluss Water inflow	Q_w	l/s	X	X

Anhang 2.2 Prozessbezogene Kenngrößen für Festgestein

Prozessbezogene Kenngrößen für Festgestein	Symbol	Einheit	Alle Vortriebsklassen*
Ortsbruststützung + Setzungsanalyse Face support + settlement analysis			
Gefüge Structure		–	X
Verwitterungsgrad Weathering grade	VU/VA/ VE/VZ	%	X
Zerlegung Ratio matrix/fragmentation		–	X
Anisotropie Anisotropy		–	X
Porenanteil Porosity	n	–	X
Quellpotenzial Swelling potential		–	X
Zerfallsbeständigkeit Slake durability index	I _{d2}	%	X
Trennflächen Discontinuities			
Kluftfüllung Joint filling			X
Raumstellung der Trennflächen Discontinuity orientation			X
Abstand der Trennflächen Normal spacing of discontinuity sets		cm	X
Zerlegungsgrad Fracturing degree/discontinuity frequency			X
Seitendruckbeiwert Coefficient of lateral rock pressure	K _h	–	X
Gebirgswasserzufluss Water inflow	Q _w	l/s	X
Wasserdruck Water pressure	p _{GW}	kN/m ²	X
Materialabbau Excavation			
Einaxiale Druckfestigkeit Unconfined compressive strength	σ _c	kN/m ²	X
Spaltzugfestigkeit Tensile strength	σ _z	MN/m ²	X

Prozessbezogene Kenngrößen für Festgestein	Symbol	Einheit	Alle Vortriebsklassen*
RQD Rock Quality Designation	RQD	–	X
Verwitterungsstufe Weathering grade		–	X
RSR Rock Structure Rating	RSR	–	X
RMR Rock Mass Rating	RMR	–	X
GSI Geological Strength Index (Hoek Brown)	GSI	–	X
RMI Rock Mass Index	RMI	–	X
Q-Index Q-value	Q-value	–	X
Mineralogie Mineral composition			X
Karbonat-Anteil Carbonate content			X
Verfestigung (Zementation) Cementation			X
Trennflächen Discontinuities			
Kluftfüllung Joint filling			X
Blockgröße Block size		cm	X
Raumstellung der Trennflächen Discontinuity orientation			X
Abstand der Trennflächen Normal spacing of discontinuity sets		cm	X
Zerlegungsgrad Fracturing degree/discontinuity frequency			X
Verklebung Stickiness			
Zerfallsbeständigkeit Slake durability index	I _{d2}	%	X
Wassergehalt Water content	w	%	X
Gebirgswasserzufluss Water inflow	Q _w	l/s	X

Prozessbezogene Kenngrößen für Festgestein	Symbol	Einheit	Alle Vortriebsklassen*
Mineralogie Mineral composition			X
Verschleiß Wear			
Abriebindex A_{IN} Abrasivity	A_{IN}	–	X
Quarzanteil Equivalent quartz content	äQu	%	X
Abrasivität RAI (RAI=äQu · UCS) Rock Abrasivity Index	RAI	–	X
Einaxiale Druckfestigkeit Unconfined compressive strength (UCS)	σ_c	MN/m ²	X
Spaltzugfestigkeit Tensile strength	σ_z	MN/m ²	X
Scherfestigkeit Shear strength	τ	kN/m ²	X
Tonmineralische Zusammensetzung Clay mineral composition			X
Verwitterungsgrad Weathering grade	VU/VA/ VE/VZ	–	X
Verfestigung (Zementation) Cementation			X
Bodentransport und -deponierung Soil transport and disposal			
Max. Kantenlänge Max. block size		mm	X
Wassergehalt Water content	w	%	X

* Hinweis: Aufgrund der komplexen und ineinander übergehenden Verfahrenstechnik der verschiedenen Tunnelbohrmaschinen, insbesondere bei den Maschinen mit Schild, werden die Vortriebsklassen der Tunnelbohrmaschinen gemäß DIN 18312:2019 hier nicht unterschieden. Eine Angabe von Vortriebsklassen der Tunnelbohrmaschinen gemäß DIN 18312:2019 ist projektspezifisch zu überprüfen.

Anhang 3 Einsatzbereiche und Auswahlkriterien

Anhang 3.1 Einsatzbereiche und Auswahlkriterien GRT

Geotechnische Kennwerte Geotechnical parameters	GRIPPER-TBM (GRT) Gripper TBM (GRT)						
		+	Haupteinsatzbereich/main field of application				
		o	erweiterter Einsatzbereich/extended application				
		–	Einsatz eingeschränkt/application limited				
Lockergestein (Soil)							
Feinkornanteil (< 0,06 mm) DIN 18196 Fines content (< 0,06 mm)	< 5 %	5 – 15 %	15 – 40 %	> 40 %			
Durchlässigkeit k nach DIN EN ISO 17892-11 [m/s] Permeability k [m/s]	sehr stark very high > 10 ⁻²	stark high 10 ⁻² – 10 ⁻⁴	durchlässig permeable 10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁶	schwach low < 10 ⁻⁶			
Konsistenz (Ic) nach DIN EN ISO 17892-12 Consistency (Ic)	breiig very soft 0 – 0,5	weich soft 0,5 – 0,75	steif stiff 0,75 – 1,0	halbfest very stiff 1,0 – 1,25	fest hard 1,25 – 1,5		
Lagerungsdichte nach DIN 18126 Relative density	dicht dense	mittel medium moderately dense	locker loose				
Stützdruck [bar] Confinement pressure [bar]	0	1 – 4		4 – 7	7 – 15		
Quellpotential Swelling potential	kein none	gering little	mittel fair	hoch high			
Abrasivität (äquivalenter Quarzanteil) äQu [%] Abrasive (equivalent quartz content) [%]	0 – 5	5 – 15	15 – 35	35 – 75	75 – 100		
Festgestein (Rock)							
Gesteinsfestigkeit [MPa] Unconfined compressive strength [MPa]	0 – 5	5 – 25	25 – 50	50 – 100	100 – 250	> 250	
	–	o	+	+	+	+	
Bohrkern – Gebirgsqualität [RQD] Core sample – rock quality designation [RQD]	sehr gering very poor 0 – 25	gering poor 25 – 50	mittel fair 50 – 75	gut good 75 – 90	ausgezeichnet excellent 90 – 100		
	–	o	+	+	+		
Rock Mass Ratio [RMR] Rock Mass Ratio [RMR]	sehr schlecht very poor < 20	schlecht poor 21 – 40	mäßig fair 41 – 60	gut good 61 – 80	sehr gut very good 81 – 100		
	–	o	+	+	+		
Wasserzufluss je 10 m Tunnel [l/min] Waterinflow per 10 m tunnel [l/min]	0	0 – 10	10 – 25	25 – 125	> 125		
	+	+	+	o	–		
Abrasivität (CAI) Abrasive (CAI)	extrem niedrig extremely low 0,1 – 0,5	sehr niedrig very low 0,5 – 1	niedrig low 1 – 2	mittel – hoch medium – high 2 – 4	sehr hoch – extrem hoch very high – extremely high 4 – 6		
	+	+	+	o	o		
Quellpotential Swelling potential	kein none	gering poor	mittel fair	hoch high			
	+	+	o	o			
Stützdruck [bar] Confinement pressure [bar]	0	1 – 4		4 – 7	7 – 15		
	+	–		–	–		

Anhang 3.2 Einsatzbereiche und Auswahlkriterien DOS

Geotechnische Kennwerte Geotechnical parameters	DOPPELSCHILDMASCHINE (DOS) Double Shield Machine DOS	+	Haupteinsatzbereich/main field of application				
		o	erweiterter Einsatzbereich/extended application				
		–	Einsatz eingeschränkt/application limited				
Lockergestein (Soil)							
Feinkornanteil (< 0,06 mm) DIN 18196 Fines content (< 0,06 mm)	< 5 %	5 – 15 %	15 – 40 %	> 40 %			
Durchlässigkeit k nach DIN EN ISO 17892-11 [m/s] Permeability k [m/s]	sehr stark very high > 10 ⁻²	stark high 10 ⁻² – 10 ⁻⁴	durchlässig permeable 10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁶	schwach low < 10 ⁻⁶			
Konsistenz (Ic) nach DIN EN ISO 17892-12 Consistency (Ic)	breiig very soft 0 – 0,5	weich soft 0,5 – 0,75	steif stiff 0,75 – 1,0	halbfest very stiff 1,0 – 1,25	fest hard 1,25 – 1,5		
Lagerungsdichte nach DIN 18126 Relative density	dicht dense	mittel medium	locker loose				
Stützdruck [bar] Confinement pressure [bar]		1 – 4		4 – 7	7 – 15		
Quellpotential Swelling potential	kein none	gering little	mittel fair	hoch high			
Abrasivität (äquivalenter Quarzanteil) äQu [%] Abrasiveity (equivalent quartz content) [%]	0 – 5	5 – 15	15 – 35	35 – 75	75 – 100		
Festgestein (Rock)							
Gesteinsfestigkeit [MPa] Unconfined compressive strength [MPa]	0 – 5	5 – 25	25 – 50	50 – 100	100 – 250	> 250	
	o	o	+	+	+	+	
Bohrkern – Gebirgsqualität [RQD] Core sample – rock quality designation [RQD]	sehr gering very poor 0 – 25	gering poor 25 – 50	mittel fair 50 – 75	gut good 75 – 90	ausgezeichnet excellent 90 – 100		
	o	+	+	+	+		
Rock Mass Ratio [RMR] Rock Mass Ratio [RMR]	sehr schlecht very poor < 20	schlecht poor 21 – 40	mäßig fair 41 – 60	gut good 61 – 80	sehr gut very good 81 – 100		
	o	+	+	+	+		
Wasserzufluss je 10 m Tunnel [l/min] Waterinflow per 10 m tunnel [l/min]	0	0 – 10	10 – 25	25 – 125	> 125		
	+	+	+	o	–		
Abrasivität (CAI) Abrasiveity (CAI)	extrem niedrig extremely low 0,1 – 0,5	sehr niedrig very low 0,5 – 1	niedrig low 1 – 2	mittel – hoch medium – high 2 – 4	sehr hoch – extrem hoch very high – extremely high 4 – 6		
	+	+	+	o	o		
Quellpotential Swelling potential	kein none	gering poor	mittel fair	hoch high			
	+	+	o	o			
Stützdruck [bar] Confinement pressure [bar]	0	1 – 4		4 – 7	7 – 15		
	+	–		–	–		

Anhang 3.3 Einsatzbereiche und Auswahlkriterien OPS

Geotechnische Kennwerte Geotechnical parameters	EINFACHSCHILD (OPS) Single Open Shield (OPS)		+	Haupteinsatzbereich/main field of application		
			o	erweiterter Einsatzbereich/extended application		
			–	Einsatz eingeschränkt/application limited		
Lockergestein (Soil)						
Feinkornanteil (< 0,06 mm) DIN 18196 Fines content (< 0,06 mm)	< 5 %	5 – 15 %	15 – 40 %	> 40 %		
	–	–	–	o		
Durchlässigkeit k nach DIN EN ISO 17892-11 [m/s] Permeability k [m/s]	sehr stark very high > 10 ⁻²	stark high 10 ⁻² – 10 ⁻⁴	durchlässig permeable 10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁶	schwach low < 10 ⁻⁶		
	–	–	–	o		
Konsistenz (Ic) nach DIN EN ISO 17892-12 Consistency (Ic)	breiig very soft 0 – 0,5	weich soft 0,5 – 0,75	steif stiff 0,75 – 1,0	halbfest very stiff 1,0 – 1,25	fest hard 1,25 – 1,5	
	–	–	–	–	o	
Lagerungsdichte nach DIN 18126 Relative density	dicht dense	mitteldicht medium dense	locker loose			
	+	–	–			
Stützdruck [bar] Confinement pressure [bar]	0	1 – 4		4 – 7	7 – 15	
	o	–		–	–	
Quellpotential Swelling potential	kein none	gering little	mittel fair	hoch high		
	+	+	o	–		
Abrasivität (äquivalenter Quarzanteil) äQu [%] Abrasivity (equivalent quartz content) [%]	0 – 5	5 – 15	15 – 35	35 – 75	75 – 100	
	+	+	+	o	o	
Festgestein (Rock)						
Gesteinsfestigkeit [MPa] Unconfined compressive strength [MPa]	0 – 5	5 – 25	25 – 50	50 – 100	100 – 250	> 250
	o	o	+	+	+	+
Bohrkern – Gebirgsqualität [RQD] Core sample – rock quality designation [RQD]	sehr gering very poor 0 – 25	gering poor 25 – 50	mittel fair 50 – 75	gut good 75 – 90	ausgezeichnet excellent 90 – 100	
	o	+	+	+	+	
Rock Mass Ratio [RMR] Rock Mass Ratio [RMR]	sehr schlecht very poor < 20	schlecht poor 21 – 40	mäßig fair 41 – 60	gut good 61 – 80	sehr gut very good 81 – 100	
	o	+	+	+	+	
Wasserzufluss je 10 m Tunnel [l/min] Waterinflow per 10 m tunnel [l/min]	0	0 – 10	10 – 25	25 – 125	> 125	
	+	+	+	o	–	
Abrasivität (CAI) Abrasivity (CAI)	extrem niedrig extremely low 0,1 – 0,5	sehr niedrig very low 0,5 – 1	niedrig low 1 – 2	mittel – hoch medium – high 2 – 4	sehr hoch – extrem hoch very high – extremely high 4 – 6	
	+	+	+	o	o	
Quellpotential Swelling potential	kein none	gering poor	mittel fair	hoch high		
	+	+	o	o		
Stützdruck [bar] Confinement pressure [bar]	0	1 – 4		4 – 7	7 – 15	
	+	–		–	–	

Anhang 3.4 Einsatzbereiche und Auswahlkriterien SLS

Geotechnische Kennwerte Geotechnical parameters	Slurryschild (Flüssigkeitsschild) (SLS) Slurry Shield (SLS)		+	Haupteinsatzbereich/main field of application			
			o	erweiterter Einsatzbereich/extended application			
			–	Einsatz eingeschränkt/application limited			
Lockergestein (Soil)							
Feinkornanteil (< 0,06 mm) DIN 18196 Fines content (< 0,06 mm)	< 5 %		5 – 15 %		15 – 40 %	> 40 %	
	+		+		+	o	
Durchlässigkeit k nach DIN EN ISO 17892-11 [m/s] Permeability k [m/s]	sehr stark very high > 10 ⁻²		stark high 10 ⁻² – 10 ⁻⁴		durchlässig permeable 10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁶	schwach low < 10 ⁻⁶	
	–		o		+	o	
Konsistenz (Ic) nach DIN EN ISO 17892-12 Consistency (Ic)	breiig very soft 0 – 0,5		weich soft 0,5 – 0,75		steif stiff 0,75 – 1,0	halbfest very stiff 1,0 – 1,25	fest hard 1,25 – 1,5
	–	o	o		o	o	o
Lagerungsdichte nach DIN 18126 Relative density	dicht dense		mitteldicht medium dense		locker loose		
	+		+		o		
Stützdruck [bar] Confinement pressure[bar]	0		1 – 4			4 – 7	7 – 15
	o		+			+	+
Quellpotential Swelling potential	kein none		gering little		mittel fair	hoch high	
	+		+		o	–	
Abrasivität (äquivalenter Quarzanteil) äQu [%] Abrasivity (equivalent quartz content) [%]	0 – 5		5 – 15		15 – 35	35 – 75	75 – 100
	+		+		+	o	o
Festgestein (Rock)							
Gesteinsfestigkeit [MPa] Unconfined compressive strength [MPa]	0 – 5	5 – 25	25 – 50		50 – 100	100 – 250	> 250
	o	o	o		o	o	o
Bohrkern – Gebirgsqualität [RQD] Core sample – rock quality designation [RQD]	sehr gering very poor 0 – 25		gering poor 25 – 50		mittel fair 50 – 75	gut good 75 – 90	ausgezeichnet excellent 90 – 100
	o		o		o	o	o
Rock Mass Ratio [RMR] Rock Mass Ratio [RMR]	sehr schlecht very poor < 20		schlecht poor 21 – 40		mäßig fair 41 – 60	gut good 61 – 80	sehr gut very good 81 – 100
	o		o		o	o	o
Wasserzufluss je 10 m Tunnel [l/min] Waterinflow per 10 m tunnel [l/min]	0		0 – 10		10 – 25	25 – 125	> 125
	o		o		o	o	o
Abrasivität (CAI) Abrasivity (CAI)	extrem niedrig extremely low 0,1 – 0,5		sehr niedrig very low 0,5 – 1		niedrig low 1 – 2	mittel – hoch medium – high 2 – 4	sehr hoch – extrem hoch very high – extremely high 4 – 6
	+		+		o	o	o
Quellpotential Swelling potential	kein none		gering poor		mittel fair	hoch high	
	+		+		o	–	
Stützdruck [bar] Confinement pressure [bar]	0		1 – 4			4 – 7	7 – 15
	o		+			+	+

Anhang 3.5 Einsatzbereiche und Auswahlkriterien EPB

Geotechnische Kennwerte Geotechnical parameters	Erddruckschildmaschine (EPB) Earth Pressure Balanced Shield (EPB)	+ Haupteinsatzbereich/main field of application				
		o erweiterter Einsatzbereich/extended application				
		- Einsatz eingeschränkt/application limited				
Lockergestein (Soil)						
Feinkornanteil (< 0,06 mm) DIN 18196 Fines content (< 0,06 mm)	< 5 %	5 – 15 %	15 – 40 %		> 40 %	
	–	o	o	+	+	
Durchlässigkeit k nach DIN EN ISO 17892-11 [m/s] Permeability k [m/s]	sehr stark very high > 10 ⁻²	stark high 10 ⁻² – 10 ⁻⁴	durchlässig permeable 10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁶		schwach low < 10 ⁻⁶	
	–	–	o		+	
Konsistenz (Ic) nach DIN EN ISO 17892-12 Consistency (Ic)	breiig very soft 0 – 0,5	weich soft 0,5 – 0,75	steif stiff 0,75 – 1,0		halbfest very stiff 1,0 – 1,25	fest hard 1,25 – 1,5
	o	+	+		o	o
Lagerungsdichte nach DIN 18126 Relative density	dicht dense	mitteldicht medium dense	locker loose			
	+	+	+			
Stützdruck [bar] Confinement pressure [bar]	0	1 – 4			4 – 7	7 – 15
	+	+			o	–
Quellpotential Swelling potential	kein none	gering little	mittel fair		hoch high	
	+	+	o		–	
Abrasivität (äquivalenter Quarzanteil) äQu [%] Abrasivity (equivalent quartz content) [%]	0 – 5	5 – 15	15 – 35		35 – 75	75 – 100
	+	+	o		o	–
Festgestein (Rock)						
Gesteinsfestigkeit [MPa] Unconfined compressive strength [MPa]	0 – 5	5 – 25	25 – 50	50 – 100	100 – 250	> 250
	o	o	o	–	–	–
Bohrkern – Gebirgsqualität [RQD] Core sample – rock quality designation [RQD]	sehr gering very poor 0 – 25	gering poor 25 – 50	mittel fair 50 – 75		gut good 75 – 90	ausgezeichnet excellent 90 – 100
	+	o	o		–	–
Rock Mass Ratio [RMR] Rock Mass Ratio [RMR]	sehr schlecht very poor < 20	schlecht poor 21 – 40	mäßig fair 41 – 60		gut good 61 – 80	sehr gut very good 81 – 100
	+	o	o		–	–
Wasserzufluss je 10 m Tunnel [l/min] Waterinflow per 10 m tunnel [l/min]	0	0 – 10	10 – 25		25 – 125	> 125
	o	o	o		o	o
Abrasivität (CAI) Abrasivity (CAI)	extrem niedrig extremely low 0,1 – 0,5	sehr niedrig very low 0,5 – 1	niedrig low 1 – 2		mittel – hoch medium – high 2 – 4	sehr hoch – extrem hoch very high – extremely high 4 – 6
	+	+	o		o	–
Quellpotential Swelling potential	kein none	gering poor	mittel fair		hoch high	
	+	+	o		–	
Stützdruck [bar] Confinement pressure [bar]	0	1 – 4			4 – 7	7 – 15
	o	+			o	–

Anhang 3.6 Einsatzbereiche und Auswahlkriterien VDS

Geotechnische Kennwerte Geotechnical parameters	Variable-Density-Schild (VDS) Variable Density Shield (VDS)		+	Haupteinsatzbereich/main field of application					
			o	erweiterter Einsatzbereich/extended application					
			–	Einsatz eingeschränkt/application limited					
Lockergestein (Soil)									
Feinkornanteil (< 0,06 mm) DIN 18196 Fines content (< 0,06 mm)	< 5 %		5 – 15 %		15 – 40 %		> 40 %		
	+		+		+		o		
Durchlässigkeit k nach DIN EN ISO 17892-11 [m/s] Permeability k [m/s]	sehr stark very high > 10 ⁻²		stark high 10 ⁻² – 10 ⁻⁴		durchlässig permeable 10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁶		schwach low < 10 ⁻⁶		
	–		o		+		o		
Konsistenz (Ic) nach DIN EN ISO 17892-12 Consistency (Ic)	breiig very soft 0 – 0,5		weich soft 0,5 – 0,75		steif stiff 0,75 – 1,0		halbfest very stiff 1,0 – 1,25		fest hard 1,25 – 1,5
	–	o	o		o		o		o
Lagerungsdichte nach DIN 18126 Relative density	dicht dense		mitteldicht medium dense		locker loose				
	+		+		o				
Stützdruck [bar] Confinement pressure [bar]	0		1 – 4				4 – 7		7 – 15
	o		+				+		o
Quellpotential Swelling potential	kein none		gering little		mittel fair		hoch high		
	+		+		o		–		
Abrasivität (äquivalenter Quarzanteil) äQu [%] Abravity (equivalent quartz content) [%]	0 – 5		5 – 15		15 – 35		35 – 75		75 – 100
	+		+		+		o		o
Festgestein (Rock)									
Gesteinsfestigkeit [MPa] Unconfined compressive strength [MPa]	0 – 5	5 – 25	25 – 50		50 – 100		100 – 250		> 250
	o	o	o		o		o		o
Bohrkern – Gebirgsqualität [RQD] Core sample – rock quality designation [RQD]	sehr gering very poor 0 – 25		gering poor 25 – 50		mittel fair 50 – 75		gut good 75 – 90		ausgezeichnet excellent 90 – 100
	o		o		o		o		o
Rock Mass Ratio [RMR] Rock Mass Ratio [RMR]	sehr schlecht very poor < 20		schlecht poor 21 – 40		mäßig fair 41 – 60		gut good 61 – 80		sehr gut very good 81 – 100
	o		o		o		o		o
Wasserzufluss je 10 m Tunnel [l/min] Waterinflow per 10 m tunnel [l/min]	0		0 – 10		10 – 25		25 – 125		> 125
	o		o		o		o		o
Abrasivität (CAI) Abravity (CAI)	extrem niedrig extremely low 0,1 – 0,5		sehr niedrig very low 0,5 – 1		niedrig low 1 – 2		mittel – hoch medium – high 2 – 4		sehr hoch – extrem hoch very high – extremely high 4 – 6
	+		+		o		o		o
Quellpotential Swelling potential	kein none		gering poor		mittel fair		hoch high		
	+		+		o		–		
Stützdruck [bar] Confinement pressure [bar]	0		1 – 4				4 – 7		7 – 15
	o		+				+		o

Anhang 3.7 Einsatzbereiche und Auswahlkriterien HYS

Geotechnische Kennwerte Geotechnical parameters	Hybrid-/Multimodeschild (HYS) Hybrid Shield (HYS)	+ Haupteinsatzbereich/main field of application				
		o erweiterter Einsatzbereich/extended application				
		– Einsatz eingeschränkt/application limited				
Lockergestein (Soil)						
Feinkornanteil (< 0,06 mm) DIN 18196 Fines content (< 0,06 mm)	< 5 %	5 – 15 %	15 – 40 %		> 40 %	
	–	o	o	+	+	
Durchlässigkeit k nach DIN EN ISO 17892-11 [m/s] Permeability k [m/s]	sehr stark very high > 10 ⁻²	stark high 10 ⁻² – 10 ⁻⁴	durchlässig permeable 10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁶		schwach low < 10 ⁻⁶	
	–	-	o		+	
Konsistenz (Ic) nach DIN EN ISO 17892-12 Consistency (Ic)	breiig very soft 0 – 0,5	weich soft 0,5 – 0,75	steif stiff 0,75 – 1,0		halbfest very stiff 1,0 – 1,25	fest hard 1,25 – 1,5
	o	+	+		o	o
Lagerungsdichte nach DIN 18126 Relative density	dicht dense	mitteldicht medium dense	locker loose			
	+	+	+			
Stützdruck [bar] Confinement pressure [bar]	0	1 – 4		4 – 7	7 – 15	
	+	+		o	-	
Quellpotential Swelling potential	kein none	gering little	mittel fair		hoch high	
	+	+	o		–	
Abrasivität (äquivalenter Quarzanteil) äQu [%] Abrasivity (equivalent quartz content) [%]	0 – 5	5 – 15	15 – 35		35 – 75	75 – 100
	+	+	o		o	–
Festgestein (Rock)						
Gesteinsfestigkeit [MPa] Unconfined compressive strength [MPa]	0 – 5	5 – 25	25 – 50	50 – 100	100 – 250	> 250
	o	o	o	–	–	–
Bohrkern – Gebirgsqualität [RQD] Core sample – rock quality designation [RQD]	sehr gering very poor 0 – 25	gering poor 25 – 50	mittel fair 50 – 75	gut good 75 – 90	ausgezeichnet excellent 90 – 100	
	+	o	o	–	–	
Rock Mass Ratio [RMR] Rock Mass Ratio [RMR]	sehr schlecht very poor < 20	schlecht poor 21 – 40	mäßig fair 41 – 60	gut good 61 – 80	sehr gut very good 81 – 100	
	+	o	o	–	–	
Wasserzufluss je 10 m Tunnel [l/min] Waterinflow per 10 m tunnel [l/min]	0	0 – 10	10 – 25	25 – 125	> 125	
	o	o	o	o	o	
Abrasivität (CAI) Abrasivity (CAI)	extrem niedrig extremely low 0,1 – 0,5	sehr niedrig very low 0,5 – 1	niedrig low 1 – 2	mittel – hoch medium – high 2 – 4	sehr hoch – extrem hoch very high – extremely high 4 – 6	
	+	+	o	o	o (VS1/2)	– (VS3)
Quellpotential Swelling potential	kein none	gering poor	mittel fair	hoch high		
	+	+	o	–		
Stützdruck [bar] Confinement pressure [bar]	0	1 – 4		4 – 7	7 – 15	
	o	+		–	–	

Anhang 3.8 Einsatzbereiche und Auswahlkriterien EXX/RHS

Geotechnische Kennwerte Geotechnical parameters	Teilschnittmaschine mit Bagger (EXS) oder Schräme (RHS) Excavator (EXS) or Roadheader (RHS) Shield			+	Haupteinsatzbereich/main field of application		
				o	erweiterter Einsatzbereich/extended application		
				–	Einsatz eingeschränkt/application limited		
Lockergestein (Soil)							
Feinkornanteil (< 0,06 mm) DIN 18196 Fines content (< 0,06 mm)	< 5 %	5 – 15 %		15 – 40 %		> 40 %	
	–	–	o	o	+	+	
Durchlässigkeit k nach DIN EN ISO 17892-11 [m/s] Permeability k [m/s]	sehr stark very high > 10 ⁻²	stark high 10 ⁻² – 10 ⁻⁴		durchlässig permeable 10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁶		schwach low < 10 ⁻⁶	
	–	o		o		+	
Konsistenz (Ic) nach DIN EN ISO 17892-12 Consistency (Ic)	breiig very soft 0 – 0,5	weich soft 0,5 – 0,75		steif stiff 0,75 – 1,0		halbfest very stiff 1,0 – 1,25	fest hard 1,25 – 1,5
	–	–		o		+	+
Lagerungsdichte nach DIN 18126 Relative density	dicht dense	mitteldicht medium dense		locker loose			
	+	o		–			
Stützdruck [bar] Confinement pressure [bar]	0	1 – 4				4 – 7	7 – 15
	+	–				–	–
Quellpotential Swelling potential	kein none	gering little		mittel fair		hoch high	
	+	+		o		–	
Abrasivität (äquivalenter Quarzanteil) äQu [%] Abravity (equivalent quartz content) [%]	0 – 5	5 – 15		15 – 35		35 – 75	75 – 100
	+	+		+		+	o
Festgestein (Rock)							
Gesteinsfestigkeit [MPa] Unconfined compressive strength [MPa]	0 – 5	5 – 25	25 – 50		50 – 100	100 – 250	> 250
	+	+	+		o	–	–
Bohrkern – Gebirgsqualität [RQD] Core sample – rock quality designation [RQD]	sehr gering very poor 0 – 25	gering poor 25 – 50		mittel fair 50 – 75		gut good 75 – 90	ausgezeichnet excellent 90 – 100
	o	+		+		o	o
Rock Mass Ratio [RMR] Rock Mass Ratio [RMR]	sehr schlecht very poor < 20	schlecht poor 21 – 40		mäßig fair 41 – 60		gut good 61 – 80	sehr gut very good 81 – 100
	o	+		+		o	o
Wasserzufluss je 10 m Tunnel [l/min] Waterinflow per 10 m tunnel [l/min]	0	0 – 10		10 – 25		25 – 125	> 125
	+	+		+		o	–
Abrasivität (CAI) Abravity (CAI)	extrem niedrig extremely low 0,1 – 0,5	sehr niedrig very low 0,5 – 1		niedrig low 1 – 2		mittel – hoch medium – high 2 – 4	sehr hoch – extrem hoch very high – extremely high 4 – 6
	+	+		+		o	o
Quellpotential Swelling potential	kein none	gering poor		mittel fair		hoch high	
	+	+		o		–	
Stützdruck [bar] Confinement pressure [bar]	0	1 – 4				4 – 7	7 – 15
	o	–				–	–