



Zielgenau bis ans Ende des Tunnels

Handbuch für die Bauvorbereitung, Vermessung
und Bauüberwachung von Schildvortrieben

Dietmar Placzek
Rolf Bielecki
Manfred Messing
Frank Schwarzer

Dietmar Placzek
Rolf Bielecki
Manfred Messing
Frank Schwarzer

Zielgenau bis ans Ende des Tunnels

Zielgenau bis ans Ende des Tunnels

**Handbuch für die Bauvorbereitung, Vermessung
und Bauüberwachung von Schildvortrieben**

Dietmar Placzek
Rolf Bielecki
Manfred Messing
Frank Schwarzer

Prof. Dr.- Ing. Dietmar Placzek
ELE Beratende Ingenieure GmbH
Erdbaulaboratorium
Susannastr. 31
55136 Essen

Dipl.-Ing. Manfred Messing
VMT GmbH
Stegwiesenstraße 24
76646 Bruchsal

Dipl.-Ing. Rolf Bielecki, Ph. D.
In der Koppel 21
21266 Jesteburg

Frank Schwarzer – Tunnel24
Viktoriastr. 10
46483 Wesel

Titelfoto: Stadtbahntunnel Karlsruhe

Für die freundliche Zustimmung zum Abdruck des Titelfotos „Stadtbahntunnel Karlsruhe“ danken wir den Verantwortlichen.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© 2016 Wilhelm Ernst & Sohn,

Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG,
Rotherstraße 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten.

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

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

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

Umschlaggestaltung: Sonja Frank Grafikdesign, Berlin

Herstellung: pp030 – Produktionsbüro Heike Praetor, Berlin

Satz: BELTZ Bad Langensalza GmbH, Bad Langensalza

Druck und Bindung:

Printed in the Federal Republic of Germany.

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Print ISBN: 978-3-433-03114-8

ePDF ISBN: 978-3-433-60572-1

ePub ISBN: 978-3-433-60571-4

eMobi ISBN: 978-3-433-60570-7

oBook ISBN: 978-3-433-60573-8

Vorwort

Der maschinelle Tunnelbau hat in den zurückliegenden Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen, auch dort, wo bislang bergmännische Bauweisen weit verbreitet waren. Damit einher ging in den letzten 10 bis 15 Jahren eine rasante Entwicklung der Automatisierung und Digitalisierung, um ein Höchstmaß an Genauigkeit und Geschwindigkeit bei Schildvortrieben ohne menschliche Fehlerquellen mit hoher Sicherheit für Mineure und Umfeld zu erreichen.

Doch trotz umfassender Mechanisierung stellen unterirdische Schildvortriebe auch heute noch besondere Herausforderungen beim sehr komplexen Tunnelbau dar. Diese exemplarisch für die Bauvorbereitung (Planung und Ausschreibung), Vermessung und Bauüberwachung erstmalig zusammengefasst zu erläutern, soll Aufgabe dieses Buches sein. Es wurde u. a. aus der Fülle gemachter Erfahrungen für Bauherrn, Planer, Bauausführende sowie für den Ingenieur Nachwuchs geschrieben und wird der weiteren Forschung und Entwicklung wichtige Hinweise geben.

Das vorliegende Buch stellt die unterschiedlichen Anforderungen an den Schildvortrieb dar, weist auf Risiken hin und bietet von der Bauvorbereitung bis zur Bauüberwachung Lösungshilfen an. Dabei stehen im Fokus die Anforderungen aus der Nutzung, dem Baugrund, den unterschiedlichen maschinellen Vortriebsverfahren, der Qualität der Infrastrukturbauwerke, der Standsicherheit und – nicht zu vergessen – der Vermessung. Daneben enthält es als Handbuch Empfehlungen für die Ausschreibung und kann so als Leitfaden für einen zielgenauen Schildvortrieb dienen.

Große faszinierende Tunnelbauaufgaben stehen in der Zukunft an. Sie zu bewältigen, erfordert ein fundiertes Wissen und damit eine internationale Zusammenarbeit von Experten aus verschiedensten Fachrichtungen, so z. B. auf den Gebieten Bau, Geologie, Hydrologie, Geotechnik, Maschinenbau, Geodäsie, Elektrik, Technische Informatik, Umweltschutz und Sicherheitstechnik. Grund genug, im Buch begleitende Themen zielgenauer Schildvortriebe teils auch im Anhang aufzunehmen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Emschergenossenschaft Essen dafür, dass sie bei einem der größten Infrastrukturprojekte Europas, der Umgestaltung der Emscher, im Rahmen eines Arbeitskreises ihre Erfahrungen einbringen konnten und dafür, dass einige ihrer für dieses Projekt entwickelten Ergebnisse in diesem Buch Eingang finden dürfen.

Februar 2016

Dietmar Placzek, Rolf Bielecki, Manfred Messing, Frank Schwarzer

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Planungsgrundlagen	5
2.1	Anforderungen aus der Nutzung der Tunnel	5
2.2	Anforderungen aus Genehmigungen	6
2.3	Anforderungen aus dem Baugrund und dem Grundwasser	6
2.3.1	Vorbemerkungen	6
2.3.2	Lockergesteine	7
2.3.3	Steine, Findlinge	10
2.3.4	Festgestein	10
2.3.5	Künstliche Bauhindernisse	12
2.3.6	Baugrundeinflüsse auf den Vortrieb	13
2.3.7	Anforderungen an den Vortrieb	24
2.4	Anforderungen aus den maschinellen Vortriebsverfahren	26
2.4.1	Übersicht über die verschiedenen Vortriebsverfahren	26
2.4.2	Unbemannte steuerbare Vortriebsverfahren	26
2.4.3	Bemannte steuerbare Vortriebsverfahren	28
2.4.4	Erfahrungswerte für den Einsatz der Verfahren	31
2.5	Anforderungen an die Qualität unterirdischer Infrastrukturbauwerke	33
2.6	Anforderungen aus der Vermessung	33
2.6.1	Realisierbarkeit	33
2.6.2	Erhebung notwendiger Unterlagen	35
2.6.3	Bestandsvergleich (Ortsbegehungen) und Bestandsaufnahme	35
2.7	Anforderungen an die Standsicherheit	36
2.7.1	Stützung der Ortsbrust	36
2.7.2	Mindestüberdeckung	38
2.7.3	Setzungen/Hebungen	39
2.8	Anforderungen aus dem Umweltschutz	39
3	Planung	41
3.1	Vorbemerkungen	41
3.2	Ergänzende Bestandsaufnahme zur Vervollständigung der Planunterlagen	42
3.3	Planung des Grundlagentetzes	42
3.3.1	Grundlagentetz (GLN)	42
3.3.2	Baustellennetz	43
3.3.3	Portalnetz	44
3.3.4	Überprüfung und Neubestimmung von Festpunkten	45
3.3.5	Grundsätzliche Umstände zur Erzielung des gewünschten Ergebnisses	45

3.3.6	Vorgaben für die Ausführung der Vermessungsarbeiten	46
3.4	Trassen- und Gradientenplanung – Parameter der Achsplanung	47
3.4.1	Design und Begriffsdefinition	47
3.4.2	Trasse	48
3.4.3	Gradienten	49
3.5	Feststellung der Baugrund- und Grundwasserverhältnisse	50
3.6	Ermittlung der äußeren Einwirkungen auf den Tunnel	53
3.7	Berechnung der Bewegungen an der Geländeoberfläche	54
3.8	Beweissicherung	57
3.8.1	Anforderungen an die Beweissicherung	57
3.8.2	Festlegung des Einflussbereichs der Baumaßnahme	57
3.8.3	Zustandserfassung vorhandener Anlagen, der Geländeoberfläche und des Baugrunds	58
3.8.4	Dokumentation der Ergebnisse der Beweissicherung	62
3.9	Tunnelbautechnische Planung	62
3.10	Tunnelbautechnische Prüfung	63
3.11	Auswahl des Vortriebsverfahrens	64
3.12	Festlegung der Ausbauqualität	86
3.13	Risikobewertung „EG-Tunnelrichtlinie“	86
4	Maschinen- und Verfahrenstechnik	87
4.1	Hinweise für die Baugruben und deren Einrichtungen beim Rohrvortrieb	87
4.1.1	Startbaugruben	96
4.1.2	Zwischenbaugruben	98
4.1.3	Zielbaugruben	99
4.2	An-, Aus-, Durch- und Einfahren der TBM	100
4.2.1	Überprüfung der Einsatzfähigkeit der TBM	100
4.2.2	Presseinrichtung und Widerlager bei Rohrvortrieben	101
4.2.3	Aus- und Einfahrdichtungen	102
4.2.4	Positionieren und Anfahren der TBM	103
4.2.5	Steuerbarkeit	104
4.3	Hinweise für den Tunnelausbau	105
4.3.1	Vortriebsrohre	105
4.3.2	Tübbingausbau	106
4.4	Vortriebsarbeiten	107
4.4.1	Personaleinsatz während des Vortriebs	107
4.4.2	Überschnitt/Ringspalt	109
4.4.3	Vortriebskräfte	112
4.4.4	Rohrschmierung	113
4.4.5	Haltungslängen	115
4.4.6	Zwischenpresstationen	115
4.4.7	Kurvenradien	118
4.4.8	Verrollungssicherung	119
4.4.9	Sicherheitstechnik	120
4.4.10	Vortriebsbegleitende Baugrunderkundung	121

4.5	Navigationstechnik	123
4.5.1	Einführung	123
4.5.2	Navigationssysteme für Microtunnelling/Rohrvortrieb	127
4.5.3	Navigationssysteme für Vortriebe mit Tübbingausbau	137
4.6	Spezifikation des Datenerfassungssystems für den Rohrvortrieb	149
4.6.1	Aufzuzeichnende Parameter in Abhängigkeit der verwendeten Geräte und Verfahren	150
4.6.2	Anforderungen an Erfassung, Anzeige, Sicherung usw. der relevanten Vortriebsparameter	159
4.6.3	Definition von Minimal-, Mittel- und Maximalwerten	160
4.6.4	Datenerfassung beim Einsatz von Zwischenpressstationen	160
4.6.5	Bereitstellung der Daten zur Auswertung, Ausgabe, Dokumentation, Weiterverarbeitung	160
4.6.6	Schnittstellen	161
4.7	Steuerungstechnik	161
4.7.1	Aufgaben der Steuerungstechnik/Steuerungssysteme für den Rohrvortrieb (Trassierung, Maschinenteknik, Rohrdimension, Automatisierungsgrad, Notprogramme)	161
4.7.2	Anordnung der Steuereinrichtung	162
4.7.3	Kurskorrekturen	163
4.7.4	Kontrollmöglichkeiten	174
4.7.5	Automatische Steuersysteme	175
4.7.6	Verrollungskompensierte Steuerung	176
4.8	Separations- und Aufbereitungstechnik bei Schildvortrieben mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust	177
4.8.1	Vorbemerkungen	177
4.8.2	Art und Umfang des Separationskonzepts	179
4.8.3	Zusammenspiel der Komponenten	186
4.8.4	Zusammenfassung	187
5	Vermessung	189
5.1	Bezugssysteme – geodätisches Datum	190
5.1.1	Geodätisches Datum bei kleinräumigen Projekten	190
5.1.2	Geodätisches Datum bei großräumigen Projekten	191
5.1.3	Definition des Bezugssystems	192
5.1.4	Projektion	193
5.1.5	Streckenreduktionen	193
5.2	Vorhandenes Lage- und Höhennetz	194
5.2.1	Lagereferenznetz	194
5.2.2	Höhenreferenznetz	195
5.2.3	Referenznetzkonfiguration	195
5.3	Vorgaben für die Ausführung der Vermessungsarbeiten	197
5.3.1	Einzusetzendes Personal des Auftragnehmers	198
5.3.2	Feldbuch	198

5.4	Oberirdische Vermessungsarbeiten (Kombinierte Lage- und Höhenvermessung)	199
5.4.1	GNSS-Messungen	199
5.4.2	Tachymetrie	206
5.5	Oberirdische Vermessungsarbeiten (Höhenvermessung)	214
5.5.1	Trigonometrische Höhenübertragung	214
5.5.2	Geometrisches Nivellement	215
5.5.3	Hydrostatisches Nivellement	218
5.6	Unterirdische Vermessungsarbeiten	218
5.6.1	Grundsätzliches	218
5.6.2	Refraktion	219
5.6.3	Untertägige Lagevermessung	221
5.6.4	Auswertung von Vermessungsergebnissen	227
5.6.5	Durchschlagsprognose	228
5.6.6	Unabhängige durchgreifende Kontrolle der horizontalen Punktbestimmung mithilfe geodätischer Kreismessung	228
5.6.7	Untertägige Höhenbestimmung	233
5.7	Messungen in Start- und Zielbaugrube	235
5.7.1	Punkt- und Richtungsübertragung	236
5.7.2	Teufenmessung	241
5.8	Festpunkte	242
5.8.1	Design	242
5.8.2	Genauigkeit der Festpunkte	246
5.8.3	Nummerierungsprinzipien der Festpunkte	246
5.9	Übergabe der Trasse vom Auftraggeber an den Auftragnehmer	247
5.9.1	Trassierungspunkte und -elemente	247
5.9.2	Festlegung der Vorgehensweise bei Änderung der Trasse	250
6	Qualitätsmanagement	251
6.1	Vermessungs- und Navigationsgeräte	251
6.1.1	Regelmäßige Prüfung der Geräte und Prüfberichte	251
6.1.2	Prüfung der Geräte vor Beginn der Messung	251
6.2	Vermessungsverfahren	252
6.2.1	Dokumentation des Vermessungsverfahrens	252
6.2.2	Dokumentation von Kontrollsystemen	253
6.3	Maschinen- und Verfahrenstechnik	254
6.3.1	Prüfung der verwendeten Maschinen und Verfahren	254
6.3.2	Maschinenunabhängige Kontrollverfahren	254
6.3.3	Verifikationen der verwendeten Verfahren	254
6.3.4	„Worst case“-Szenario, Informationskette und Entscheidungsstationen	254
6.3.5	Erfassung, Aufbereitung, Darstellung, Dokumentation usw. der relevanten Parameter gemäß den definierten Kriterien	255
6.3.6	Überprüfung auf Einhaltung der vorgegebenen Grenzwerte	255
6.4	Prozess-Controlling und Datenmanagement	255
6.4.1	Entwicklungsschritte	256
6.4.2	Datenerfassung und Anforderungen im Baubetrieb	256

6.4.3	Virtuelle Sensorik	262
6.4.4	Aktuelle Entwicklungen	262
6.4.5	Auswertung und Analyse im Rahmen von Soll-Ist-Vergleichen	263
6.4.6	Aushubmassentransport/Logistik	263
6.4.7	Eingliederung von Informationssystemen in die Bauabläufe	266
6.5	Schulung und Weiterbildung des Personals	267
6.5.1	Vermessungsfachkräfte	267
6.5.2	Maschinenfahrer	268
7	Risikomanagement	269
7.1	Tunnelbauhandbuch (THB)	269
7.2	Risikofolgen – Abschätzung und Sicherheitsbewertung	270
7.3	Risikoverteilung bei Bauverträgen	271
7.4	Zielgrößen einer risikominimierten Bauwerkserstellung	271
8	Empfehlungen für die Ausschreibung	273
8.1	Allgemeine Hinweise	273
8.2	Baugrundrisiko	277
8.3	Störfallanalyse mit Risikobewertung und -verteilung	278
8.4	Qualitätssicherung	284
8.5	Pflichtenheft der Tunnelbohrmaschine (TBM)	286
8.6	Versicherungen	286
9	Schlusswort – Ausblick	289
Anhang 1	.....	291
Anhang 2	.....	295
Anhang 3	.....	303
Anhang 4	.....	311
Literatur	.....	315
Normen und Regelwerke	.....	319
Stichwortverzeichnis	.....	325

1 Einführung

Tunnel gehören seit über 3000 Jahren zu den anspruchsvollsten Ingenieurbauwerken, da sie bei wechselnden Baugrund- und Grundwasserverhältnissen, unterschiedlichen Überdeckungen und mit den verschiedensten Einflüssen aus der benachbarten Bebauung und der Verkehrsbelastung an der Tagesoberfläche im Untergrund hergestellt werden. Jeder Bauherr, Planer, Mineur und Nutzer freut sich, wenn er am Ende des Tunnels Licht sieht und dies insbesondere bei der Herstellung. Das war auch im Jahr 530 v. Chr. beim Tunnelbaupionier *Eupalinos von Megara* der Fall, der auf der griechischen Insel Samos einen 1.036 m langen Wasserversorgungstunnel aus zwei Richtungen durch einen Berg hindurch im Gegenvortrieb in einer Bauzeit von ca. 10 Jahren herstellen ließ (Bild 1.1). Der Wasserversorgungstunnel war über mehr als 1.000 Jahre (etwa bis ins 7. Jahrhundert n. Chr.) in Betrieb.

Der Eupalinos-Tunnel wurde bei einer Überdeckung von maximal 180 m innerhalb eines festen Kalksteins vorgetrieben. Dabei mussten für den nahezu quadratischen Querschnitt mit Abmessungen von ca. 1,80 m × 1,80 m rund 5.000 m³ Fels ausgebrochen und zutage gefördert werden. Vortriebswerkzeuge waren allein Hammer und Meißel. Zur Erreichung des Vortriebszieles war es zwingend notwendig, die Höhe der Tunnelleingänge auf beiden Seiten und die Vortriebsrichtung mit höchster Genauigkeit

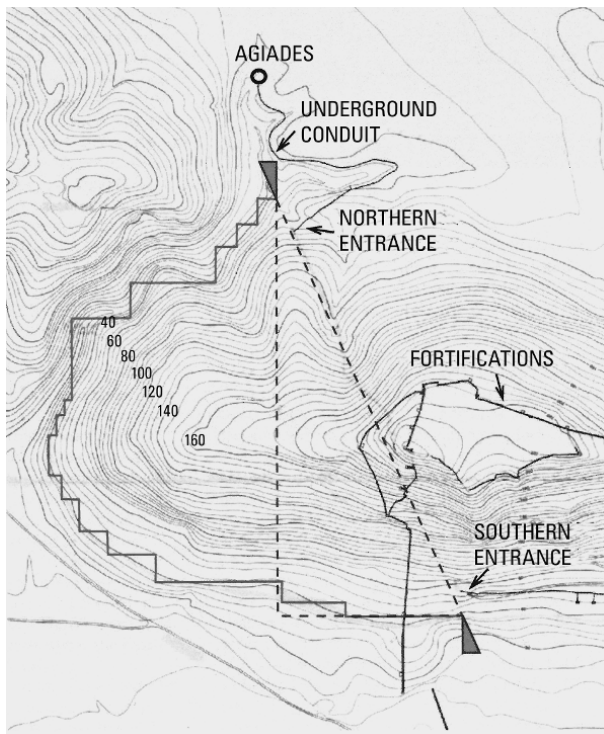


Bild 1.1 Mögliche Art der Vermessung zur Erreichung zielgenauer Vortriebe von beiden Seiten nach [1.1]

zu bestimmen. Das dies gelang, beweisen die Höhenmessungen der Tunnelsohle am Treffpunkt der beiden Vortriebe, die lediglich eine Höhendifferenz von rund 60 cm aufweisen, woraus sich ein Gefälle von etwa 1,1‰ ableiten ließe, würde die Höhendifferenz auf die jeweilige Vortriebslänge der beiden Vortriebe bezogen. Damit liegt der Tunnel baupraktisch horizontal und eben. Um sicherzustellen, dass sich beide Vortriebe auch treffen, ließ *Eupalinos* die Vortriebe kurz vor Erreichen des Treffpunkts in die gleiche Richtung abweichen, sodass sie sich bei gleicher Höhenlage zwangsläufig treffen mussten. Offensichtlich traten bei den Vortriebsarbeiten auch Schwierigkeiten mit dem anstehenden Fels auf, sodass der Vortrieb in einem Teilbereich seine vorgegebene Richtung ändern musste. Ob hierfür gebräuchliches Gebirge, wasserführende Schichten o. Ä. verantwortlich waren, kann nicht mit letzter Sicherheit gesagt werden.

Wie die Erreichung des Vortriebszieles vermessungstechnisch im 6. Jahrhundert v. Chr. gelang, ist bis heute noch nicht eindeutig geklärt. Entweder erfolgte eine Höhen- und eine Abstandsmessung über den Berg hinweg oder um den Berg herum [1.1], [1.2] (Bild 1.2). In beiden Fällen entsteht zwangsläufig eine Summation der bei jeder Einzelmessung zwischen zwei Messpunkten auftretenden Messungenauigkeit, deren absolute Größe auch durch die topografischen Verhältnisse entscheidend mit bestimmt worden sein kann.

Anhand dieses Beispiels aus der Antike wird deutlich, wie wichtig nicht nur die Trassen- und Gradientenplanung eines Tunnelbauwerks, die Feststellung der Bau-

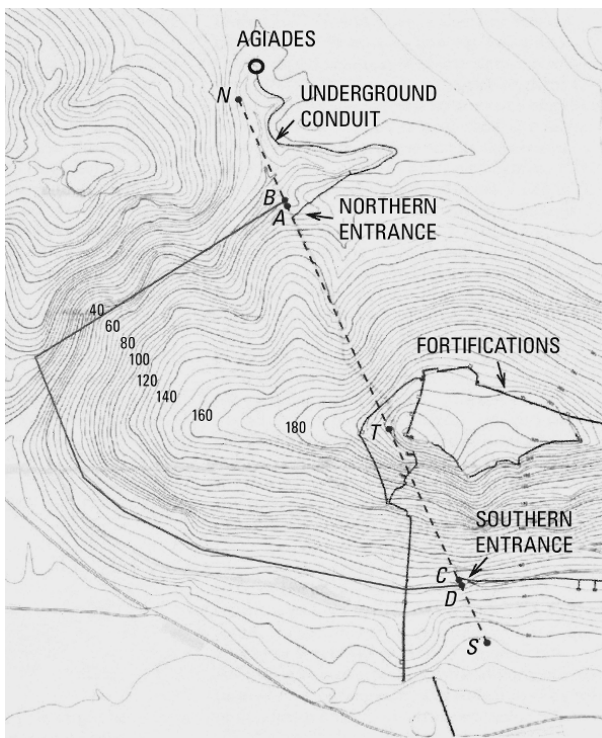


Bild 1.2 Schematische Darstellung der möglichen Höhen- und Abstandsmessung zur Bestimmung der möglichen Richtung für die Tunnelvortriebe aus beiden Richtungen [1.2]

grund- und Grundwasserverhältnisse sowie die Ermittlung der maßgeblichen Einwirkungen und Widerstände und die Wahl des Vortriebsverfahrens sind, sondern darüber hinaus auch die begleitende Vortriebsüberwachung und Kontrolle. Denn schließlich und endlich soll das fertige Tunnelbauwerk nicht nur in seiner Beschaffenheit und Funktion an der Stelle liegen, an der es auch planmäßig vorgesehen war, sondern auch unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte in angemessener Zeit fertiggestellt werden. Der Genauigkeit des Vortriebs kommt daher eine ganz besondere Bedeutung zu. Insbesondere dann, wenn eine langfristige Nutzung oder ein langfristiger Betrieb vorgesehen ist.

Tunnel dienen im Wesentlichen der Ver- und Entsorgung (Wasser, Abwasser, Energie u. Ä.) und dem Verkehr (Straße, Fernbahn, U-Bahn, Fußgänger u. Ä.). Sie werden in unterschiedlichen Bauweisen hergestellt. Unterschieden wird im Allgemeinen in zwei großen Gruppen:

- geschlossene Bauweisen,
- offene Bauweisen.

Von offenen Bauweisen wird gesprochen, wenn das Tunnelbauwerk in einer offenen Baugrube hergestellt und anschließend wieder überschüttet wird.

Bei geschlossenen Bauweisen handelt es sich um die klassischen, bergmännischen Vortriebe (universelle Bauweise mittels Bohr- und Sprengvortrieb bzw. Baggerausbruch) oder um maschinelle Vortriebe (Tunnelvortriebsverfahren mittels Tunnelvortriebsmaschinen TVM), überwiegend mit Tunnelbohrmaschinen (TBM). In diesem Handbuch wird für alle Tunnelvortriebsmaschinen die Bezeichnung TBM verwendet, da sie international eine weite Verbreitung gefunden hat.

Behandelt werden alle maschinellen Schildvortriebe ab DN 500, die steuerbar und kontrollierbar sind. Vortriebe, die mittels Schneckenbohr- oder Spülbohrverfahren nicht oder nur bedingt steuerbar sind, scheiden bei den weiteren Betrachtungen ebenso aus wie universelle Vortriebe. Zahlreichen Erfahrungen bei Rohrvortrieben und Tunnelvortrieben mit Tübbingausbau haben hier ihren Niederschlag gefunden. Die in den einzelnen Kapiteln beschriebenen Erfahrungen und Erkenntnisse, die schwerpunktmäßig für Rohrvortriebe oder für Tunnelvortriebe mit Tübbingausbau dargestellt sind, gelten sinngemäß auch für das jeweils andere Verfahren.

Dieses Handbuch soll Grundlage für die Bauvorbereitung (Planung, Ausschreibung), die Vermessung und die Bauüberwachung von Schildvortrieben sein. Folglich richtet es sich an Bauherrn, Planer, Prüfer und Ausführende zur Nutzung als technischer Leitfaden für einen sicheren zielgenauen Vortrieb. Darüber hinaus kann es als Lehrbuch im Rahmen der Aus- und Weiterbildung dienen.

2 Planungsgrundlagen

2.1 Anforderungen aus der Nutzung der Tunnel

Die verkehrlichen Verhältnisse in **Straßentunneln** sollten grundsätzlich denen der freien Strecke entsprechen. Aus Sicherheitsüberlegungen ist es jedoch geboten, in der Regel die zulässige Höchstgeschwindigkeit (Entwurfsgeschwindigkeit) in Straßentunneln auf 80 km/h zu beschränken.

Zu unterscheiden sind Straßentunnel für den Gegenverkehr und Straßentunnel für den Richtungsverkehr. Tunnel für den Gegenverkehr bestehen im Regelfall aus einem Fahrstreifen je Richtung. Bei Tunneln für den Richtungsverkehr werden die Fahrrichtungen dagegen baulich voneinander getrennt, z. B. durch den Bau von zwei Tunnelröhren. Während in der Vergangenheit dabei pro Röhre häufig zwei Fahrstreifen ohne Seitenstreifen ausgeführt wurden, werden künftig als Folge sich ändernder Verkehrszusammensetzungen und ständig steigender Verkehrsbelastungen auch drei Fahrstreifen ohne Seitenstreifen, in Ausnahmefällen sogar drei Fahrstreifen mit Seitenstreifen (Standstreifen) erforderlich.

Die Gestaltung von Straßentunnelquerschnitten erfolgt in Deutschland nach den „Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)“ unter Berücksichtigung der „Richtlinien für die Anlage von Straßen, Querschnitte (RAS-Q) und Linienführung (RAS-L)“. In diesen Richtlinien sind u. a. Anforderungen an den Regelquerschnitt, den einzuhaltenden lichten Raum bzw. Verkehrsraum, an die Quer- und Längsneigungen im Tunnel sowie die Mindestwerte für Kurvenradien, Kuppen – ($HK \geq 4.400$ m) und Wannenhalmesser ($HW \geq 1.300$ m) sowie die Anordnung von Pannbuchten und Notausgängen enthalten.

Nach RAS-L sollen die Längsneigungen im Bereich von Straßentunnelstrecken nach Möglichkeit auf max. 4% begrenzt werden. Besonders bei großen Tunnelstrecken sind Längsneigungen von 2,5 bis 3,5% anzustreben.

Die Querneigung von Straßentunneln sollte in den Geraden zur Abführung des Oberflächenwassers einen Mindestwert von 2,5% haben, in Kurven ist dieser Wert der Entwurfsgeschwindigkeit anzupassen.

Nach der DB-Richtlinie RiL 853 (DB Netz: Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten) gibt es für **Eisenbahntunnel** vier unterschiedliche Kategorisierungen entsprechend den Entwurfsgeschwindigkeiten VE:

- Höchstgeschwindigkeitsverkehr mit $230 \text{ km/h} < VE \leq 300 \text{ km/h}$,
- Schnellverkehr mit $160 \text{ km/h} < VE \leq 230 \text{ km/h}$,
- Personen- und Güterverkehr mit $VE \leq 160 \text{ km/h}$,
- S-Bahn-Verkehr mit $VE \leq 120 \text{ km/h}$.

Die Längsneigung der Strecken soll bei Hauptbahnen auf ca. 12,5 bis 14,5‰ und bei S- und Nebenbahnen auf 40‰ begrenzt bleiben. Als untere Grenze sollte eine Längsneigung von 2‰ (Tunnellänge $l < 1.000$ m) bzw. 4‰ (Tunnellänge $l \geq 1.000$ m) nicht unterschritten werden.

In Abhängigkeit von den einzelnen Nutzungsvarianten schreibt die RiL 853 unterschiedliche Gleisabstände in den Tunneln und somit verschiedene Querschnittsformen vor, außerdem unterschiedliche Querschnittsgrößen entsprechend ihrer Nutzung (z. B. zweigleisiger Hochgeschwindigkeitstunnel mit Korbbogenquerschnitt von 12,78 m innerer Breite).

Die Trassen von **Abwasserleitungstunnel** sind so zu planen, dass ausschließlich Geraden und Radien in tangentialer Abfolge verwendet werden. Bei Rohrvortrieben ist hierbei zu berücksichtigen, dass unabhängig vom Rohrdurchmesser zwischen Startbaugrube und Kurvenbeginn eine gerade Strecke von mindestens 50 m liegen sollte. Sofern möglich, sollten Kurven am Ende einer Vortriebsstrecke angeordnet werden.

Für die Gradientenneigungen von Abwasserleitungen sind die Bemessungstafeln für ablagerungsfreien Betrieb zugrunde zu legen. Für begehbare Abwasserleitungen sollte möglichst eine Gradientenneigung unterhalb von 1,5‰ vermieden werden.

Fußgängertunnel sollten Gradientenneigungen von 1,0 bis max. 6,0‰ aufweisen.

2.2 Anforderungen aus Genehmigungen

Für die Planung, Ausschreibung, Vermessung und Bauüberwachung unterirdischer Vortriebe sind auch die genehmigungsrechtlichen Randbedingungen zu berücksichtigen. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um Anforderungen aus dem Boden- und Grundwasserschutz, dem Schutz von Bauwerken an der Tagesoberfläche sowie dem Erschütterungs- und Lärmschutz im Hinblick auf die Einwirkungen auf das Umfeld.

Aus diesen genehmigungsrechtlichen Randbedingungen erwachsen Auflagen für die Trassen- und Gradientenplanung, die Auswahl des Vortriebsverfahrens und die begleitende Vortriebsüberwachung.

2.3 Anforderungen aus dem Baugrund und dem Grundwasser

2.3.1 Vorbemerkungen

Im Rahmen dieses Handbuchs sollen im Folgenden die allgemeinen und die im Vortriebsbereich zu erwartenden Baugrundverhältnisse unter Berücksichtigung ihrer physikalischen Einwirkungen auf den Tunnelvortrieb und hier insbesondere auf die Beeinflussung der Vortriebsgenauigkeit beschrieben und beurteilt werden. Dabei beschränken sich die allgemeinen Abhandlungen zur Geologie und Hydrogeologie auf die wesentlichen faktischen Unterscheidungsmerkmale der unterschiedlichen Boden- und Felsarten sowie der möglichen Einflüsse aus den Grundwasserverhältnissen. Eine detailliert vorgenommene Abhandlung über die Baugrund- und Grundwasserverhältnisse wird nur insofern vorgenommen, als sie unmittelbar den Einfluss auf die Vortriebsgenauigkeit betrifft. Hierbei wird, basierend auf den maßgeblichen Normen und Richtlinien bzw. Empfehlungen zur Benennung und Beschreibung der Boden-

und Felsarten, auch auf die dort vorgenommenen Festlegungen zur Einordnung in Boden- und Felsarten für eine Klassifizierung zurückgegriffen. Im Wesentlichen wird unterschieden zwischen nichtbindigen und bindigen Bodenarten sowie unterschiedlichen Felsarten. Dabei wird auch der Einfluss des Wassers innerhalb der unterschiedlichen Boden- und Felsarten auf das mechanische Verhalten und damit auf die Vortriebsarbeiten bzw. die Vortriebsgenauigkeit beurteilt.

Neben den natürlichen Baugrundverhältnissen wird in Abschnitt 2.3.5 auch auf möglicherweise vorkommende anthropogene Auffüllungen und hierdurch bedingte mögliche Vortriebshindernisse und Bauwerke bzw. Bauwerksreste, die infolge der Vornutzung der Areale im Baugrund verblieben sind, eingegangen.

2.3.2 Lockergesteine

2.3.2.1 Zustandsbeschreibung

Für die Beschreibung, Benennung und Untersuchung von Boden und Fels gelten im Wesentlichen die am Ende des Buches aufgeführten Normen und Richtlinien.

Danach wird im Wesentlichen unterschieden in

a) nichtbindige Lockergesteine

Hierbei handelt es sich um Sande und Kiese.

b) bindige Lockergesteine

Schluffe und Tone bzw. Gemische dieser beiden Bodenarten mit nichtbindigen Bodenarten wie Sand und Kies.

Neben diesen beiden Hauptarten von Lockergesteinen können auch oberflächennah organische Böden wie Torfe und Schlammablagerungen auftreten.

Die o. g. Einteilung der unterschiedlichen Lockergesteine erfolgt dabei überwiegend aufgrund ihrer Korngrößenverteilung (Bild 2.1). So wird von Ton gesprochen bei Korndurchmessern von $d \leq 0,002$ mm, von Schluffen bei Korndurchmessern von $0,002 \text{ mm} \leq d \leq 0,063$ mm, von Sanden bei Korndurchmessern von $0,063 \text{ mm} \leq d \leq 0,2$ mm, von Feinsand bei $0,2 \text{ mm} \leq d \leq 0,63$ mm, von Grobsand bei $0,63 \text{ mm} \leq d \leq 2,0$ mm, von Kies bei $2,0 \text{ mm} \leq d \leq 6,3$ mm, von Kiese bei $6,3 \text{ mm} \leq d \leq 20$ mm, von Steinen bei $d > 20$ mm.

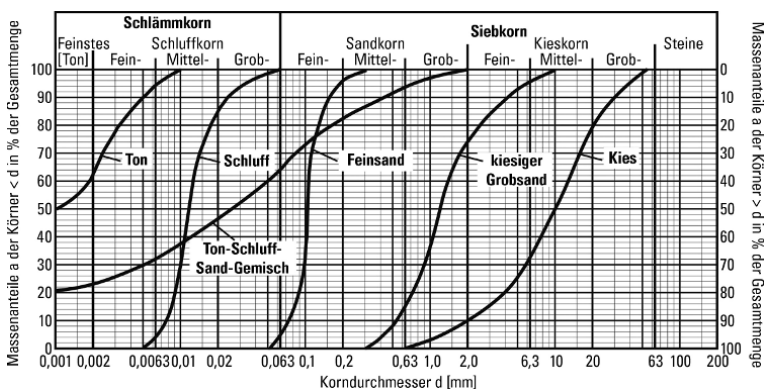


Bild 2.1 Kornverteilung der unterschiedlichen Lockergesteine

≤ 2 mm und von Kiesen bei Korndurchmessern von $2 \text{ mm} \leq d \leq 63 \text{ mm}$. Bei Korndurchmessern oberhalb des letzten Wertes, d. h. über 63 mm, wird von Steinen oder Blöcken gesprochen. Diese groben, meist quarzitäen Einlagerungen können nach Lage, Staffeung und Anordnung ein nicht zu unterschätzendes Vortriebshindernis darstellen, in dessen Folge es nicht nur zu Vortriebserschwernissen, sondern auch zu Abweichungen von der Lage der Vortriebsachse kommen kann. Aus diesem Grunde enthält die DIN 18319 besondere Zusatzklassen für derartige Einlagerungen, bei denen die Korngrößen über 63 mm liegen. Gemäß der DIN 18319 wird der Korndurchmesser derartiger Steine auf 600 mm begrenzt.

Neben der Korngröße spielt auch die Kornform im Hinblick auf die Vortriebsarbeiten in Verbindung mit der Lagerungsdichte und einer möglicherweise vorhandenen mineralischen Bindung eine entscheidende Rolle. Plattige horizontal ausgerichtete Fein-, Mittel- und Grobkörnungen verhalten sich im Hinblick auf den Vortrieb anders als unregelmäßige Haufwerke. Aber auch die Verteilung der Einzelkörner im Haufwerk beeinflusst neben der Lagerungsdichte das mechanische Verhalten und damit den Einfluss auf die Vortriebsarbeiten. Dicht gelagerte Böden setzen im Bereich der Ortsbrust und am Tunnelmantel dem Vortrieb einen größeren Widerstand entgegen als locker gelagerte Böden. Gleiches gilt für die Konsistenz der bindigen Böden. Sind diese halbfest bis fest, so setzen sie dem Vortrieb einen höheren Widerstand entgegen als wenn sie weich und steif sind. Die Konsistenz der bindigen Böden ist gemäß Bild 2.2 wassergehaltabhängig.

Niedrigere Wassergehalte kennzeichnen im Allgemeinen einen halbfesten bis festen bindigen Boden, höhere Wassergehalte einen weichen bis steifen Boden.

Neben der Lagerungsdichte bzw. Konsistenz der Lockergesteine spielt auch deren mineralische Bindung, die z. B. nicht nur durch elektrostatische Kräfte und die die Körnchen umgebende Wasserhülle ausgelöst wird, sondern auch durch Ausfällungen von Eisen, Mangan und Kalk entstehen kann, bei der Beurteilung des mechanischen

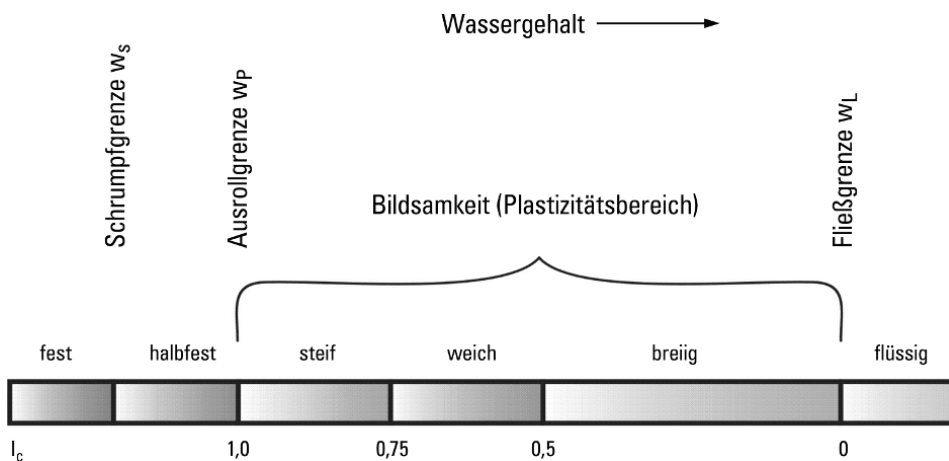


Bild 2.2 Konsistenzband bindiger Böden (I_c Konsistenzzahl)

Verhaltens und damit auch bei der Beurteilung des Einflusses auf den Vortrieb eine nicht zu unterschätzende Rolle.

An der Grenzlinie zwischen quartären und tertiären Schichten können auch häufig geologisch bedingt einzelne oder auch Ansammlungen von einzelnen Steinen, Blöcken bis hin zur Findlingsgröße auftreten, die durch die oben beschriebene Norm DIN 18319 nicht erfasst werden und daher separat im Hinblick auf den Vortrieb beurteilt und im Rahmen der Ausschreibung behandelt werden müssen.

2.3.2.2 Festigkeit

Bei der Festigkeit ist zu unterscheiden zwischen der Festigkeit der Einzelkörner und der Festigkeit der jeweiligen Bodenschicht. Die Einzelkörner werden im Wesentlichen durch Quarz, Feldspat und Glimmer gebildet. Sie treten hauptsächlich innerhalb der nichtbindigen Böden auf. Bei den bindigen Böden handelt es sich im Wesentlichen um Anlagerungen dieser zuvor genannten Einzelteilchen an Tonmineralien, die keine Einzelkornstruktur bzw. Haufwerkstruktur besitzen, sondern wabenförmig durch Wasserbindekräfte miteinander ein Gefüge bilden.

Dementsprechend unterschiedlich ist das mechanische Verhalten dieser Bodenarten einzuordnen. Für die Beurteilung dieses Verhaltens interessieren im Wesentlichen die Druck- und Schubfestigkeiten, da Zugkräfte aufgrund der Struktur nur zu einem ganz geringen Teil vom Haufwerk übernommen werden können. Druck- und Schubfestigkeit sind in Abhängigkeit von der Art des Lockergesteins, seiner Lagerungsdichte bzw. Konsistenz, seiner Kornform bzw. mineralischen Bindung der einzelnen Körnchen abhängig. Während die Druckfestigkeit der Bodenschichten durch den Steifemodul, d. h. den Zusammendrückungsmodul des Bodens, erfasst wird, wird die Scherfestigkeit der Lockergesteine durch den inneren Reibungswinkel und die Kohäsion bestimmt.

Bei nichtbindigen Böden liegt der Steifemodul deutlich über dem Steifemodul der bindigen, die Schubfestigkeit der nichtbindigen Böden im Hinblick auf den Reibungsanteil deutlich über denen der bindigen Böden. Durch die Kohäsion der bindigen Böden kann jedoch die Schubfestigkeit der bindigen Böden die Größenordnung der nichtbindigen erreichen oder sogar überschreiten. Grund hierfür ist die innere Bindekraft, die durch die Kohäsion beschrieben wird.

Bei bindigen, d. h. tonigen Böden, kann in Abhängigkeit vom Tonmineralbestand durch Wirkung der Wasserbindekräfte eine Adhäsion am Schildmantel/Rohrstrang bzw. beim Abbau an den Abbaugeräten auftreten, die zu Verklebungen und damit zu Vortriebserschwernissen führen.

Die Festigkeit der Einzelkörner ist im Hinblick auf das Verdrängen, Brechen und Verschieben durch den Vortrieb bei nichtbindigen Böden deutlich höher als bei den bindigen Böden. So bestimmt die Festigkeit der Einzelkörner die Festigkeit der Einzelminerale, die im Kornhaufwerk vorhanden sind. Je härter die Minerale sind, desto schwieriger können sie verdrängt oder gebrochen werden.

Dies bedeutet im Hinblick auf den Vortrieb, dass ein höherer Aufwand notwendig wird, um Körner mit hoher Einzelfestigkeit bzw. Härte zu lösen, abzubauen bzw. zu zerkleinern. Hierdurch können sich erhebliche Vortriebswiderstände und ein hoher Verschleiß der Abbauwerkzeuge ergeben. Beides hat Einfluss auf die Vortriebsarbeiten und damit auch auf die Vortriebsgenauigkeit.

2.3.2.3 Grundwasser

Allgemein ist zu unterscheiden zwischen freiem nicht gespanntem Grundwasser und gespanntem Grundwasser. Gespannte Grundwasserverhältnisse sind dort möglich, wo bindige Schichten den Anstieg des Grundwassers verhindern und somit unterhalb der bindigen Schicht einen Spannungszustand erzeugen, der mit dem hydrostatischen Spannungszustand bei freier Wasserbewegung nicht übereinstimmt. Sie können einen nicht unerheblichen Einfluss auf den Vortrieb haben, wenn beim Anfahren derartig gespannter Grundwasserverhältnisse der Vortrieb selbst unter hydraulischen Überdruck gerät.

Daneben spielen auch gespannte Grundwasserverhältnisse von eingelagerten, lokal auftretenden, in sich abgeschlossenen Linsen, die wasserführend sind, eine Rolle. Durch sie können, ähnlich wie bei den gespannten Grundwasserverhältnissen, nicht nur Einwirkungen auf den Vortrieb an der Ortsbrust, sondern auch am Rohrstrang auftreten, die die Lage des Rohrs und damit die Lagegenauigkeit beeinflussen.

2.3.3 Steine, Findlinge

Besonderes Augenmerk muss bei den Vortriebsarbeiten gerade auch im Hinblick auf die Vortriebsgenauigkeit örtlich eingelagerten Steinen und Blöcken bis hin zu großen Findlingen geschenkt werden. Diese können in Haufwerken vornehmlich in sogenannten Erosionsrinnen oder auch vereinzelt auftreten. Sie können, wie die Bilder 2.5 und 2.6 zeigen, sich unterschiedlich groß und verteilt als Vortriebswiderstände zeigen und dadurch die Vortriebsgenauigkeit z. T. erheblich beeinflussen.

2.3.4 Festgestein

2.3.4.1 Zustandsbeschreibung

Für die Bewertung des Einflusses des Baugrunds auf den Vortrieb und seine Genauigkeit ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen magmatischen (z. B. Granit, Basalt, Trachyt), metamorphen (z. B. Quarzit, Marmor) und Sedimentgesteinen (z. B. Sandstein, Tonstein). In technischer Hinsicht wird allgemein auch von Hart- und Weichgesteinen gesprochen. Ein typischer Vertreter eines weichen Sedimentgesteins (häufig daher auch als Halbfestgestein bezeichnet) ist der weitverbreitete Mergel. Er besteht i. Allg. zu etwa 35 bis 65 % aus Schluff und Ton und zu 65 bis 35 % aus Calciumcarbonat. Sandbeimengungen sind ebenfalls möglich. Die Besonderheit des Mergels besteht in der Bindung von Schluff und Ton und ggf. Sand und Kalk. Ist die Bindung so stark, dass von einer mineralischen Bindung ausgegangen werden

kann, so spricht man auch vom Mergelstein. Im Sprachgebrauch wird häufig Mergel und Mergelstein gleichgesetzt. Durch die Diagenese wie auch durch externe Einflüsse, z. B. aus früher wirkenden Steinkohleabbauen, sind Klüfte im Mergel entstanden, sodass bei diesem Halbfestgestein auch von dem für typische Festgesteine (z. B. Sandstein) vorhandenen Trennflächengefüge, bestehend aus Schicht- und Klufflächen, ausgegangen werden kann (Bild 2.3). Art und Weise, Umfang und Verteilung der Trennflächen können jedoch lokal sehr unterschiedlich sein. So sind Bereiche von ausgeprägten Klüften ebenso möglich wie eng stehende Klüfte.

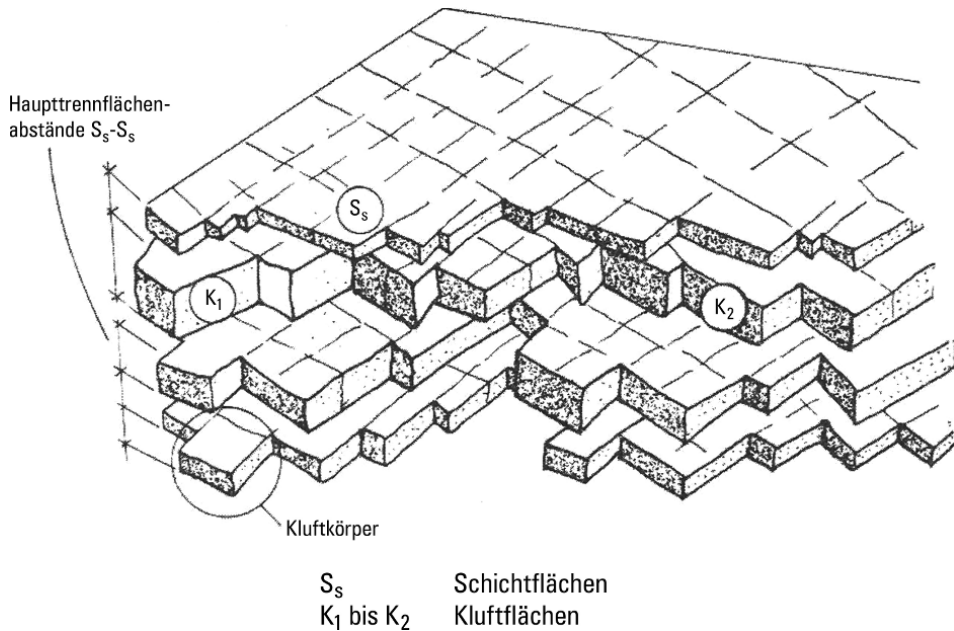


Bild 2.3 Mögliches Trennflächengefüge bei Festgesteinen [2.1]

2.3.4.2 Festigkeit

Im Hinblick auf die Vortriebsgenauigkeit bzw. Lagegenauigkeit interessieren neben den Festigkeitsunterschieden des Gesteins insbesondere die Gebirgsfestigkeiten. Diese sind im Wesentlichen abhängig von der Ausbildung des Trennflächengefüges (Bild 2.3) und von den auf den Schicht- und Klufflächen vorherrschenden Scherfestigkeiten.

Neben der Festigkeit spielt auch die mögliche zeitliche Veränderung der Festigkeit und damit auch das zeitliche Formänderungsverhalten eine entscheidende Rolle. Dieses kann durch rheologische oder auch externe Vorgänge ausgelöst werden. Im letzteren Fall sind durch Spannungsänderungen im Untergrund hervorgerufene Einwirkungen und Formänderungen gemeint. Bei den zeitabhängigen rheologischen

Vorgängen sind im Wesentlichen das Kriechen, das Schwinden und Quellen dieser Schichten zu verstehen. Insbesondere das Quellen kann zu erheblichen Einflüssen auf die Vortriebsgenauigkeit führen.

Zumeist wird bei Lockergesteinen trotz Inhomogenität von isotropen Eigenschaften der einzelnen Bodenschichten ausgegangen. Beim Festgestein kann jedoch aufgrund der mineralogischen Bedingungen im Rahmen der Entstehungsgeschichte bzw. durch anthropogene Eingriffe (z. B. Bergbau) das Gebirge derart beansprucht worden sein, dass unter Berücksichtigung des vorhandenen Trennflächengefüges weder homogene noch isotrope Verhältnisse vorliegen, sodass infolge der unterschiedlichen Ausprägung des Gebirges beim Vortrieb wie auch später bei der Fertigstellung des Tunnels anisotrope Verhältnisse auftreten bzw. zurückbleiben können.

Weitere Parameter des Festgesteins, die die Wahl des Vortriebsverfahrens, die Vortriebsgenauigkeit und die Lage des Tunnels beeinflussen, sind das Gefüge, der Verwitterungsgrad, der Kluftabstand und der Zerlegungsgrad.

2.3.4.3 Grundwasser

Wie beim Lockergestein kann auch das Grundwasser im Festgestein nur im „Porenraum“ zirkulieren. Dieser stellt sich im Festgestein durch Risse und Klüfte dar, sodass im Gegensatz zum Lockergestein, wo man im Allgemeinen von einem Porengrundwasserleiter spricht, hier im Festgestein von einem Kluftgrundwasserleiter gesprochen werden kann. Aufgrund seiner Struktur können auch hier nicht nur gespannte, sondern auch gespannte Grundwasserverhältnisse auftreten. Im Allgemeinen ist der Flüssigkeitsdruck allerdings nicht so hoch, dass das Druckniveau die Geländeoberfläche erreicht. Häufig stehen im Kluftgrundwasserleiter sogenannte „Fenster“ mit dem Porengrundwasserleiter der Überlagerungsschichten in Verbindung, sodass keine gespannten Grundwasserverhältnisse auftreten, denn nur diese hätten Einfluss auf die Vortriebs- bzw. Lagegenauigkeit.

Da das Grundwasser nur in den Klüften zirkulieren kann, die einen elementaren Bestandteil des Trennflächengefüges darstellen, dieses aber lokal sehr unterschiedlich sein kann, ist selbst bei gleichen Druckverhältnissen mit unterschiedlichem Gebirgswasserandrang zu rechnen. Die Wassermenge selbst hat bei standfestem Gebirge und relativ homogenen und isotropen Gebirgseigenschaften jedoch keinen Einfluss auf die Genauigkeit des Vortriebs bzw. die Lage des späteren Tunnels.

2.3.5 Künstliche Bauhindernisse

Hierunter wird in diesem Zusammenhang verstanden, dass es sich um Bauwerksreste und Bauwerksteile handelt, die für den Vortrieb Hindernisse darstellen. Zu unterscheiden ist zwischen eingelagerten Bauwerksteilen und -resten und zusammenhängenden Bauwerken bzw. Bauwerksteilen. Daneben ist zu unterscheiden zwischen den unterschiedlichen Materialien der möglicherweise noch im Untergrund verbliebenen Bauwerksteile bzw. Bauwerksreste, wie z. B. Holz, Mauerwerk, Beton, Stahlbeton, Stahl u. a.

Wenngleich auch durch eine dezidierte Bauhindernisrecherche auf einer geplanten Vortriebsstrecke Bauhindernisse weitestgehend lokalisiert und vor Beginn des Vortriebs entfernt oder durch geschickte Wahl von Trasse und Gradienten umfahren werden sollten, kann jedoch grundsätzlich bei Regionen mit starker industrieller Vornutzung so etwas mit absoluter Sicherheit nicht ausgeschlossen werden.

Im Hinblick auf die Vortriebsgenauigkeit sind im Wesentlichen folgende 3 Fälle zu unterscheiden:

1. Großes zusammenhängendes Bauwerk mit geschlossenen Fugen ohne Hohlraum.
2. Hindernis, das vereinzelt im Bereich des Vortriebsquerschnitts kompakt auftritt.
3. Im Untergrund vorhandenes Hindernis mit Fugen oder Hohlräumen. Dieses kann entweder kompakt im Bereich des gesamten Vortriebsquerschnitts oder auch vereinzelt im Bereich des Vortriebsquerschnitts auftreten.

In diesem Zusammenhang spielen auch linienförmige Bauhindernisse, die möglicherweise auch noch im schleifenden Schnitt zu einer geplanten Trasse des Vortriebsquerschnitts verlaufen, eine erhebliche Rolle. Zu den linienförmigen Bauhindernissen zählen z. B. Spundwände, alte Rohrleitungen u. Ä.

2.3.6 Baugrundeinflüsse auf den Vortrieb

Im Folgenden steht die Vortriebsgenauigkeit im Mittelpunkt. Hierzu gehört u. a. auch die Lagegenauigkeit des Tunnels. Im Folgenden werden nur die Baugrundeinflüsse beschrieben, die tatsächlich Einfluss auf den Vortrieb haben.

Für die nachfolgende Darstellung wird auf die im Literaturverzeichnis genannten Normen, Richtlinien und Empfehlungen eingegangen.

Zur Beurteilung des Einflusses auf die Vortriebsgenauigkeit spielen die Einflüsse eine Rolle, die die Steuerung des Vortriebs beeinflussen und die Lage des Tunnels beeinträchtigen können. Hierzu zählen im Wesentlichen folgende maßgebliche Einflüsse:

1. Auffüllungen, heterogen und inhomogen.
2. Geschichteter Baugrund mit folgenden Festigkeiten, z. B. weiche, steife bindige Böden, locker gelagerte bis dicht gelagerte nichtbindige Böden im Wechsel mit verfestigten Lockergesteinen, alles auftretend im Bereich des Vortriebsquerschnitts.
3. Festgestein mit unterschiedlicher Struktur und Klüftung.
4. Eingelagerte Steine, Blöcke, bis hin zu Findlingen.
5. Künstliche Bauhindernisse.

Während es sich bei den ersten Einflussfaktoren zumeist um über die gesamte Vortriebsstrecke kontinuierliche Einflüsse handeln kann, sind die Einflussfaktoren 4 und 5 im Allgemeinen singuläre Einzelereignisse. In den Bildern 2.4 bis 2.6 sind die unterschiedlichen Einflüsse als Auswirkungen auf die Lage des Vortriebs dargestellt.

Den Bildern 2.4 bis 2.6 ist zu entnehmen, dass alle genannten Einflussfaktoren die Lage des Vortriebs bestimmen können, jedoch mit unterschiedlicher Auswirkung auf die Lage des Tunnels. Dies wird insbesondere dadurch deutlich, dass unter-

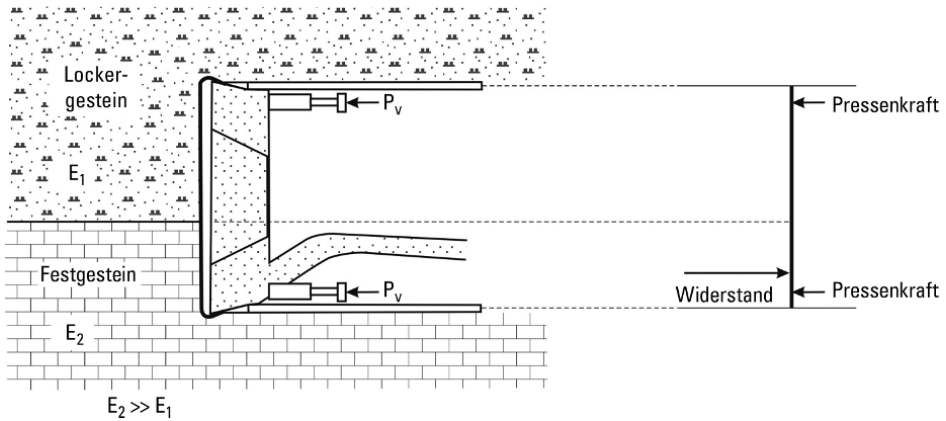


Bild 2.4 Einfluss des geschichteten Baugrunds mit unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften über den Vortriebsquerschnitt auf die Abweichung des Vortriebs aus der Solllage

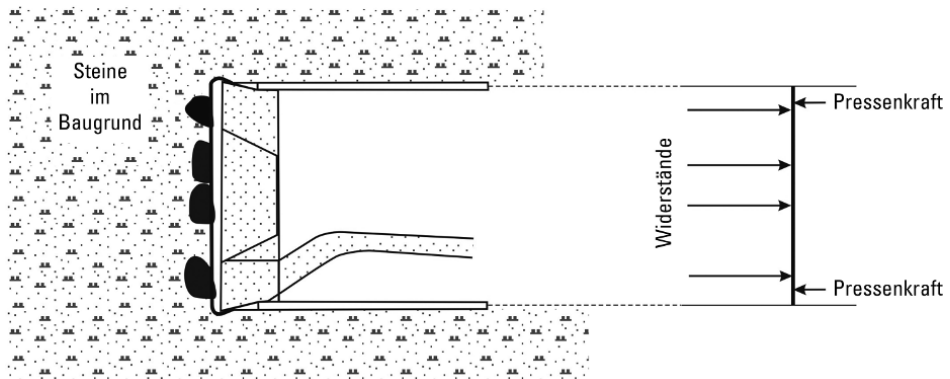


Bild 2.5 Einfluss von einzelnen Steinen verteilt über den Vortriebsquerschnitt auf die Lage des Vortriebs, insbesondere bei Schneidenlagerung

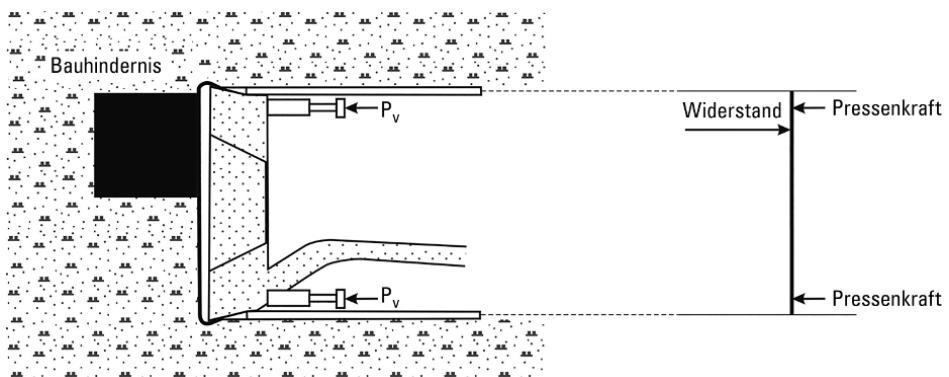


Bild 2.6 Einfluss von Bauhindernissen im Bereich der Vortriebsquerschnitte auf die Lage des Vortriebs

schiedliche Baugrundsichtungen mit unterschiedlichen Festigkeiten über den Vortriebsquerschnitten u. U. die Genauigkeit der Tunnellage stärker beeinflussen als singuläre Hindernisse in Form von Steinen und Blöcken bis hin zu Findlingen und Bauhindernissen. Die Vortriebsgenauigkeit selbst kann aber bei Einzelhindernissen und Einzelereignissen viel geringer sein als bei wechselnden Baugrundsichten und wechselnden Baugrundverhältnissen.

Hierbei spielen auch vorhandene Ansammlungen von Steinen im Lockergestein ebenso eine Rolle wie das Trennflächengefüge des Festgesteins selbst. Die für Rohrvortriebe maßgebliche Norm DIN 18319, die sich an den Massenanteil der Steine orientiert, enthält so z. B. eine Obergrenze des Korndurchmessers der Steine. Dieser ist auf 600 mm festgelegt. Es können jedoch auch natürliche Einlagerungen in Findlingsgröße mit deutlich größeren Abmessungen als in DIN 18319 festgelegt, auftreten. Diese besitzen naturgemäß einen größeren Einfluss auf die Vortriebsgenauigkeit als Steine mit kleineren Durchmessern. Da die genaue Größe der Findlinge durch übliche Erkundungsbohrungen nicht festgestellt werden kann, ist man hier auf die Erfahrungen angewiesen, die bei der Festlegung des Vortriebsverfahrens, bei der Ausschreibung der Leistungen, beim Steuerungs- und Messsystem, möglicherweise auch bei einem Vorauserkundungssystem gemacht wurden.

Die Leistungen zur genaueren Erkundung der Vortriebshindernisse sind mit der Ausschreibung zu erfassen, sodass für deren Beseitigung eine angemessene Preisbildung durch den Bieter erfolgen kann.

Gleiches gilt auch für das Festgestein, das auch unterschiedliche Festigkeiten aufweisen kann. Die DIN 18319 für Rohrvortriebe enthält z. B. hierfür Angaben für die Klassifizierung der Festgesteine in Abhängigkeit von der einaxialen Druckfestigkeit und dem Trennflächenabstand. Die Einteilung erscheint jedoch viel zu grob, da hier der Trennflächenabstand pauschal im Zentimeter- und Dezimeterbereich unterschieden wird. Eine derartige Einteilung ist für die spätere Ausschreibung i. Allg. nicht zielführend, vielmehr muss eine eindeutige Gebirgsklassifizierung nach einem in der Fachwelt anerkannten Verfahren erfolgen. Eine solche Gebirgsklassifizierung ist nach unterschiedlichen Modellen bzw. Verfahren denkbar, damit bei der Ausschreibung der Baugrund zweifelsfrei und eindeutig beschrieben werden kann.

Da es eine Vielzahl von unterschiedlichen Gebirgsklassifizierungen und Gebirgsklassifizierungsverfahren gibt, wird im Folgenden kein Gebirgsklassifizierungsverfahren vorgestellt.

Für Lockergesteine sind entsprechend den DAUB-Empfehlungen [2.2] die in Tabelle 2.1, für Festgesteine die in Tabelle 2.2 aufgeführten prozessbezogenen geotechnischen Kenngrößen in Abhängigkeit von den zu wählenden Vortriebsklassen bzw. Vortriebsverfahren (siehe auch Abschnitt 3.11) zu ermitteln.

In den Tabellen bedeuten:

- a) TBM Tunnelbohrmaschine ohne Schild (nur im Festgestein einsetzbar, im vorliegenden Handbuch nicht behandelt)
- b) DSM Doppelschildmaschine (im Handbuch nicht behandelt)

c) SM Schildmaschinen

V1 ohne Stützung

V2 mechanische Stützung

V3 Druckluftbeaufschlagung

V4 Flüssigkeitsstützung

V5 Erddruckstützung

T1 Teilflächenabbau, Ortsbrust ohne Stützung

T2 Teilflächenabbau, Ortsbrust mechanisch gestützt

T3 Teilflächenabbau, Ortsbrust mit Druckluftbeaufschlagung

T4 Teilflächenabbau, Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung.

Tabelle 2.1a Prozessbezogene geotechnische Kenngrößen für Lockergestein, relevant für Ortsbruststützung und Senkungsanalyse, nach [2.2]

	Kurzbezeichnung	Einheit	TBM*	DSM*	SM-V1	SM-V2	SM-V3	SM-V4	SM-V5	SM-T1	SM-T2	SM-T3	SM-T4	
Kornverteilung		%			x	nicht empfohlen	x	x	x	x	x	x	nicht empfohlen	
Dichte/Dichte unter Auftrieb	γ/γ'	kN/m ³						x	x		x	x		
Lagerungsdichte	D	–			x		x	x	x	x	x	x		
Reibungswinkel	φ'	°			x		x	x	x	x	x	x		
Kohäsion	c'	kN/m ²			x		x	x	x	x	x	x		
E-Modul	E	MN/m ²			x		x	x	x	x	x	x		
Dilatationswinkel	Ψ	°			x		x	x	x	x	x	x		
Porenanteil	n	–			x		x	x	x	x	x	x		
Porenzahl	e	–			x		x	x	x	x	x	x		
Durchlässigkeit	k	m/s			x		x	x	x	x	x	x		
Erddruckbeiwert (horizontal)	kh	–			x		x	x	x	x	x	x		
Grundwasserdruck	p_{GW}	kN/m ²			x		x	x	x	x	x	x		

* TBM und DSM werden nur im Festgestein eingesetzt.