



**Verlängerung U4 – Bockenheimer Warte nach Ginnheim (Stadtbahnstrecke D, Teilabschnitt 2)**

**Tunnelbautechnische Voruntersuchung**

Projekt-Nr.: **260756**

Bericht-Nr.: **01**



Erstellt im Auftrag von:  
**Stadtbahn Entwicklung und  
Verkehrsinfrastrukturprojekte  
Frankfurt GmbH (SBEV)  
Mainzer Landstraße 191  
60327 Frankfurt am Main**

Dr.-Ing. Heiko Huber  
Dipl.-Ing. Nils Thöle  
Dipl.-Ing. Ralitsa Angelov

2024-05-29

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
<b>1</b>	<b>VERANLASSUNG..... 5</b>
<b>2</b>	<b>UNTERLAGEN..... 5</b>
2.1	Arbeitsunterlagen ..... 5
2.2	Normen, Richtlinien, Merkblätter und Empfehlungen ..... 6
2.3	Literatur ..... 6
<b>3</b>	<b>BAUVORHABEN..... 7</b>
3.1	Variante 1a..... 7
1.1	Variante 1d..... 8
1.2	Variante 3i ..... 9
<b>4</b>	<b>BAUGRUND UND GRUNDWASSERSITUATION ..... 10</b>
4.1	Allgemein ..... 10
4.2	Variante 1a..... 12
4.3	Variante 1d..... 12
4.4	Variante 3i ..... 12
<b>5</b>	<b>BESCHREIBUNG DER TUNNELBAUTECHNOLOGIEN..... 13</b>
5.1	Tunnel in offene Bauweise ..... 13
5.2	Tunnel in geschlossene Bauweise..... 13
5.2.1	Konventioneller (zyklischer) Vortrieb ..... 14
5.2.2	Maschineller Vortrieb mittels Tunnelbohrmaschinen (TBM) ..... 15
5.2.2.1	Erddruckschild (EPB) ..... 16
5.2.2.2	Flüssigkeitsschild (SLS)..... 19
5.2.2.3	Hybrid- / Multi-Mode TBM..... 21
5.2.2.4	Variable-Density-Schildmaschine (VDS) ..... 21
<b>6</b>	<b>KRITERIEN ZUR AUSWAHL DES BAUVERFAHRENS DER VARIANTEN IN GESCHLOSSENER BAUWEISE ..... 22</b>
6.1	Hauptkriterien..... 22
6.2	Ergänzende Kriterien..... 23
6.3	Bewertung der Kriterien zur Auswahl des Maschinentyps ..... 23
<b>7</b>	<b>UNTERSUCHUNG DER TRASSENVARIANTEN IN GESCHLOSSENER BAUWEISE..... 24</b>
7.1	Eignung der TBM-Typen pro Vortriebsabschnitt ..... 24
7.2	Trassenvariante 1d..... 27
7.3	Trassenvariante 3i..... 29
7.4	Verklebungsneigung..... 30

7.5	Stützdruckberechnung.....	32
7.6	Abschätzung des zu erwartenden Verschleißes .....	32
7.7	Tertiärer Fels, Kalk- und Dolomitsteinschichten.....	33
<b>8</b>	<b>AUSWERTUNG .....</b>	<b>33</b>
<b>9</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>37</b>

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

	Seite
Abbildung 1	Untersuchungsvarianten .....7
Abbildung 2	Längsschnitt Trasse Variante 1a [U2] .....8
Abbildung 3	Längsschnitt Trasse Variante 1d [U2] .....8
Abbildung 4	Längsschnitt Trasse Variante 3i [U2] .....9
Abbildung 5	Funktionsprinzip EPB [©Herrenknecht AG] .....17
Abbildung 6	Funktionsprinzip Mixschild [©Herrenknecht AG] .....19
Abbildung 7	Beispiel einer VD-TBM [©Herrenknecht AG] .....22
Abbildung 8	Einsatzbereiche EPB & Slurry Variante 1d.....24
Abbildung 9	Einsatzbereiche EPB & Slurry Variante 3i.....25
Abbildung 10	Einsatzbereiche Slurry-TBM [Thewes, 2009] [N2].....26
Abbildung 11	Einsatzbereiche EPB-TBM [Thewes, 2007] [N2] .....26
Abbildung 12	Einteilung in Leistungsklassen Slurry V1d.....27
Abbildung 13	Einteilung in Leistungsklassen EPB V1d.....28
Abbildung 14	Einteilung in Leistungsklassen EPB V3i.....29
Abbildung 15	Einteilung in Leistungsklassen Slurry V3i.....30

## TABELLENVERZEICHNIS

	Seite
Tabelle 1	Übersicht Trassenvarianten ..... 9
Tabelle 2	Verklebungsneigung Variante 1d..... 31
Tabelle 3	Verklebungsneigung Variante 3i..... 31
Tabelle 4	Einstufung des Verschleißes..... 33
Tabelle 5	Variante 1d - Eignung auf die Vortriebsstrecke..... 34
Tabelle 6	Variante 3i - Eignung auf die Vortriebsstrecke..... 34
Tabelle 7	Variante 1d - Auswahl des Vortriebsverfahrens..... 35
Tabelle 8	Variante 3i - Auswahl des Vortriebsverfahrens..... 36
Tabelle 9	Übersicht EPB - Slurry ..... 38

## 1 VERANLASSUNG

Die Stadtbahn Entwicklung und Verkehrsinfrastrukturprojekte Frankfurt (SBEV) plant im Auftrag der Stadtwerke Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH (VGF) – und damit im Ergebnis für die Stadt Frankfurt am Main – den Bau einer Stadtbahnverbindung zwischen den Stationen Bockenheimer Warte und Ginnheim. Im Rahmen einer Variantenuntersuchung werden verschiedene Trassenverläufe untersucht und bewertet. Drei Untervarianten (1a, 1d, 3i) werden weiterverfolgt und tiefer untersucht. CDM Smith Consult SE wurde von der SBEV mit der Erstellung einer Voruntersuchung für die Tunnelstreckenabschnitte beauftragt.

In Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung werden für die aufgeführten Varianten folgende Punkte bearbeitet:

- Beschreibung der Varianten
- Geologische Verhältnisse
- Allgemeine Verfahrensbeschreibungen
- Gegenüberstellung der Varianten in geschlossener Bauweise (1d, 3i) insbesondere mit Blick auf die Vortriebsverfahren

Als Grundlage für die drei Variantenuntersuchungen wird der geotechnische Untersuchungsbericht herangezogen.

## 2 UNTERLAGEN

### 2.1 Arbeitsunterlagen

- [U1] Verlängerung U4 – Bockenheimer Warte nach Ginnheim (Stadtbahnstrecke D, Teilabschnitt 2): Geotechnischer Untersuchungsbericht einschließlich Anlagen, Index A CDM Smith Consult GmbH, Bickenbach 27.03.2024
- [U2] Verlängerung U4 Bockenheimer Warte – Ginnheim, Frankfurt am Main: Höhen- und Übersichtslagepläne – Variante 1a, 1d und 3i, erhalten per E-Mail 12.03.2024
- [U3] Verlängerung U4 Bockenheimer Warte – Ginnheim, Frankfurt am Main: Höhen- und Übersichtslagepläne – Variante 3i, erhalten per E-Mail 19.03.2024

## 2.2 Normen, Richtlinien, Merkblätter und Empfehlungen

- [N1] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB), Hrsg.: „Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelbohrmaschinen“. März 2021
- [N2] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB), Hrsg.: „Recommendations for Face Support Pressure Calculations for Shield Tunnelling in Soft Ground“. Oktober 2016
- [N3] Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten – ZTV-ING. Teil 5 – Abschnitt 3 (Tunnelbau – Maschinelle Schildvortriebsverfahren). Stand: Januar 2018
- [N4] DIN 18312:2019 Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB) Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Untertagebauarbeiten
- [N5] Verordnung über Arbeiten in Druckluft (Druckluftverordnung – DruckLV) 5. April 2017

## 2.3 Literatur

- [L1] Maidl, B.; Herrenknecht, M.; Maidl, U.; Wehrmeyer, G.: Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb, Verlag Ernst & Sohn Berlin, 2. Auflage
- [L2] Thuro, K.; Singer, J.; Kässling, H.; Bauer, M.: Abrasivitätsuntersuchungen an Lockergesteinen im Hinblick auf die Gebirgslösung. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT): Beiträge zur 29. Baugrundtagung in Bremen 2006; 283 – 290
- [L3] Köppl, F.: Abbauwerkzeugverschleiß und empirische Verschleißprognose beim Vortrieb mit Hydroschild TVM in Lockergesteinen. Dissertation – TUM, 2014

### 3 BAUVORHABEN

Für die Trasse zwischen den Stationen Bockenheimer Warte und Ginnheim wurden gemäß der Variantenuntersuchung drei Varianten entwickelt. Die Lage der Untersuchungsvarianten kann der Abbildung 1 entnommen werden. Nachfolgend werden zur Übersicht die einzelnen in [U1] aufgeführte Abschnitte kurz beschrieben.

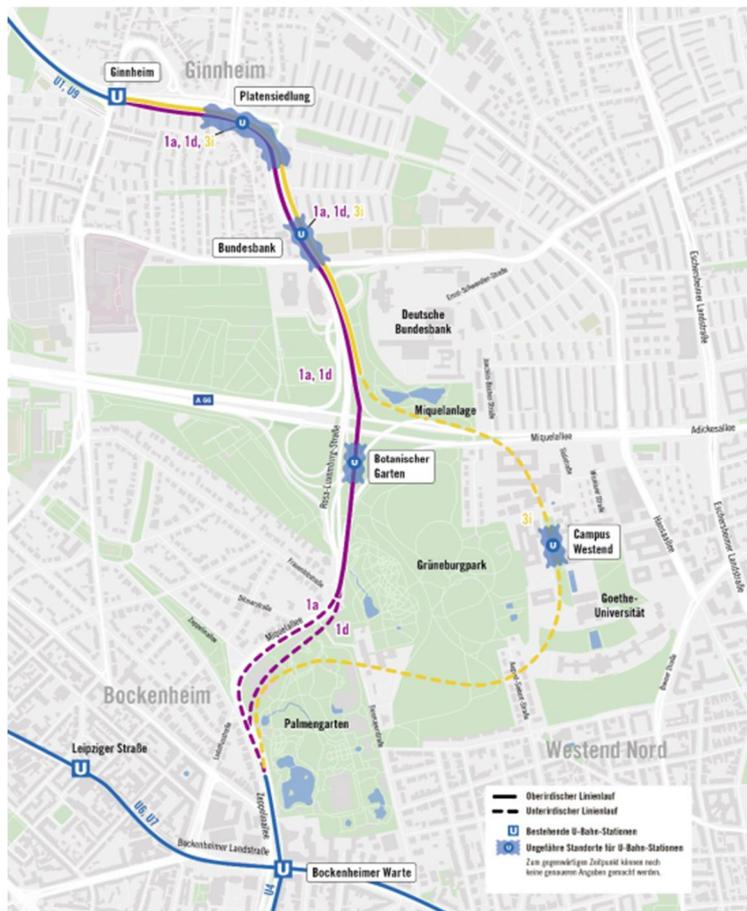


Abbildung 1 Untersuchungsvarianten

#### 3.1 Variante 1a

Die Trasse verläuft entlang der Zeppelinallee, dann entlang der Miquelallee und dem Botanischen Garten, kreuzt die Autobahn A66 und die Miquelanlage und verläuft dann an der Bundesbank vorbei entlang der Rosa-Luxemburg-Straße nach Ginnheim. Für diese Variante sind vier neue Stationen (Botanischer Garten, Bundesbank, Platensiedlung und Ginnheim) vorgesehen. Zwischen den Stationen Bockenheimer Warte und Botanischer Garten ist ein Tunnel in offener Bauweise geplant. Der geplante Tunnel weist eine Länge von ca. 780 m in einer Tiefe von 2 m bis maximal 12 m auf (Abbildung 2). Weiterhin ist

zwischen den Stationen Botanischer Garten und Bundesbank ein Tunnel in offener Bauweise mit einer Länge von ca. 100 m geplant.

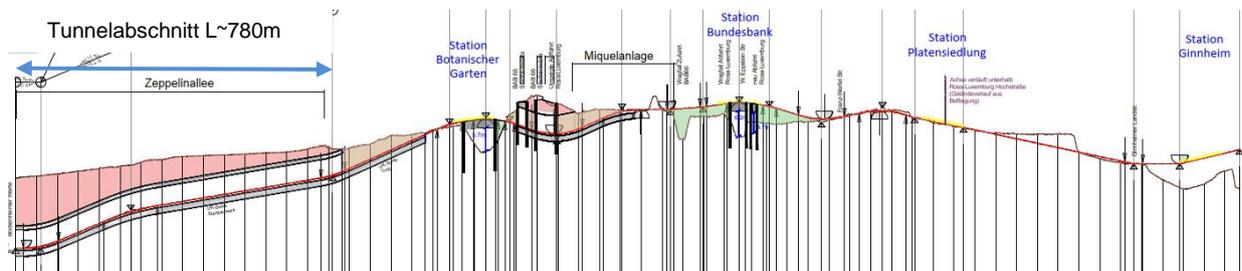


Abbildung 2 Längsschnitt Trasse Variante 1a [U2]

### 1.1 Variante 1d

Gegenüber der Variante 1a verläuft diese Trasse zwischen den Stationen Bockenheimer Warte und Botanischem Garten nicht entlang der Zeppelinallee, sondern unterfährt den Palmengarten. Auch für diese Variante sind vier neue Stationen (Botanischer Garten, Bundesbank, Platensiedlung und Ginnheim) vorgesehen. Zwischen den Stationen Bockenheimer Warte und Botanischer Garten ist ein Tunnel geplant. Der Tunnelabschnitt besteht aus zwei Einzelröhren mit einem Durchmesser des Ausbruchsquerschnittes von ca. 7,3 m. Die Gesamtlänge der geschlossenen Bauweise beträgt 600 m für eine Tunnelröhre. Die Firstüberdeckung beträgt am Anschlag ca. 4 m und nimmt auf ca. 19 m bei Station 0+200 zu (Abbildung 3). Weiterhin ist zwischen den Stationen Botanischer Garten und Bundesbank ein Tunnel in offener Bauweise mit einer Länge von ca. 100 m geplant.

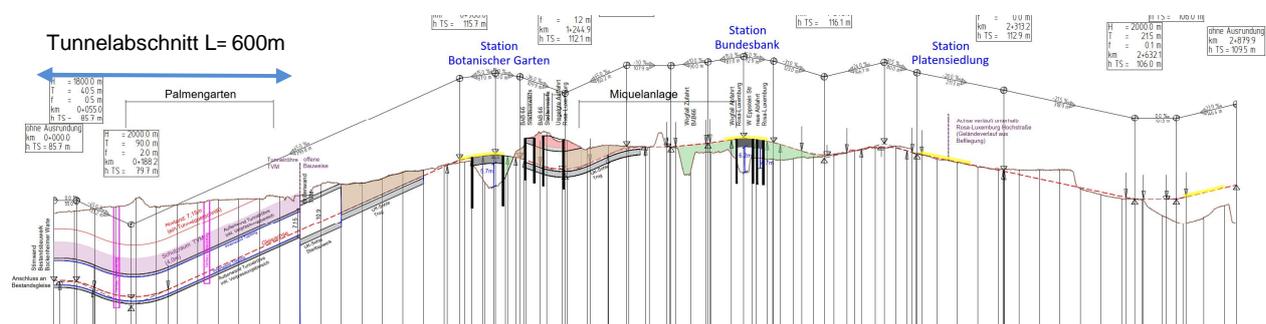


Abbildung 3 Längsschnitt Trasse Variante 1d [U2]

## 1.2 Variante 3i

Gegenüber der Varianten 1a und 1d verläuft diese Trasse nicht entlang der Miquelallee, sondern unterfährt Palmengarten, Botanischen Garten und Grüneburgpark und führt durch den Campus Westend der Goethe-Universität und das Gelände der Philipp-Holzmann-Schule. Nach der Querung der Autobahn A66 verläuft sie entlang der Miquelanlage zur Rosa-Luxemburg-Straße. Für diese Variante sind vier neue Stationen (Campus Westend, Bundesbank, Platensiedlung und Ginnheim) vorgesehen. Zwischen den Stationen Bockenheimer Warte und Bundesbank sind zwei Tunnelröhren mit einem Durchmesser von jeweils ca. 7,3 m geplant. Die Gesamtlänge der geschlossenen Bauweise beträgt ca. 2400 m für eine Tunnelröhre. Dieser Tunnelabschnitt liegt mit seiner Oberkante zwischen ca. 3,3 m und 25 m unter der Geländeoberkante und durchgängig unterhalb des Grundwasserspiegels.

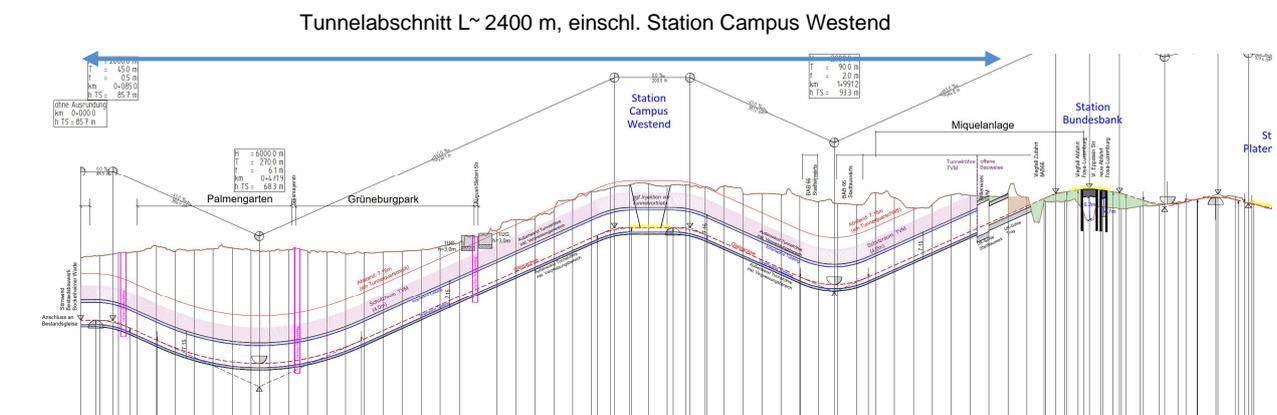


Abbildung 4 Längsschnitt Trasse Variante 3i [U2]

In der Tabelle 1 sind die einzelnen Varianten mit deren Trassencharakteristika aufgelistet.

Tabelle 1 Übersicht Trassenvarianten

Trassenvarianten		Stationen		Tunnellänge	Gradient		Min. Kurvenradius	Überdeckung		GW	
Variante	geplante Bauweise	von	bis		max	min		min	max	min	max
				[m]	[%]	[%]	[m]	[m ü. Firste]	[m ü. Firste]	[m ü. Firste]	[m ü. Firste]
1a	offene Bauweise	0	780	780	42,5	17,0	190	2	11	0	6
1d	geschlossene Bauweise	0	600	600	45,0	-45,0	250	0	18	0	7
3i	geschlossene Bauweise	0	2400	2400	45,0	-45,0	210	3,3	25	0	21

## 4 BAUGRUND UND GRUNDWASSERSITUATION

### 4.1 Allgemein

Der Baugrund lässt sich im Bereich der Trassenvarianten vereinfacht wie folgt beschreiben.

Als oberste Schicht liegen gemäß [U1] entlang der Trassenverläufe sowohl Auffüllungen (Schicht 1) in Form von sehr locker bis mitteldicht gelagerten Sanden mit variierenden Anteilen an Schluff und Kies als auch quartäre Deckschichten (Schicht 2) in Form von Schluffen mit teilweise feinsandigen und tonigen Anteilen in meist steifer bis halbfester, örtlich auch weicher bis fester Konsistenz vor. Die Mächtigkeit der Auffüllungen bzw. quartären Deckschichten variiert zwischen wenigen Dezimetern bis ca. 5,1 m.

Unterhalb der Schluffe der Schicht 2 kommen örtlich die locker bis dicht gelagerten Sande und Kiese der Main- und Niddaterrassen (Schicht 3) mit Schichtmächtigkeiten zwischen wenigen Dezimetern bis etwa 4,5 m zu liegen. Bei den Terrassensedimenten handelt es sich um schwach schluffige Sand-Kies-Gemische mit wechselnder Hauptbodenart.

Unterhalb den Auffüllungen bzw. quartären Schichten kommen tertiäre Schichtfolgen (Schicht 4) zu liegen. In den 3 zu betrachtenden Varianten durchfahren die Tunnelröhren weitestgehend diese tertiären Schichten.

Diese liegen nach [U1] überwiegend als Landschneckenmergel und Hydrobienschichten vor. Letztere werden umgangssprachlich als „Frankfurter Ton“ bezeichnet. Dieser Schichtenkomplex wird durch Tone der Bodengruppe TA und TM (Schicht 4b) dominiert in welche unregelmäßig und nicht horizontbeständig Hydrobien-, Kalksande (Schicht 4a) sowie Kalk- und Dolomitstein eingeschaltet sind. Die Tone liegen dabei größtenteils in steifer bis weicher Konsistenz vor und erreichen Mächtigkeiten bis ca. 8,0 m. Die Schichtmächtigkeiten der eingeschalteten Zwischenlagen variiert stark von wenigen Zentimetern bis mehrere Meter.

Weiterhin wurde nach [U1] in allen Trassenverläufen auch Braunkohle (Prososthenien-Schichten) bzw. Torf erkundet.

Lokal werden die quartären Sedimente auch von Basalt (Untermain-Basalt-Formation) mit Mächtigkeiten zwischen wenigen Zentimetern bis zu ca. 5,1 m unterlagert. Die in den Hydrobienschichten eingeschalteten Kalk- und Dolomitsteinschichten wurden mit variierenden Mächtigkeiten bis etwa 5,0 m und sehr unterschiedlichen Festigkeiten aufgeschlossen. Weiterhin wurde lokal auch Sandstein mit einer Dicke von etwa 2,3 m angetroffen. Die Mergellagen weisen Mächtigkeiten bis etwa 10,3 m auf. Diese Felsschichten lassen sich geomechanisch in dem Schichtpaket des Tertiären Fels (Schicht 4c) zusammenfassen.

Für die aufgeschlossenen Baugrundsichten sind in der Tabelle 4.1 die charakteristischen Boden- und felsmechanischen Kennwerte entsprechend dem geotechnischen Gutachten [U1] zusammengestellt.

Tabelle 4.1 Charakteristische boden- und felsmechanische Kennwerte

Schicht		Wichte		Scherfestigkeit			Steifemodul	Durchlässigkeitsbeiwert
		[kN/m <sup>3</sup> ]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	c [kN/m <sup>2</sup> ]	c <sub>u</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	E <sub>se</sub> / E <sub>sw</sub> [MN/m <sup>2</sup> ]	k <sub>f</sub> [m/s]
1	Auffüllungen:	(20)	(10)	(30)	(2)			
	grob-/gem.körnig	20	10	32,5	0	0	--	10 <sup>-2</sup> ÷ 10 <sup>-6</sup>
	feinkörnig	19	9	27,5	2 ÷ 5	20 ÷ 50	--	10 <sup>-6</sup> ÷ 10 <sup>-8</sup>
2	Quartäre Deckschichten, steif	19 ÷ 20	9 ÷ 10	25 ÷ 27,5	2 ÷ 5	20 ÷ 50	5÷10/10 ÷20	10 <sup>-6</sup> ÷ 10 <sup>-9</sup>
3	Quartäre Sande und Kiese, locker bis dicht	(21) 18 ÷ 21	(12) 10 ÷ 12	(35) 30 ÷ 37,5	(0) 0	0	(60/120) 20÷75/4 0÷150	2 x 10 <sup>-3</sup> ÷ 10 <sup>-5</sup>
4	Tertiär <sup>6)</sup>	(20) <sup>4)</sup>	(10) <sup>4)</sup>	(20) <sup>4)</sup>	(20) <sup>4)</sup>	(c <sub>u</sub> (z)) <sup>4/5)</sup>	(7x(1+0,35z <sup>3</sup> )/75) <sup>4)</sup>	(10 <sup>-5</sup> ) <sup>4)</sup>
4a	Sande	19 ÷ 20	10 ÷ 11	27,5 ÷ 35	0 ÷ 3	0	30÷60/6 0÷120	10 <sup>-5</sup> ÷ 10 <sup>-7</sup>
4b	Schluffe und Tone	19 ÷ 20	9 ÷ 10	15 ÷ 25	15 ÷ 25	c <sub>u</sub> (z) <sup>5)</sup>	(7x(1+0,35z <sup>3</sup> )/75) <sup>4)</sup>	10 <sup>-7</sup> ÷ 10 <sup>-9</sup>
	Braunkohle	15 ÷ 18	5 ÷ 10	15	5 ÷ 10	50	10 ÷ 20	10 <sup>-7</sup> ÷ 10 <sup>-9</sup>
4c	Basalt, Mergel-, Kalk-, Dolomit-, und Sandstein	18 ÷ 24	9 ÷ 14	25 ÷ 45 <sup>1)</sup>	--	5 ÷ 400 <sup>2)</sup> [MN/m <sup>2</sup> ]	25÷250 / 250÷100 0	10 <sup>-1</sup> ÷ 10 <sup>-6</sup>

Die Trassen durchfahren zwei unterschiedliche Grundwassersysteme. Zum einen den oberen Grundwasserleiter innerhalb der quartären Sande und Kiese (Schicht 3) in Form eines Porengrundwasserleiters. Zum anderen den unteren Grundwasserleiter innerhalb der tertiären Schichtfolgen. Die vorherrschend ausgeprägt plastischen Tone der Schicht 4b bilden eine Grundwassersperrschicht. Die darin eingeschalteten Sande (Schicht 4a) sind in Abhängigkeit der bindigen Nebenbestandteile jedoch mäßig bis stark wasserführend. Die tertiären Fels Schichten (Schicht 4c) aus Mergel-, Dolomit-, Kalkstein und Basalt bilden einen Kluffgrundwasserleiter, in dem sehr hohe Durchlässigkeiten möglich sind.

Nach den allgemein für das Umfeld der Baumaßnahme vorliegenden Erfahrungen steht das Grundwasser in den tertiären Schichten gespannt an. Die Druckspiegel liegen dabei allgemein etwa auf dem Niveau des freien Grundwassers der quartären Schichten.

In den Auffüllungen und quartären Schichten wurden in bisherigen orientierenden Untersuchungen teilweise erhöhte PAK-Konzentrationen festgestellt, die auf einen Schadstoffeintrag hindeuten.

In den tertiären Schichten wurden durch die bisherigen orientierenden Untersuchungen erhöhte Werte von Schwermetallen und Sulfaten festgestellt.

#### **4.2 Variante 1a**

Entlang der Trassenvariante 1a liegt der Tunnel größtenteils in den Tonen und Schluffen der Schicht 4b. Im Bereich zwischen Station 350 und 800 dominieren die Mergel der Schicht 4c mit variierenden Anteilen an Schluff und Sand.

Vor allem bis Station 450 kann das Anschneiden oder Durchfahren von Kohle oder Torflagen nicht ausgeschlossen werden.

#### **4.3 Variante 1d**

In der Trassenvariante 1d liegt der Tunnelverlauf größtenteils im Mergel innerhalb der Schicht 4c. Bis Station 250 dominieren entlang der Tunnelachse die Tone und Schluffe der Schicht 4b. Anschließend durchörtert der Tunnel im Wesentlichen die Mergellagen mit untergeordneten Anteilen an Schluffen und Tonen der Schicht 4b.

Zwischen Station 200 und 250 wurde oberhalb der geplanten Tunnelfirste eine Kohlelage erkundet. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass Kohle oder Torflagen angeschnitten werden.

#### **4.4 Variante 3i**

Im Wesentlichen durchörtert der Tunnel in der Trassenvariante 3i die Tone und Schluffe der Schicht 4b. Von Station 0 – 1000 sind Einschaltungen von Kalkstein und Mergellagen der Schicht 4c in den Tonen vorhanden. Nachfolgend steigt der Anteil an Sandlagen ab Station 1000 an.

Ab Station 1150 sind Kohle und Torflagen vorhanden, die teilweise durchörtert werden.

Zwischen Station 1300 und 1700 schneidet der Tunnelverlauf eine Basaltlage der Schicht 4c an.

## 5 BESCHREIBUNG DER TUNNELBAUTECHNOLOGIEN

### 5.1 Tunnel in offene Bauweise

Die offene Bauweise eignet sich für Trassenbereiche, die in geringer Tiefe unter einer Straße oder in unbebautem Gebiet verlaufen. Charakteristisch für eine offene Tunnelbauweise ist das Herstellen des Tunnelbauwerks von der Oberfläche her. Das setzt im Stadtbereich eine Trassenführung entlang vorhandener, genügend breiter Straßenzüge voraus. Für die Herstellung des Tunnels wird zunächst eine Baugrube ausgehoben. Die Baugrubenwände können geböscht ausgeführt oder, wo dies auf Grund von Platzmangel nicht möglich ist (z. B. im innerstädtischen Bereich), durch senkrechte Baugrubenwände (z.B. sogenannte Schlitz-, Spund- oder Bohrpfahlwände) gestützt werden. Die Entscheidung für eine Bauweise oder ein bestimmtes Bauverfahren zur Baugrubensicherung wird durch zahlreiche Einflussgrößen, wie z.B. Baugrund, Nachbarbebauung, Belastung, Tiefe etc., bestimmt. Nach der Herstellung des Baugrubenverbau kann der Aushubprozess innerhalb des gesicherten Bereichs beginnen. Bei geotechnischer Notwendigkeit werden Anker oder Baugrubensteifen zur seitlichen Sicherung der Baugrubenwände eingebracht. Die Wasserhaltung, wenn notwendig, erfolgt entweder durch Pumpen, die den Grundwasserspiegel temporär entspannen, oder durch die Abdichtung der Sohl- und Seitenwände der Baugrube. Nach der Fertigstellung der Baugrube kann der Tunnel, wie im Hochbau, durch Betonier- und Schalungsarbeiten hergestellt werden. Nach dem Betonieren des Tunnelbauwerks wird die Baugrube hinterfüllt bzw. überschüttet. Nachteilig für dieses Verfahren sind der enorme Platzbedarf sowie das erhöhte Aushubvolumen.

### 5.2 Tunnel in geschlossene Bauweise

Im Gegensatz zu einer offenen Bauweise erfolgt die Herstellung eines Tunnels in geschlossener Bauweise untertage mit minimalen Eingriffen an der Geländeoberfläche. Die Vortriebsarten der geschlossenen Bauweise lassen sich in zwei Gruppen, den konventionellen (zyklischen) Vortrieb und den maschinellen (kontinuierlichen) Vortrieb, einteilen. Die Wahl des Verfahrens wird von Projekt zu Projekt individuell entschieden. Wichtige Faktoren für die Entscheidung sind:

- Geologie (geomechanische Eigenschaften)
- Tunnellänge
- Infrastruktur im Baustellenumfeld
- Platzverhältnisse
- Geometrie des Ausbruches.

### 5.2.1 Konventioneller (zyklischer) Vortrieb

Die Art des Vortriebs richtet sich nach dem zu durchörternden Material und erfolgt im Fels mit Sprengvortrieb, in Sedimenten mit entsprechenden Abbaumaschinen (Bagger). In weniger standfestem Material wendet man die Spritzbetonbauweise – Neue Österreichische Tunnelbauweise (NÖT) – an. Das Hauptmerkmal dieses Verfahren ist die abwechselnde Folge von Ausbruch und Sicherung des Gebirges im Vortrieb.

Der im Tunnelquerschnitt anstehende Boden wird abschnittsweise mit einem Tunnelbagger gelöst, mittels eines Ladegerätes auf LKW geladen und abgefahren. Im Bereich von Felsbänken kann u. U. der Einsatz eines hydraulischen Meißels erforderlich werden, der als Anbaugerät mit dem Bagger betrieben wird. Nach dem Aushub des Bodens im Bereich der geplanten Abschlaglänge (ca. 0,8 m bis 1,5 m) wird der Hohlraum ringförmig mit Stahlprofilen gestützt (Ausbaubögen). Unmittelbar daran anschließend werden die freigelegten Gebirgsbereiche mit Spritzbeton gesichert. Die Sicherung des Hohlraums wird anschließend in mehreren Arbeitsstufen ergänzt. So werden beispielsweise Gebirgsanker und so genannte Gebirgsspieße gesetzt, die Spritzbetonschale wird bewehrt und auf ihre endgültige Dicke (ca. 20 cm bis 30 cm) ergänzt.

Der Gebirgsausbruch erfolgt abschnittsweise, indem der Tunnelquerschnitt in zwei oder mehrere Teilausbruchquerschnitte unterteilt wird. Bei dem üblichen Kalottenvortrieb wird zunächst der oberste Teilquerschnitt (d.h. die Kalotte, ca. 40% der Gesamtfläche) ausgehoben. Anschließend erfolgt der Ausbruch der Strosse (weitere ca. 40%) und schließlich der Sohlbruch. In schwierigen Gebirgsabschnitten kann eine feinere Unterteilung des Ausbruchs vorgenommen werden. Ausbruchquerschnitt und -folge sowie Sicherungsmittel können an die lokalen Bedürfnisse angepasst werden.

Zum Aufbringen des Spritzbetons und zur Gewährleistung der Standsicherheit der so genannten Ortsbrust (freigelegter Tunnelquerschnitt) ist es bei Tunnelvortrieben im Lockergestein (Boden) erforderlich, das Grundwasser so weit abzusenken, dass im Bereich der freigelegten Flächen keine Strömungskräfte auftreten. In der Regel wird dies durch eine vorausseilende Grundwasserentspannung mittels Bohrbrunnen sichergestellt. Die Brunnen werden von der Geländeoberfläche aus gebohrt und betrieben. Die im Projektgebiet vorhandenen Baugrund- und Grundwasserverhältnisse sind im Kapitel 4 beschrieben. Demnach liegt der geplante Tunnel unterhalb des Grundwasserspiegels. Zu Vermeidung unzulässig großer hydraulischen Gradienten, die zu einem Gebirgsversagen an der Ortsbrust führen könnten, wäre in beiden unterirdischen Trassenvarianten (1d und 3i) Maßnahmen erforderlich. Eine Grundwasserentspannung führt zu einer Veränderung der wirksamen Spannungen im Untergrund, wodurch Setzungen induziert werden. Ein derartiger Eingriff in das Grundwasser kann nicht zugelassen werden.

Zur Reduzierung des Einflusses der Baumaßnahme auf den natürlichen Grundwasserhaushalt ist es möglich, den Tunnel unter Druckluft vorzutreiben. Hierbei wird das Grundwasser aus dem Vortriebsbereich

ferngehalten, indem ein auf den Grundwasserstand ausgelegter Luftüberdruck erzeugt wird. Um die Vortriebe ohne Entwässerung bzw. Grundwasserentspannung durchführen zu können, sind bei Wahl eines Druckluftvortriebs Druckluftstützungen von 1,5 bar für die Vortriebe der Trassenvariante 1d und ca. 2,5 – 3 bar für die Vortriebe der Variante 3i erforderlich. Diese sehr hohen Druckstufen stellen eine außergewöhnliche Belastung der Vortriebsmannschaften dar und sind nach allgemeingültiger Einschätzung zu vermeiden. Speziell im Bereich der Vortriebs Variante 3i ständen die zulässigen Aufenthaltszeiten unter Druckluft zudem in einem unwirtschaftlichen Verhältnis zur notwendigen Ein- und Ausschleusungszeit.

Weitere Möglichkeiten zur Reduzierung des Einflusses der Baumaßnahme auf den natürlichen Grundwasserhaushalt wären eine temporäre Vereisung des Aquifers.

Bei Vereisungen unterscheidet man die Sole- und die Stickstoffvereisung. Bei der Solevereisung werden stationäre Kühlaggregate verwendet. Das gasförmige Kältemittel (z. B. Ammoniak) wird mittels Kompressors verdichtet; dabei wird das Gas verflüssigt. In einem Verdampfer, in dem Kältemittel und Kälte Träger in getrennten Kreisläufen geführt werden, wird die Sole (z. B.  $\text{CaCl}_2$ ) des Kälte Trägers auf etwa  $-40^\circ\text{C}$  abgekühlt. Die Sole wird über ein engständig eingebrachtes Leitungssystem durch den Boden geführt. Infolge der Abkühlung des Bodens wird das in den Poren befindliche Wasser gefroren. Bei der Stickstoffvereisung wird das Stickstoffgas auf  $-196^\circ\text{C}$  abgekühlt. Der flüssige Stickstoff wird in Drucktanks auf die Baustelle transportiert und dort in das Leitungssystem eingebracht.

Die Stickstoffvereisung kommt ausschließlich für sehr kleinräumige Vereisungen infrage. Auch die Solevereisung wurde bisher für längere Tunnelstrecken noch nicht eingesetzt, da in diesem Fall kaum lösbare technische Probleme (es müssen aus separat herzustellenden Bohrnischen in Abständen von ca. 80 cm rings um den Tunnelquerschnitt ca. 40 m bis 50 m lange parallele Längsbohrungen hergestellt werden) und insbesondere außerordentlich hohe Kosten auftreten. In Frankfurt wurde die Vereisung beim Bau der Mainquerung für die A- Strecke zwar erfolgreich eingesetzt, jedoch war der entsprechende Tunnelabschnitt vergleichsweise kurz. Zudem konnten die Bohrungen teilweise von oben (Arbeitspontons) eingebracht werden. Insbesondere aber ist zu berücksichtigen, dass beim Gefrierverfahren deutliche Erdhebungen auftreten, die an der Bebauung zu Hebungsschäden führen können.

Nach Beendigung des Vortriebs wird die endgültige Sicherung des Tunnels in Form einer Tunnelinnenschale eingebaut. Diese Innenschale wird als bewehrter Schalbeton blockweise eingezogen.

## 5.2.2 Maschineller Vortrieb mittels Tunnelbohrmaschinen (TBM)

Der maschinelle Vortrieb mit Tunnelbohrmaschinen – kurz TBM – ermöglicht den vollflächigen, kreisförmigen Ausbruch eines Tunnels. Zu den Vortriebsarten mittels Tunnelbohrmaschinen gehören:

- TBMs ohne aktive Ortsbruststützung
  - Gripper-Tunnelbohrmaschinen (GRT)

- Einfachschilder (Single Open Shield, OPS)
- Doppelschildmaschinen (Double Shield, DOS)
  
- TBMs mit aktiver Ortsbruststützung

Maschinen mit Stützung werden verwendet, wenn die geologischen oder hydrogeologischen Bedingungen einen positiven Stützdruck erfordern. Auslöser hierfür sind zum Beispiel instabile Ortsbrustverhältnisse, die Gefahr von Setzungen und anstehendes Grundwasser mit daraus resultierenden Wasserdrücken. Der Vortrieb unter den genannten Bedingungen erfolgt hier im sogenannten geschlossenen Modus. Demgegenüber steht die Schildfahrt im offenen Modus, bei der kein Stützdruck erforderlich ist.

- Erddruckschilder (Earth Pressure Balance Shield, EPB)
- Flüssigkeitsschilder (Slurry Shield, SLS)
- Variable-Density-Schilder (Variable Density Shield, VDS)
  
- Hybrid-/Multimode-Schilder (Hybrid Shield, HYS)

Das Grundprinzip der Hybridschilder erlaubt durch verschiedene Umbauten innerhalb einer Tunnelstrecke den Wechsel zwischen Flüssigkeitsstützung, Erddruckstützung und offenem Modus. Dabei sind die folgenden Kombinationen möglich:

- Kombination zwischen EPB- und offener TBM
- Kombination zwischen offener und flüssigkeitsgestützter TBM
- Kombination zwischen EPB- und flüssigkeitsgestützter TBM

Aufgrund der wechselnden Bodenverhältnisse entlang der unterirdischen Trassenvarianten, in welcher der gesamte Tunnelquerschnitt innerhalb der tertiären Schichten liegt, werden Anforderungen an die Maschinenteknik, insbesondere zur Stützung der Ortsbrust, gestellt. Um auf die unterschiedlichen Bodenverhältnisse zu reagieren, kommen Schildmaschinen mit Vollschnittabbau und aktiver Stützung (Erddruckschild, Flüssigkeitsschild oder Variable-Density-Schild) in Betracht.

#### 5.2.2.1 Erddruckschild (EPB)

In weichen, bindigen Böden werden bevorzugt Vortriebsmaschinen mit Erddruckstützung eingesetzt. Bei den sogenannten Erddruckschildern (engl. Earth Pressure Balance Shield, kurz EPB) wird die Ortsbrust durch einen Brei aus ausgebautem Boden gestützt. Dies ermöglicht den nötigen Ausgleich der Druckverhältnisse an der Ortsbrust, verhindert ein unkontrolliertes Eindringen des Bodens in die Maschine und schafft die Voraussetzung für einen weitestgehend setzungsfreien Vortrieb.

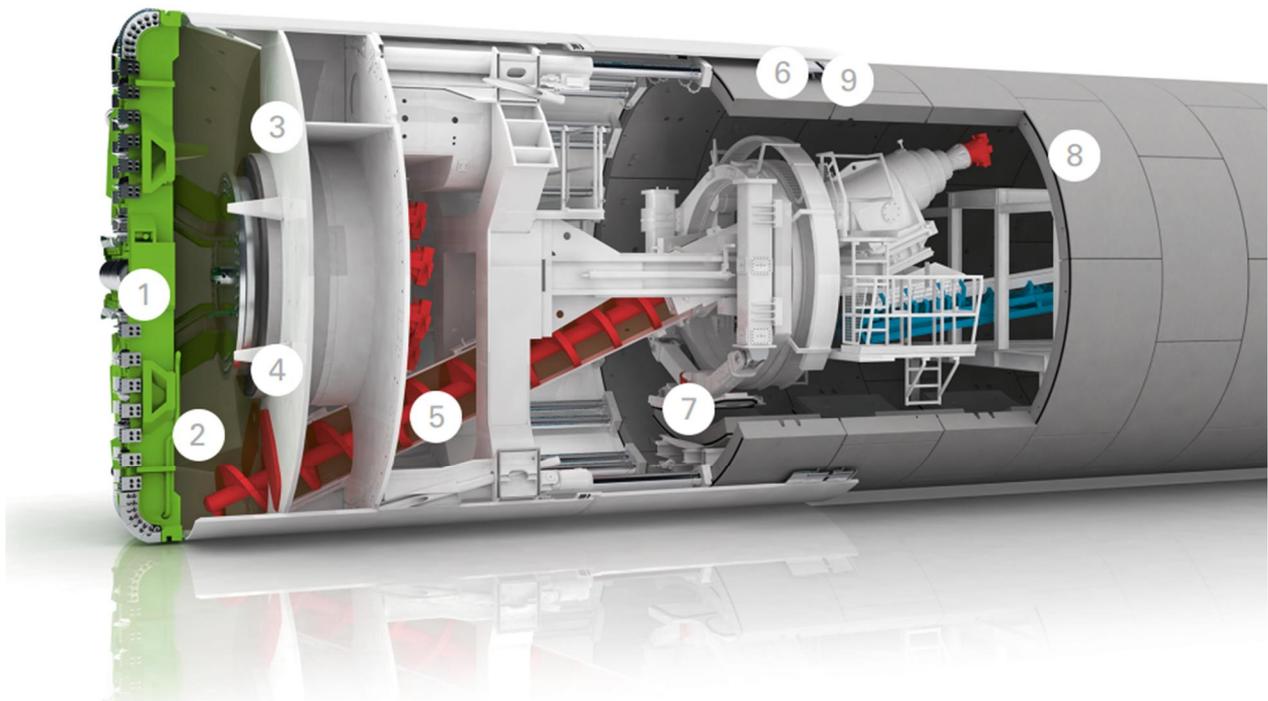


Abbildung 5 Funktionsprinzip EPB [©Herrenknecht AG]

1) Schneidrad 2) Abbaukammer 3) Druckwand 4) Mischflügel 5) Förderschnecke 6) Schildschwanz 7) Tübbingerektor  
8) Tunnelauskleidung 9) Ringspaltverfüllung

### Funktionsprinzip

Ein werkzeugbestücktes, rotierendes Schneidrad (1) wird an die Ortsbrust gedrückt und löst den anstehenden Boden. Über Öffnungen gelangt dieser in die Abbaukammer (2), wo er sich mit dem bereits vorhandenen Erdbrei vermischt. Die Abbaukammer des Schildes ist zum Tunnel hin durch eine Druckwand (3) abgeschlossen. Mischflügel (4) an der Rückseite des Schneidrades (Rotoren) und an der Druckwand (Statoren) kneten die Masse zur gewünschten Konsistenz. Der Druck der Vortriebspresen wird über die Druckwand auf den Erdbrei übertragen. Über eine Förderschnecke (5) wird der Boden aus dem Arbeitsraum in den hinteren Schildbereich zu den Förderbändern übergeben. Im Schutz des Schildmantels (6) werden Stahlbetonsegmente, sog. Tübbinge (8), mittels eines fernbedienbaren, verfahrbaren Vakuummanipulator (7) gesetzt. Die Vortriebspresen schieben den Schild entgegen den wirksamen Reibungskräften des Erdreiches und entgegen der erforderlichen Stützkraft in Vortriebsrichtung nach vorne. Als Widerlager dient der letzte, im Schildschwanz eingebaute Ring. Der Ringspalt (9) zwischen Gebirge und Auskleidung wird kontinuierlich mit Mörtel verfüllt.

### Bodenverhältnisse / (Haupt)Einsatzbereich

Optimale Bedingungen für den Einsatz von EPB-Schilden bieten tonig-schluffige und schluffig-sandige Böden mit breiiger bis weicher Konsistenz und geringer Wasserdurchlässigkeit. Hierbei hat der prozentuale Anteil des Feinkorns, kleiner 0,06 mm, wesentlichen Einfluss. Der Einsatzbereich des Erddruckschildes

kann durch Bodenconditionierung erweitert werden. Durch Injektion von verschiedenen Conditionierungsmitteln wie Wasser, Bentonit oder Schaum werden die plastische Verformbarkeit, Konsistenz und Wasserdurchlässigkeit der Geologie verändert. Dabei ist auf die umweltverträgliche Deponierbarkeit des Materials zu achten.

### Stützdruck

Der Stützdruck an der Ortsbrust wird über die Vortriebsgeschwindigkeit und die Förderschneckendrehzahl gesteuert. Mittels Erddrucksensoren in der Abbaukammer wird der Gleichgewichtszustands kontinuierlich überwacht. Die Regeltoleranz für den Stützdruck beträgt  $\pm 0,3$  bar. Hinsichtlich Ortsbruststützung unterscheiden sich die folgenden Betriebsmodi:

- Erddruckgestützter Betrieb – geschlossener Modus mit aktiver Ortsbruststützung

Das abgebaute Material wird, eventuell unter Zugabe von Conditionierungsmittel, zu einem Erdbrei umgeformt und übernimmt die Stützung der Ortsbrust. Ein unkontrolliertes Eindringen wird hierbei durch die Übertragung der Vortriebspressekraft über die Druckwand auf den Erdbrei verhindert, indem dieser so weit verdichtet wird, bis er die Dichte des Bodens an der Ortsbrust erreicht. Das System hat den Gleichgewichtszustand erreicht, wenn kein weiteres Verdichten des Erdbreis in der Arbeitskammer durch den angreifenden Erd- und Wasserdruck erfolgt. Ein zu hoher Stützdruck führt dementsprechend zu weiterer Verdichtung des Erdbreis und somit zu eventuellen Hebungen vor dem Schild. Aus einem zu niedrigen Stützdruck kann ein Kollabieren der Ortsbrust resultieren und damit zu einem unkontrollierten Eindringen von Boden in den Arbeitsraum führen, wodurch Setzungen an der Erdoberfläche möglich sind. Der Arbeitsraum muss dabei stets komplett mit Erdbrei gefüllt sein.

- Druckluftbetrieb – (halb) geschlossener Modus

In vorübergehend standfesten Gebirge kann bei Wasserzufluss die EPB im geschlossenen Modus mit Teilfüllung der Kammer betrieben werden. Der obere Bereich der Abbaukammer ist mit Druckluft gefüllt, so dass Kluft- und Porenwasser verdrängt und der Wasserzufluss reduziert werden kann. Im Vergleich zum zuvor beschriebenen erddruckgestützten Betrieb sind höhere Druckluftverluste möglich. Von einer ausreichenden Abdichtung zur Erzeugung eines geschlossenen Systems ist nur in Ton oder stark verwittertem Fels auszugehen. Ohne Conditionierung besteht erhöhtes Verklebungspotential. In Abhängigkeit von den Baugrundeigenschaften ist mit erhöhtem Verschleiß zu rechnen.

- Offener Modus

Bei standfester Ortsbrust (Fels oder standfesten Lockergestein) operiert die Maschine häufig im offenen Modus, d.h. ohne Stützung gegen Erd- oder Wasserdruck. Der Abbauraum ist drucklos, eine Teilfüllung der Kammer ist für den Schneckenaustrag erforderlich. Dies erhöht das Sekundärverschleißpotential an Schneidrad und Förderschnecke. Zusätzliche Verschleißschutzmaßnahmen sind zu berücksichtigen.

### 5.2.2.2 Flüssigkeitsschild (SLS)

Haupteinsatzbereich der Flüssigkeitsschilde sind grob- und gemischtkörnige Bodenarten. Bei diesen Vortriebsmaschinen wird die Ortsbrust durch eine unter Druck stehende Flüssigkeit (Bentonitsuspension) gestützt.

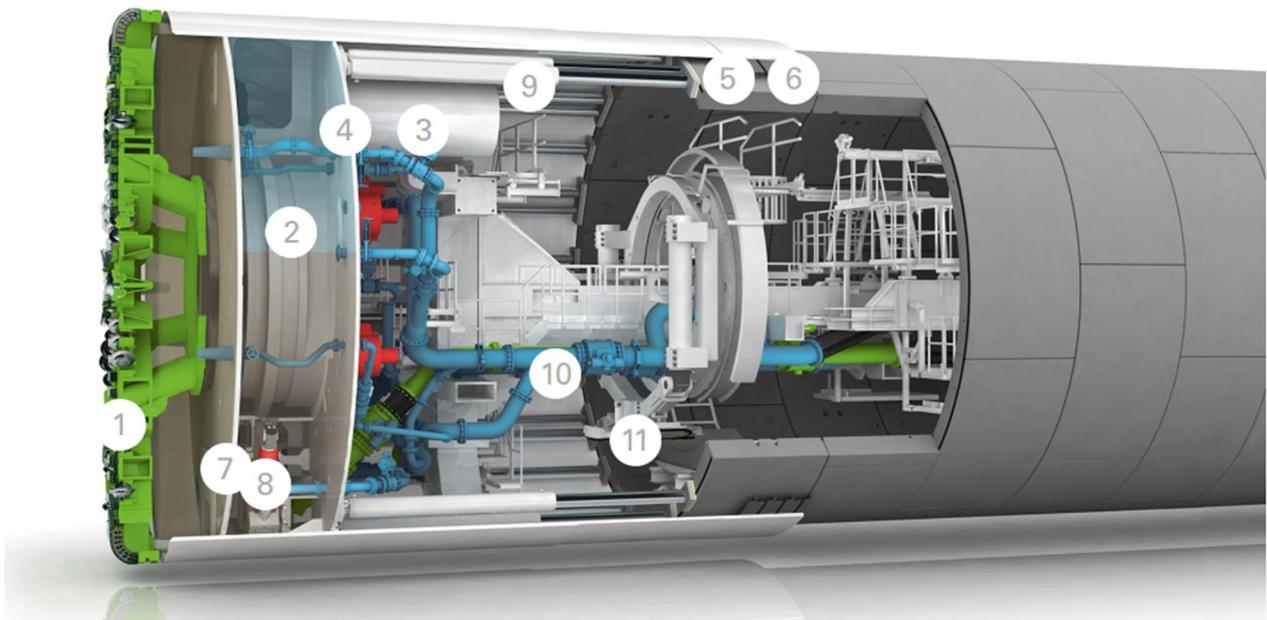


Abbildung 6 Funktionsprinzip Mixschild [©Herrenknecht AG]

1) Schneirad 2) Luftpolster 3) Personalschleuse 4) Druckwand 5) Schildschwanz 6) Ringspaltverfüllung 7) Tauchwand  
8) Zangenbrecher 9) Vortriebszylinder 10) Förderkreislauf 11) Tübbingerektor

#### Funktionsprinzip

Charakteristisch bei der Konstruktion des Mixschields ist die Zweiteilung der Arbeitskammer durch eine Tauchwand (7) mit einer Öffnung im Sohlbereich. Der vordere Teil ist komplett mit Stützflüssigkeit (Bentonitsuspension) gefüllt, im hinteren Bereich steht die Suspension nur bis knapp über die Maschinenachse.

Der Boden wird an der Ortsbrust vollflächig durch das in der Betonsuspension rotierende Schneirad (1) gelöst, vermischt sich mit dieser und trifft durch die Öffnungen in die Abbaukammer ein. Von dort wird die Bentonit-Boden-Suspension durch Saugstutzen der Förderleitung (10) im unteren Teil der Abbaukammer abgesaugt und an die Oberfläche transportiert.

Die Druckwand (4) trennt den unter atmosphärischen Druck stehenden Rest der Maschine von dem druckbeaufschlagten Arbeitsbereich der Vortriebsanlage ab. Die durch die Speiseleitung (10) zugeführte

Bentonitsuspension wird über eine Luftblase mit Druckluft beaufschlagt. Der Zangenbrecher (8) zerkleinert Steine oder Findlinge mechanisch auf förderfähige Korngrößen. Am Umfang angeordnete Hydraulikzylinder (9) drücken den Schild vom zuletzt gebauten Tunnelring vorwärts.

### Einsatzbereich

Haupteinsatzbereich der Flüssigkeitsschilde sind grob- und gemischtkörnige Bodenarten. Der Grundwasserspiegel sollte sich mit ausreichendem Abstand oberhalb der Tunnelfirste befinden. Starkdurchlässige Böden erschweren die Membranbildung für die Stützdruckübertragung. Bei einer Durchlässigkeit von über  $5 \times 10^{-3}$  m/s besteht die Gefahr, dass die Bentonitsuspension unkontrolliert in den Baugrund abströmt. Durch die Zugabe von Feinkorn und Füller oder Additiven zur Verbesserung der rheologischen Eigenschaften kann der Einsatzbereich erweitert werden. Steine und Blöcke, die nicht gepumpt werden können, werden im vorgeschalteten Brecher zerkleinert. Ein hoher Feinanteil kann zu Schwierigkeiten bei der Separierung führen.

### Stützdruck

Die Steuerung des Stützdrucks in der Arbeitskammer erfolgt nicht direkt über den Suspensionsdruck selbst, sondern über das kompressible Luftpolster. Dieses entspricht dem anstehenden Erd- und Wasserdruck und verhindert ein unkontrolliertes Eindringen des Bodens bzw. einen Stabilitätsverlust der Ortsbrust. Durch die Druckluftregelanlage wird das präzise gesteuerte Druckluftpolster auf dem Solldruckwert gehalten. Schwankungen der Bentonit-Förderanlage oder spontane Druckverluste können somit rasch ausgeglichen werden. Die Regeltoleranz für den Stützdruck beträgt  $\pm 0,1$  bar.

Die Maschine kann in standfestem Gebirge auch ohne Druckbeaufschlagung im offenen Modus mit Wasser als Fördermedium betrieben werden.

### Wartungen

Bei Mixschild-Vortrieben entsteht an der Grenzfläche zwischen Baugrund und Bentonitsuspension ein sogenannter Filterkuchen. Diese weitgehend undurchlässige Membran ermöglicht erst den Aufbau des erforderlichen Stützdrucks und versiegelt gleichzeitig die Ortsbrust gegen anströmendes Grundwasser. Im Vortriebsverlauf müssen Schneidrad, Abbauwerkzeuge und weitere Komponenten kontrolliert, gewartet oder gereinigt und Hindernisse beseitigt werden. Dazu wird die Suspension in Arbeits- und Abbaukammer mittels Druckluftbeaufschlagung teilweise abgesenkt. Durch Schließen des Tauchwandschiebers ist auch eine vollständige Absenkung der Arbeitskammer für Arbeiten im Sohlbereich möglich. Die Wartungsmannschaft gelangt über die Personenschleuse in die Arbeitskammer. Beim Einschleusen wird die Mannschaft an die Überdruckverhältnisse gewöhnt.

### 5.2.2.3 Hybrid- / Multi-Mode TBM

Bei der Betrachtung des Wechsels zwischen Erddruckstützung und Flüssigkeitsstützung unterscheiden sich die Vortriebsarten in den Materialeigenschaften in der Abbaukammer und im Prinzip der Stützdrucksteuerung. Keine wesentlichen Unterschiede treten bei der Gestaltung der Abbaukammer und des Schneidrads auf. Ein grundlegender Unterschied betrifft den Materialtransport. Hier gibt es die Möglichkeit, beide Systeme zu installieren und bei Bedarf erfolgt ein Umbau, der mit einem erhöhten Aufwand verbunden ist. Dieser Umbau ist aber nur bei Maschinendurchmessern ab 9 m problemlos möglich. Bei Durchmessern von weniger als 9 m bietet sich ein modulares Konzept an. Der Austausch von einzelnen Baugruppen und Funktionseinheiten erfolgt dann in einem Zwischenschacht entlang der Trasse. Für den Umbau sollte ein Zeitbedarf von min. 6 Wochen eingeplant werden.

Bei einer Multi-Mode TBM müssen auf der BE-Fläche sowohl eine Separationsanlage für die Slurry- als auch Lagerflächen für den Aushub der EPB-TBM errichtet werden. Der Platzbedarf einer Multi-Mode TBM ist daher im Vergleich zu der reinen Slurry- oder der reinen EPB-TBM erhöht.

Der Investitionsaufwand einer Multi-Mode TBM ist im Vergleich zu Slurry- oder EPB-TBM um ca. 40% höher. Dem gegenüber steht der breitgefächerte Einsatzbereich der Multi-Mode TBM, da sie sowohl in feinkörnigen als auch in grobkörnigen Böden mit hoher Leistungsfähigkeit eingesetzt werden kann.

### 5.2.2.4 Variable-Density-Schildmaschine (VDS)

Ein Sonderfall der Multi-Mode TBMs mit erddruck- und flüssigkeitsgestütztem Modus ist die Variable-Density-Schildmaschine. Die Variable-Density-TBM kombiniert die Vorteile beider Verfahren – EPB und Mixschild – in einer Maschine. Ohne größere mechanische Modifikationen kann direkt im Tunnel zwischen vier verschiedenen Vortriebsmodi umgeschaltet werden. Dadurch ist es möglich, im Verlauf der Trasse sehr flexibel auf geologische und hydrogeologische Veränderungen zu reagieren. Sowohl im erddruck- als auch im flüssigkeitsgestützten Modus wird der Abraum über einen Schneckenförderer aus der unter Druck stehenden Abbaukammer entnommen. Die Regelung des Stützdrucks erfolgt je nach Modus über Schneckendrehzahl und Vorschubgeschwindigkeit oder über ein automatisch geregeltes Luftpolster. Kommunizierende Röhren ersetzen die fehlende Tauchwandöffnung. Im EPB-Modus wird der Abraum von der Schnecke auf ein Förderband abgeworfen. Im Flüssigkeitsmodus wird die TBM dank einer zusätzlichen Slurryfier-Box am Ende der Schnecke mit hydraulischem Förderkreislauf gefahren. Bei Letzterem kann entweder eine normale Bentonitsuspension oder alternativ eine Suspension mit hoher Dichte genutzt werden. Die Ortsbruststützung im ersten Fall (Betriebsmodus mit dünnflüssiges Stützmedium mit geringer Dichte) entspricht dem bewährten Mixschildprinzip. Bei der zweiten Variante kann zusätzlich eine zähflüssige Suspension eingesetzt werden, um beim Stützmedium in der Arbeitskammer eine maximale Dichte zu erzielen. Dadurch kann die Art der Ortsbruststützung variieren von flüssig, wie bei einem Mixschild, bis zum Erdbreistützung wie bei einer EPB-Maschine. Das erweitert den

Einsatzbereich der Variable-Density-TBM im stark heterogenen, durchlässigen Baugrund, vom groben Lockergestein (Kies) und stark geklüfteten oder verkarsteten Festgestein, sowie für das Unterfahren von Bereichen mit einer geringen Überdeckung.

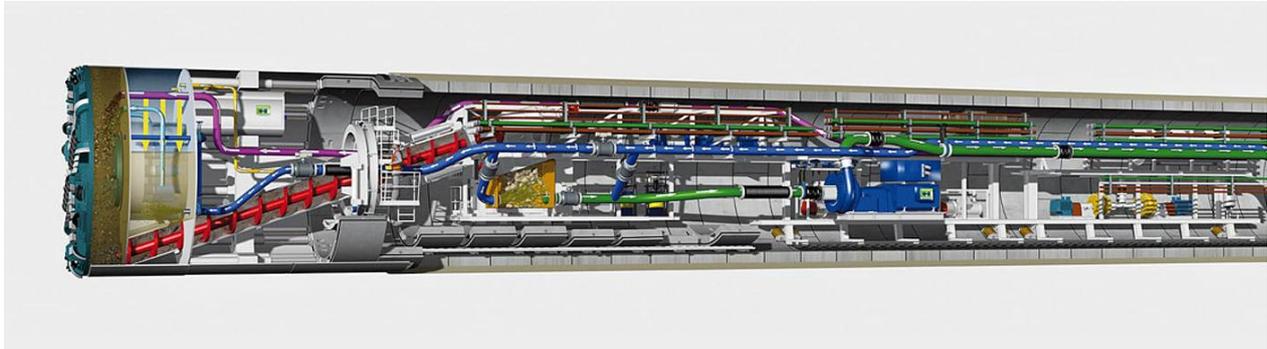


Abbildung 7 Beispiel einer VD-TBM [©Herrenknecht AG]

## 6 KRITERIEN ZUR AUSWAHL DES BAUVERFAHRENS DER VARIANTEN IN GESCHLOSSENER BAUWEISE

Die weiteren Ausführungen in Kapitel 6 und 7 beziehen sich auf die Varianten 1d und 3i, bei denen ein Tunnelbauverfahren aus dem Bereich der geschlossenen Bauweise zur Anwendung kommen soll. Bei Variante 1a ist die Bauweise als offene Bauweise bereits festgelegt, eine weitere Differenzierung erübrigt sich bei dieser Variante und es wird auf das Kapitel 5.1 verwiesen.

In der aktuellen DAUB-Empfehlung [N1] werden Auswahlkriterien bezüglich der Baugrundeigenschaften festgelegt. Diese bilden die Basis für die Auswahl und die Festlegung eines geeigneten Vortriebsverfahrens. Damit der Vortrieb mit allen Randbedingungen erfolgreich in den unterschiedlichen zu erwartenden Bodenbedingungen aufgeföhren werden kann, ist die Auswahl einer geeigneten Vortriebsmaschine frühzeitig zu untersuchen.

### 6.1 Hauptkriterien

Die Hauptkriterien bilden hierbei die folgenden Eigenschaften:

- Feinkornanteil (<0,06 mm), [%]
- Durchlässigkeit des Bodens,  $k_f$  [m/s]
- Konsistenz,  $I_c$  [-]
- Lagerungsdichte
- Stützdruck, [bar]
- Quellpotenzial
- Abrasivität (äQu)

Auf Basis des Baugrundgutachtens [U1] und den Einsatzbereichen eines jeden TBM-Typs gemäß DAUB-Veröffentlichung wird für die jeweiligen Kriterien eine Punkteverteilung vorgenommen.

Da die Abrasivität nicht für alle Bodenarten mit äquivalentem Quarzgehalt (äQu) abgebildet werden kann und somit eine Vergleichbarkeit nur eingeschränkt möglich ist, werden die Hauptkriterien erweitert. Die folgenden ergänzenden Kriterien werden dabei betrachtet:

## 6.2 Ergänzende Kriterien

- Setzungsempfindlichkeit der Infrastruktur an der Oberfläche
- Verklebung
- Verschleiß

Besonders im innerstädtischen Bereich ist auf geringe Setzungen an der Oberfläche und der Infrastruktur zu achten.

Weiterhin sollten die Verklebungsneigung und der Verschleiß betrachtet werden, da diese beiden Randbedingungen gravierende Auswirkungen auf den Vortrieb haben können.

## 6.3 Bewertung der Kriterien zur Auswahl des Maschinentyps

Im Rahmen der tunnelbautechnischen Voruntersuchung wurde für die Varianten 1d und 3i eine solche Untersuchung vorgenommen. Die Punktevergabe erfolgte nach dem nachfolgenden System:

DAUB-Bewertung	Bewertung in Stufen / Punkte
Haupt Einsatzbereich (+)	9
	8
	7
erweiterter Einsatzbereich (o)	6
	5
	4
Einsatz eingeschränkt (-)	3
	2
	1

Die o. g. Kriterien sind jeweils einfach berücksichtigt. Die Abrasivität äQu wird nicht berücksichtigt, da diese über die Hauptkriterien abgedeckt wird.

## 7 UNTERSUCHUNG DER TRASSENVARIANTEN IN GESCHLOSSENER BAUWEISE

Die beiden näher betrachteten Varianten mit Tunnelstrecken in geschlossener Bauweise (1d und 3i) wurden auf Basis der vorliegenden geotechnischen Längsschnitte und den Erkundungsbohrungen in Homogenbereiche (Abschnitte mit vergleichbaren Baugrundzusammensetzungen) eingeteilt.

Pro Abschnitt werden die Anteile der einzelnen Homogenbereiche anhand der Verteilung in den vorliegenden Längsschnitten bzw. Bohrprofile abgeschätzt.

Auf Basis der Zusammensetzung wird anschließend pro Vortriebsabschnitt eine Einstufung aller Kriterien vorgenommen. Hierbei wird der Feinkornanteil < 0,06 mm auf Basis der Verteilung in dem Abschnitt ermittelt.

Die Konsistenzzahl wird mit einem Faktor korrigiert. Für die nichtbindigen Böden kann keine Konsistenz ermittelt werden. Da der Anteil der bindigen Böden im Ausbruchquerschnitt somit weniger als 100% beträgt, wird die Verteilung der bindigen Homogenbereiche dahingehend korrigiert, dass die Summe der bindigen Homogenbereiche 100% beträgt.

### 7.1 Eignung der TBM-Typen pro Vortriebsabschnitt

Anhand der vorliegenden Kornverteilungslinien erfolgte eine weitere Präzisierung in Bezug auf die Bauverfahren.

Einsatzbereiche EPB & Slurry sowie Übergangsbereiche  
- Variante 1 d -

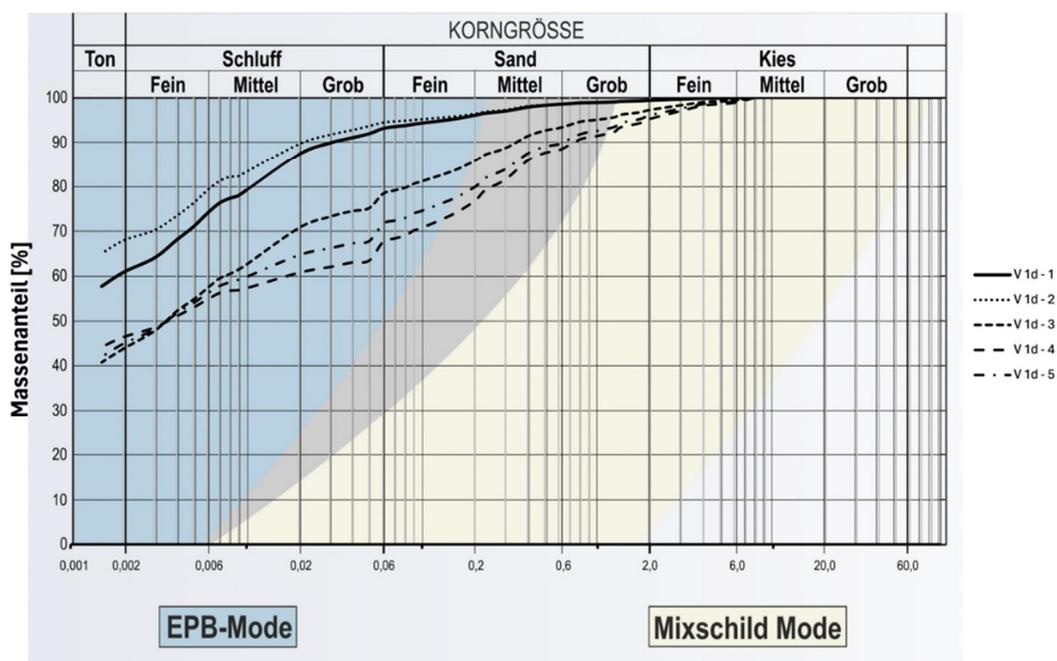


Abbildung 8 Einsatzbereiche EPB & Slurry Variante 1d

Einsatzbereiche EPB & Slurry sowie Übergangsbereiche  
Variante 3i

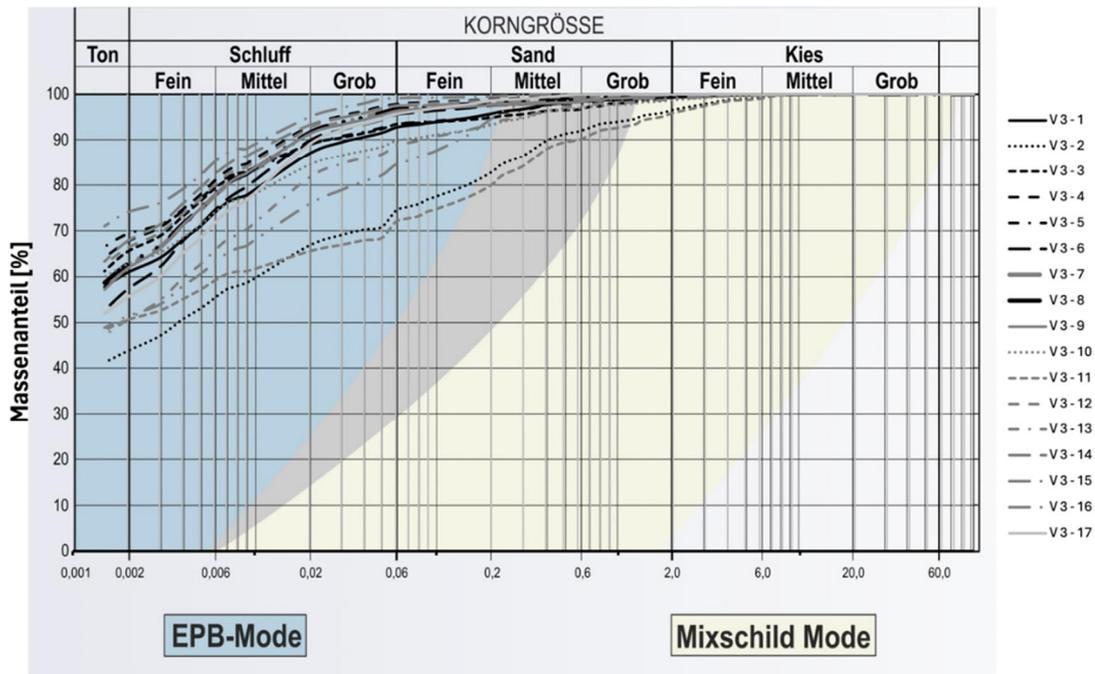


Abbildung 9 Einsatzbereiche EPB & Slurry Variante 3i

Zudem werden bei der zusätzlichen Auswertung die leistungsbestimmenden Merkmale des Baugrunds zusammengefasst dargestellt. Diese Beschreibung ersetzt nicht das Baugrundgutachten oder schränkt dieses ein. Es bewahrt vollkommen unabhängig seine Gültigkeit.

Die Hauptgruppen orientieren sich im Wesentlichen an den Einsatzbereichen nach Schößer / Thewes für Slurry-Vortriebe sowie den Einsatzbereichen nach Thewes für EPB-Vortriebe, die sich über die Körnungslinien voneinander abgrenzen.

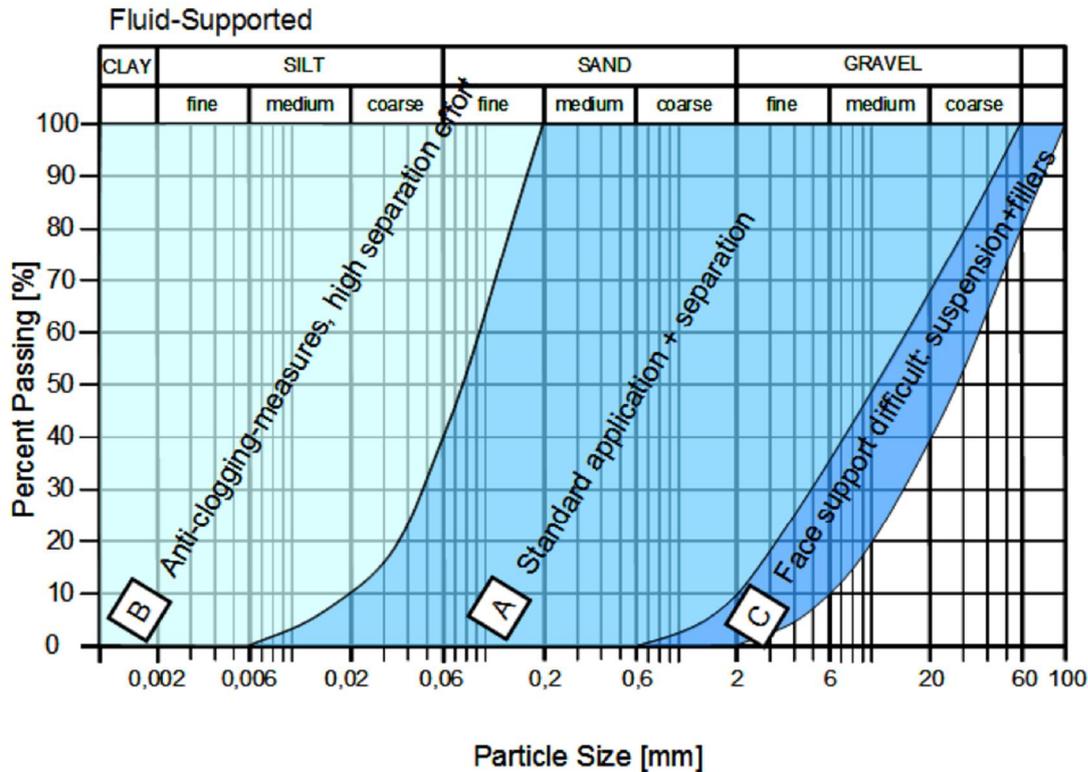


Abbildung 10 Einsatzbereiche Slurry-TBM [Thewes, 2009] [N2]

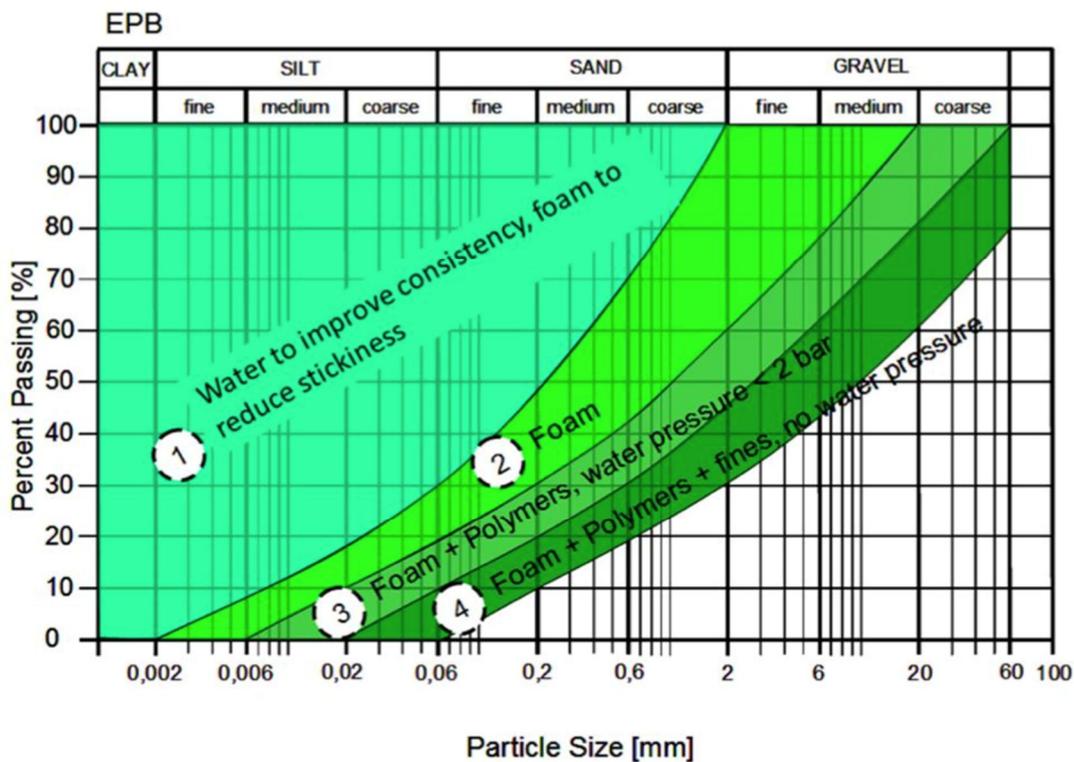


Abbildung 11 Einsatzbereiche EPB-TBM [Thewes, 2007] [N2]

Bei der Untersuchung der Einsatzbereiche wurde anhand der vorliegenden Kornverteilungslinien unabhängig von der Tiefenlage und der Lage entlang des Projektgebiets eine prognostizierte Kornverteilungskurve innerhalb des gewählten Abschnitts ermittelt. Um den ungünstigsten Fall abzubilden, wurden die maximalen Siebdurchgangswerte berücksichtigt.

Eine weitergehende Einstufung in Leistungsklassen (vgl. Untergruppe 1) wurde zu diesem Zeitpunkt nicht vorgenommen.

## 7.2 Trassenvariante 1d

Unter Verwendung der o. g. Einstufungen nach Thewes [2009, Abbildung 10] / [2007, Abbildung 7] liegen die prognostizierten Kornverteilungskurven in den folgenden Einsatzbereichen:

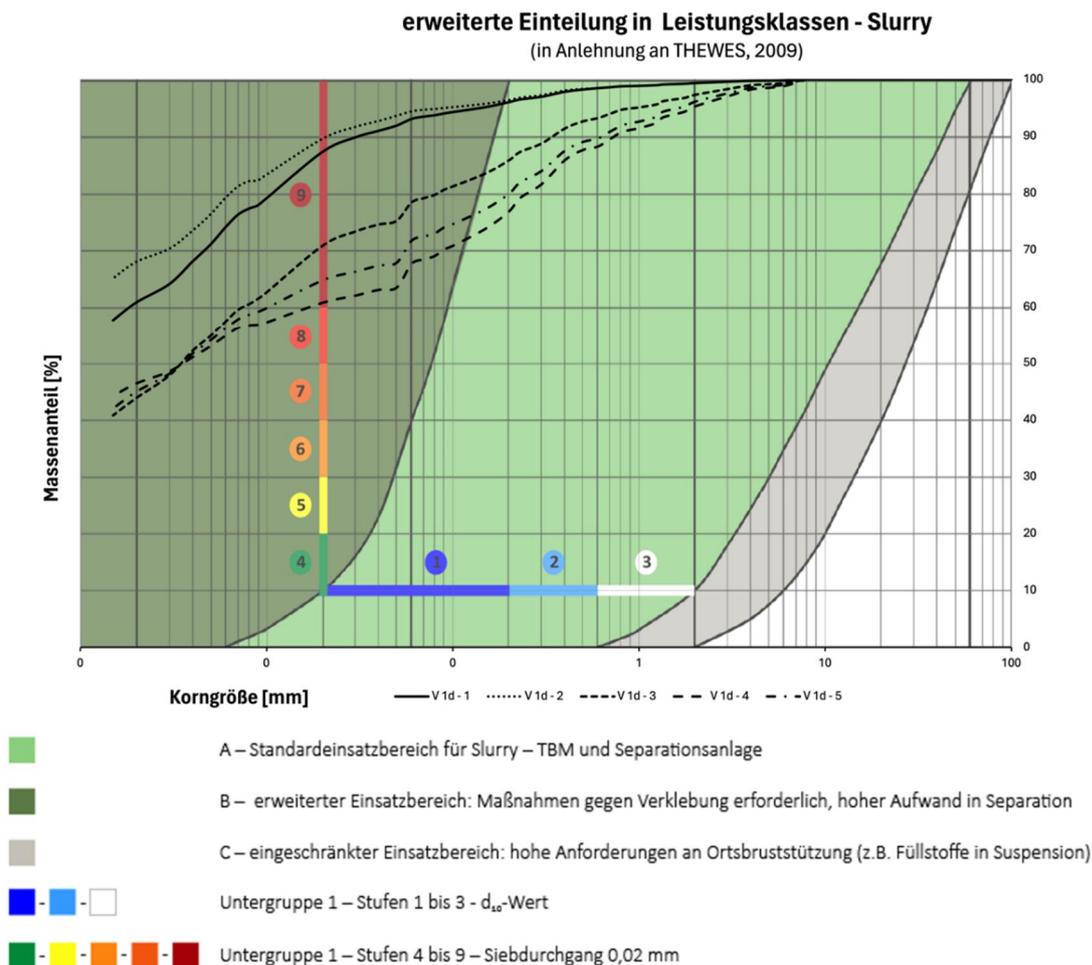
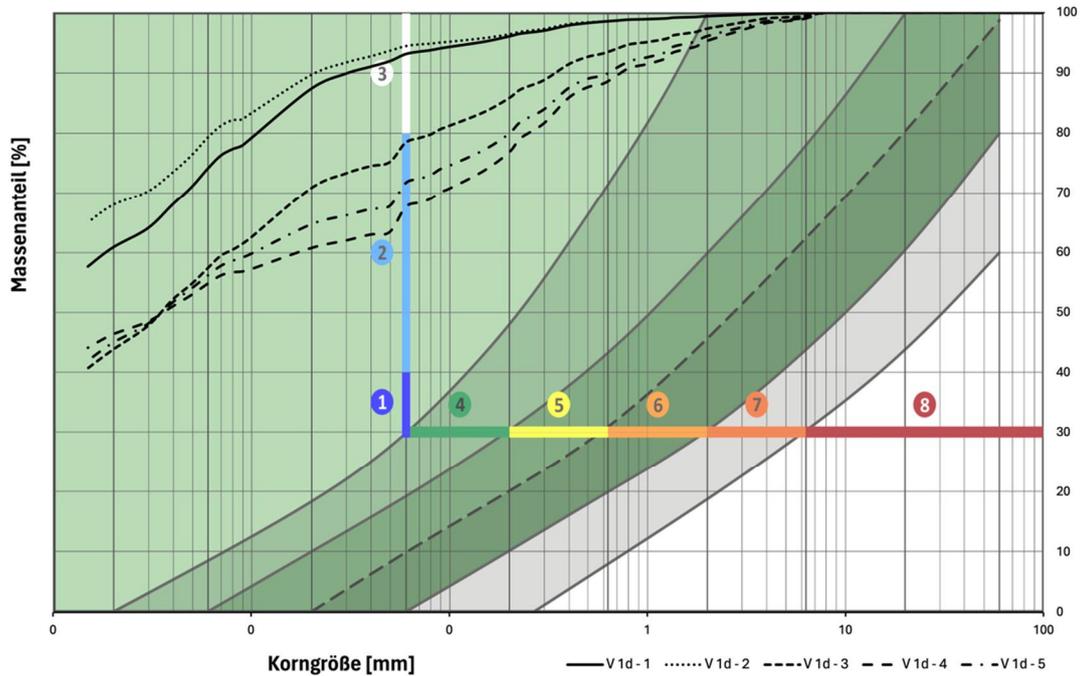


Abbildung 12 Einteilung in Leistungsklassen Slurry V1d

**erweiterte Einteilung in Leistungsklassen - EPB**  
(in Anlehnung an THEWES, 2007)



- A – Standard Einsatzbereich für EPB-TBM
- B – erweiterter Einsatzbereich: Maßnahmen bei der Bodenconditionierung erforderlich
- C – eingeschränkter Einsatzbereich: hohe Anforderungen an die Bodenconditionierung
- D – eingeschränkter Einsatzbereich: sehr hohe Anforderungen an die Bodenconditionierung, z. B. Zugabe von Füllstoffen (Steinmehl, Bentonit etc.)
- -  Untergruppe 1 – Stufen 1 bis 3 – Siebdurchgang 0,06 mm
- -  -  -  Untergruppe 1 – Stufen 4 bis 8 –  $d_{30}$ -Wert

Abbildung 13 Einteilung in Leistungsklassen EPB V1d

### 7.3 Trassenvariante 3i

Für die Trassenvariante 3i liegen die prognostizierten Kornverteilungskurven in den folgenden Einsatzbereichen:

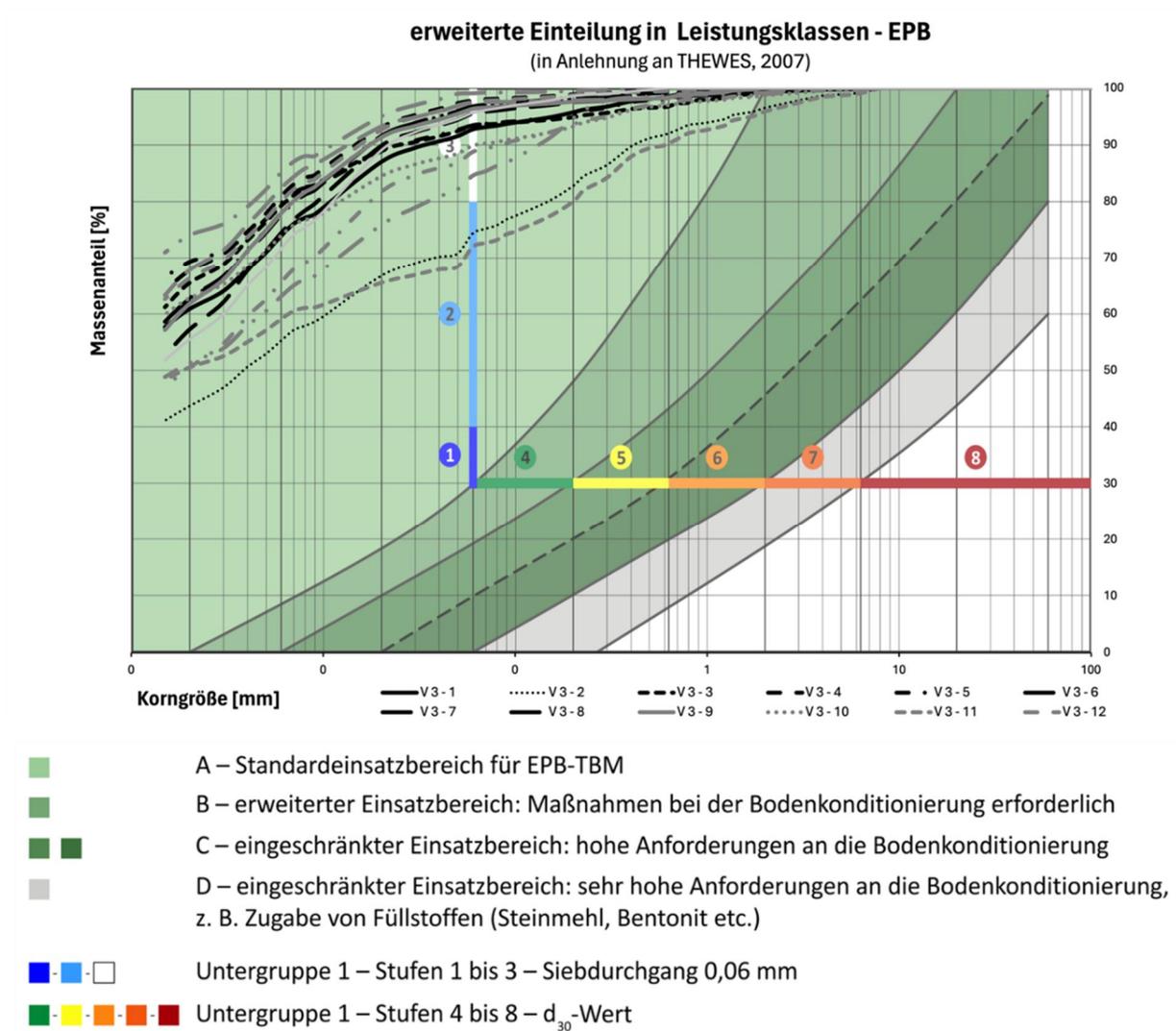


Abbildung 14 Einteilung in Leistungsklassen EPB V3i

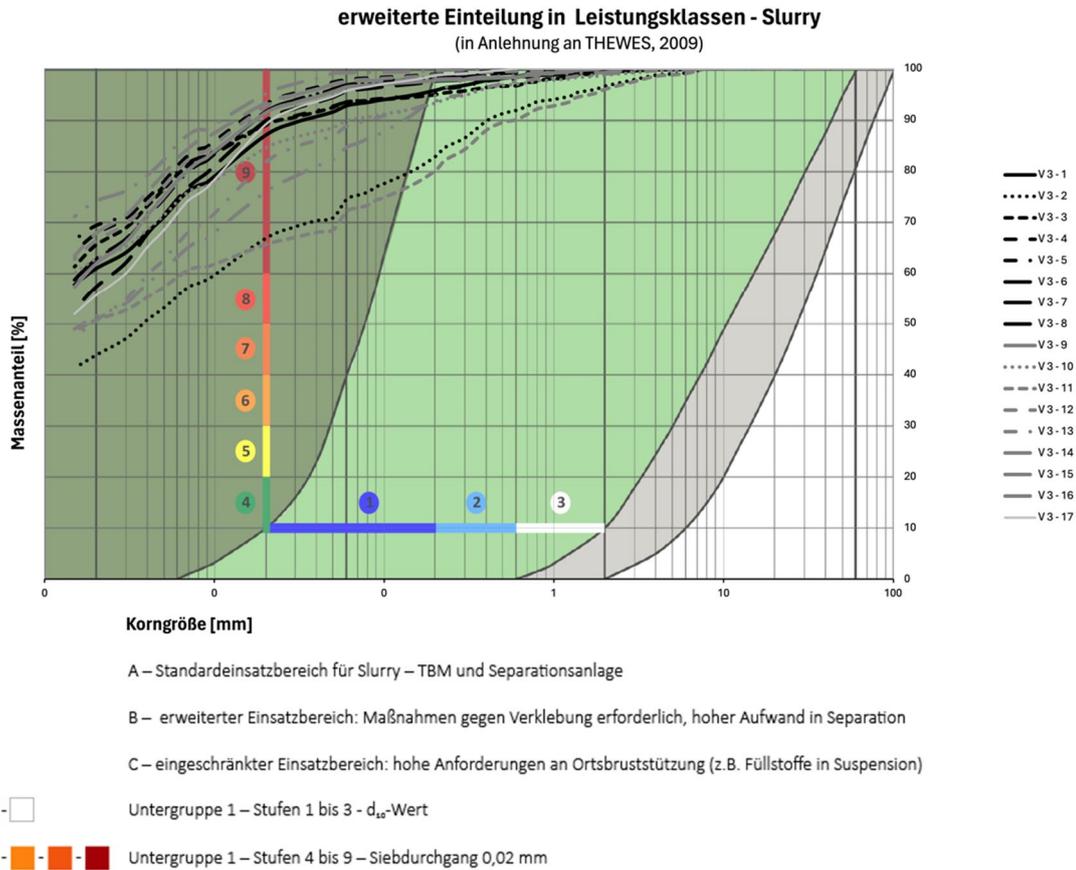


Abbildung 15 Einteilung in Leistungsklassen Slurry V3i

#### 7.4 Verklebungsneigung

Bestimmte Bodenarten neigen infolge ihrer Eigenschaften zu Verklebungen. Dies ist häufig bei Bodenschichten mit einem hohen Feinkornanteil, wie beispielsweise Tonen und Schluffen, zu beobachten. Für die Trassenvarianten (1d und 3i) der U4 wurden die vorliegenden Laborergebnisse der Bohraufschlüsse hinsichtlich der Plastizitätszahl und Konsistenzzahl ausgewertet und das Verklebungspotenzial der Tone / Schluffe nach Thewes für den Slurry-Vortrieb sowie nach Hollmann & Thewes für den EPB-Vortrieb ermittelt. Die Tiefenlage wurde hierbei nicht berücksichtigt.

Tabelle 2 Verklebungsneigung Variante 1d

<b>Slurry - V 1d</b>				
<b>Homogenbereich</b>	<b>gering</b>	<b>hohe</b>	<b>mittlere</b>	<b>Ansatz für DAUB-Auswahl</b>
<b>2</b>	0	1	0	hohe
<b>3</b>	0	0	0	gering
<b>4 b</b>	4	7	1	hohe
	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>1</b>	
	31%	62%	8%	

<b>EPB - V 1d</b>				
<b>Homogenbereich</b>	<b>Klumpen</b>	<b>mittel</b>	<b>stark</b>	<b>Ansatz für DAUB-Auswahl</b>
<b>2</b>	0	1	0	mittel
<b>3</b>	0	0	0	Klumpen
<b>4 b</b>	1	8	3	mittel
	<b>1</b>	<b>9</b>	<b>3</b>	
	8%	69%	23%	

Tabelle 3 Verklebungsneigung Variante 3i

<b>Slurry - V3i</b>				
	<b>gering</b>	<b>hohe</b>	<b>mittlere</b>	<b>Ansatz für Berechnung</b>
<b>2</b>	1	1	0	gering
<b>3</b>	0	0	2	mittlere
<b>4 b</b>	3	17	5	hohe
	<b>4</b>	<b>18</b>	<b>7</b>	✓
	14%	62%	24%	

<b>EPB - V3i</b>				
	<b>Klumpen</b>	<b>mittel</b>	<b>stark</b>	<b>Ansatz für Berechnung</b>
<b>2</b>	2	0	0	Klumpen
<b>3</b>	1	1	0	Klumpen
<b>4 b</b>	3	19	3	mittel
	<b>6</b>	<b>20</b>	<b>3</b>	✓
	21%	69%	10%	

## 7.5 Stützdruckberechnung

Bei beiden Trassen sind nicht in allen Bereichen der Trasse die Nachweise der Stützdruckberechnungen vollumfänglich erfüllt. Insbesondere bei den EPB-Vortrieben ist die Tiefenlage zu überprüfen. Dies betrifft bei der Variante 1d den Abschnitt ab ca. 450 m. Die Variante 3i ist insbesondere zwischen ca. 900 m und ca. 1.100 m für die EPB-TBM hinsichtlich der Tiefenlage zu überprüfen. Ebenso ist die Tiefenlage der Schächte / der Station zu prüfen. Bei einem EPB-Vortrieb wären in diesem Bereich Drucklufteinstiege zur Schneidradinspektion und zum Werkzeugwechsel nur eingeschränkt möglich.

## 7.6 Abschätzung des zu erwartenden Verschleißes

Beim maschinellen Tunnelvortrieb wird der auftretende Verschleiß in Primär- und Sekundärverschleiß unterschieden.

Der Primärverschleiß beschreibt den Verschleiß, der infolge des Abbauvorganges an der Ortsbrust an den Abbauwerkzeugen entsteht. Dieser ist unter anderem abhängig von der Abrasivität und Festigkeit des zu lösenden Bodens.

Im Rahmen der Baugrunderkundung wurde an insgesamt fünf Proben der Cerchar Abrasivity Index (CAI) ermittelt. Die gemessenen Werte liegen einheitlich bei CAI = 1,1 bis 2,7. Entsprechend den in der Unterlage [U1] dokumentierten Versuchsergebnissen sind die Gesteine der Schicht 4c als abrasiv bis sehr abrasiv zu kennzeichnen.

Der Sekundärverschleiß entsteht durch die reibende und schleifende Einwirkung des bereits gelösten Baugrunds. Infolge von Verklebungen am Schneidrad und der daraus resultierenden Verringerung der Schneidradöffnungen staut sich das Material dort und die Strömungsgeschwindigkeit in den verbliebenen Öffnungen wird erhöht. Aufgrund dieser Geschwindigkeitserhöhung kann ein verstärkter Verschleiß an den Abbauwerkzeugen und an der Schneidradstruktur auftreten.

Die Abrasivitätseinschätzung des Baugrundgutachtens wird auf die Klassifizierung von THURO [L2] / KÖPPL [L3] übertragen, um eine Vergleichbarkeit der Homogenbereiche auch ohne Angabe des äquivalenten Quarzgehalts zu erhalten.

Beim Tunnelvortrieb ist die Abrasivität sowie die Abrasivität in Verbindung mit dem Verklebungspotenzial eine wesentliche Einflussgröße auf den Verschleiß der Werkzeuge und unter Umständen auf die Schneidradstruktur. Da die Auswirkungen von Verklebungen auf den Verschleiß bei gleichzeitigem Auftreffen von abrasivem Bodenmaterial in einer heterogenen Ortsbrust erfahrungsgemäß gravierende Auswirkungen haben können, wurde der Verschleiß als zusätzliches Kriterium in die DAUB-Auswertung aufgenommen.

Die Einstufung des Verschleißes wird wie folgt berechnet:

$$\text{Verschleißpotential} = \frac{(2 * \text{Wertung Verklebungspotential}) + (1 * \text{Wertung Abrasivität})}{3}$$

In der nachfolgenden Tabelle 4 sind die jeweiligen Einstufungen dargestellt:

Tabelle 4 Einstufung des Verschleißes

Verklebungspotenzial EPB-Schild	Verklebungspotenzial Hydroschild	Abrasivitätsklassi- fikation	Verschleißpotential
gem. Hollmann & Thewes	gem. Thewes	gem. THURO / KÖPPL	gem. BabEng
1 keine / Klumpen	1 keine	1 Nicht abrasiv	1 Sehr niedrig
1 flüssig	2 gering	2 Kaum abrasiv	2 Niedrig
2 schwach	3 mittlere	3 Schwach abrasiv	3 Moderat
3 mittel	4 mittel-hoch	4 Abrasiv	4 Hoch
5 stark	5 hohe	5 Stark abrasiv	5 Sehr hoch
		6 Extrem abrasiv	6 Extrem hoch

## 7.7 Tertiärer Fels, Kalk- und Dolomitsteinschichten

In den Hydrobienschichten befinden sich Kalk- und Dolomitsteinschichten von sehr unterschiedlicher Dicke und sehr unterschiedlicher Festigkeit. Die erkundeten Schichtdicken der Kalk-, Sand- und Dolomitsteinschichten reichen im Projektgebiet bis zu einer Dicke von 5 m. Die Mächtigkeit der Basaltschicht beträgt zwischen wenigen Zentimetern bis 5,1 m. Die Gesteine sind überwiegend verwittert und untergeordnet angewittert bis entfestigt. Die Einaxiale Druckfestigkeit des Gesteins schwankt in weiten Grenzen zwischen ca. 5 MPa und 400 MPa [U1]. Beim Slurry-Schild können die Steine oder Felsbänke durch Disken-Meißeln und/oder Steinbrecher in der Arbeitskammer auf ein förderbares Maß zerkleinert werden. Der erforderliche Abbau der vorhandenen Felsschichten allein mit Disken-Meißeln beim EPB-Schild ist abhängig von der Anordnung und dem Spurenverlauf der Disken.

## 8 AUSWERTUNG

Unter Berücksichtigung der Kriterien nach der DAUB-Auswahl und den zusätzlichen projektspezifischen Kriterien wird zunächst eine Punktbewertung nach dem zuvor beschriebenen Verfahren für jeden Abschnitt vorgenommen. Die Einteilung der Abschnitte jeder Variante ist den Tabellen 5 bis 8 zu entnehmen.

Es wird demnach für jeden Abschnitt das geeignete Verfahren ermittelt. Bei einer Betrachtung der gesamten Vortriebsstrecken ergibt sich die folgende Eignung auf Basis der Vortriebslänge:

Tabelle 5 Variante 1d - Eignung auf die Vortriebsstrecke

	Variante 1d	
TBM-Typ	Vortriebslänge (optimaler Einsatzbereich)	Eignung bezogen auf die Vortriebsstrecke
Erddruck-Schild	300 m	50%
Slurry-Schild	300 m	50%

Tabelle 6 Variante 3i - Eignung auf die Vortriebsstrecke

	Variante 3i	
TBM-Typ	Vortriebslänge (optimaler Einsatzbereich)	Eignung bezogen auf die Vortriebsstrecke
Erddruck-Schild	1.500 m	66%
Slurry-Schild	790 m	34%

Die in der DAUB-Empfehlung aufgeführten TBMs ohne aktive Ortsbruststützung sowie die Teilschnittmaschine wurden nicht in der Auswertung betrachtet, da diese in der Geologie bzw. dem innerstädtischen Bereich nicht geeignet sind.

Ebenso wird die Multimode-TBM in der Auswertung nicht berücksichtigt, da diese – wie in Kapitel 5.2.2 dargestellt – einen sehr großen Platzbedarf an der Startbaugrube hat und die Investitionskosten deutlich höher sind.

Auf Basis dieser Auswertung wird die EPB-TBM als geeignetes Tunnelvortriebsverfahren für die Variante 3i ermittelt. Im Vergleich zeigt die Bewertung für die Trassenvariante 1d gemäß Tabelle 5 auf Seiten des Erddruckschildes zunächst keinen Vorteil.

Für die Vorzugstrasse sollten die Werte nochmals im Detail geprüft und auf die Tiefenlage und ggf. weiteren Erkenntnisse (z.B. ergänzende Baugrunduntersuchungen) abgestimmt werden.

Tabelle 7

Variante 1d - Auswahl des Vortriebsverfahrens

Vortriebsabschnitt / -bereich		1	2	3	4
lfd. Nr.		V1d-1	V1d-2	V1d-3	V1d-4
Stationierung von ...		0 m	150 m	300 m	450 m
... bis		150 m	300 m	450 m	600 m
Länge Vortriebsabschnitt		150 m	150 m	150 m	150 m
Verteilung Homogenbereich e pro Abschnitt	1	0%	0%	0%	0%
	2	0%	0%	9%	14%
	3	0%	0%	0%	0%
	4 a	31%	8%	46%	0%
	4 b	61%	84%	11%	27%
	4 c	8%	8%	34%	59%
	Dominierender Homogenbereich		4 b	4 b	4 a
DAUB-Kriterien	mittlerer Feinkornanteil (< 0,06 mm) im VA	74,9015152	74,9015152	26,575	23,84
	Durchlässigkeit - max.	1,00E-07	1,00E-07	1,00E-05	1,00E-01
	Konsistenz	1,33	1,33	2,33	2,07
	Lagerungsdichte	dicht	dicht	dicht	dicht
	vorauss. Stützdruck Regelvortrieb (Slurry)	1,5	1,2	1,4	0,7
	vorauss. Stützdruck Regelvortrieb (EPB)	1,7	1,4	1,6	Tiefenlage zu prüfen
	Quellpotential Abrasivität (äquivalenter Quarzanteil)	gering	gering	kein	gering
zusätzliche Kriterien	Setzungsempfindlichkeit Infrastruktur ober Tage	hoch	hoch	hoch	hoch
	Verklebung - Thewes	mittlere	mittel-hoch	gering	mittlere
	Verklebung - Hollmann	schwach	mittel	keine	schwach
	Verschleiß - Slurry	Moderat	Hoch	Moderat	Moderat
	Verschleiß - EPB	Moderat	Moderat	Niedrig	Moderat
	Vortriebsleistung - Slurry (Durchschnitt) - m / AT	4	5	9	9
	Vortriebsleistung - EPB (Durchschnitt) - m / AT	4	5	8	9
verfahrensbezogene Einteilung der VA (lfd. Nr.)		1	2	3	4
berücksichtigen	Slurry-Schild	67%	63%	84%	70%
berücksichtigen	Erddruck-Schild	74%	74%	79%	62%
nichtberücksichtigen	Variable-Density-Schild				
nichtberücksichtigen	Hybrid-/ Multimode				
	Slurry-Schild	2. Rang	2. Rang	1. Rang	1. Rang
	Erddruck-Schild	1. Rang	1. Rang	2. Rang	2. Rang
	Variable-Density-Schild				
	Hybrid-/ Multimode				
	<b>1. Rang</b>	Erddruck-Schild 74%	Erddruck-Schild 74%	Slurry-Schild 84%	Slurry-Schild 70%
	<b>2. Rang</b>	Slurry-Schild 67%	Slurry-Schild 63%	Erddruck-Schild 79%	Erddruck-Schild 62%
mögliche Baugrundzusammensetzung (max. Kornverteilung): Einsatzbereich Slurry-Schild		Slurry - B	Slurry - B	Slurry - B	Slurry - B
mögliche Baugrundzusammensetzung (max. Kornverteilung): Einsatzbereich EPB-Schild		EPB - A	EPB - A	EPB - A	EPB - A

Tabelle 8

Variante 3i - Auswahl des Vortriebsverfahrens

Zusammenfassung Auswahl des Vortriebsverfahrens – Trasse 3i																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
	V3-1	V3-2	V3-3	V3-4	V3-5	V3-6	V3-7	V3-8	V3-9	V3-10	V3-11	V3-12	V3-13	V3-14	V3-15	V3-16	V3-17	
	Station	Station	Station	Station	Station	Station	Station	Station	Station	Station	Station	Station	Station	Station	Station	Station	Station	
Verteilung Homogen-bereiche pro Abschnitt	Stärke (t/m)	0m	100m	250m	500m	900m	1.025m	1.100m	1.200m	1.250m	1.400m	1.600m	1.750m	1.800m	1.900m	2.050m	2.100m	2.400m
	Länge Vortriebsabschnitt	100m	150m	250m	150m	250m	75m	100m	100m	150m	150m	150m	150m	100m	150m	50m	300m	
	1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	2	0%	0%	46%	11%	39%	23%	27%	27%	43%	0%	8%	14%	0%	46%	0%	0%	0%
	3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	4	30%	36%	0%	17%	0%	41%	30%	27%	24%	14%	0%	20%	57%	4%	0%	27%	60%
	4b	61%	43%	46%	72%	89%	20%	50%	46%	32%	70%	41%	66%	30%	50%	100%	46%	40%
	4c	9%	20%	8%	0%	11%	0%	0%	0%	0%	16%	51%	0%	14%	0%	0%	0%	0%
	4d	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	4e	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
DAW-Kriterien	mittlere Feinhornanteile (< 0,06 mm) im VA	23,84	61,8	74,9015152	74,9015152	26,575	74,9015152	74,9015152	61,8	74,9015152	23,84	74,9015152	26,575	74,9015152	74,9015152	74,9015152	26,575	
	Durchlässigkeit max.	1,00E-07	1,00E-07	1,00E-07	1,00E-07	1,00E-09	1,00E-07	1,00E-07	1,00E-06	1,00E-07	1,00E-01	1,00E-07	1,00E-09	1,00E-07	1,00E-07	1,00E-07	1,00E-09	
	Konstanz	1,33	2,44	2,44	2,44	2,79	1,97	2,15	2,60	1,33	1,70	1,71	1,33	2,39	1,16	1,16	1,33	
	Lageungsichte	dicht	dicht	dicht	dicht	dicht	dicht	dicht	dicht	dicht	dicht	dicht	dicht	dicht	dicht	dicht	dicht	dicht
	Voraus. Stützdruck Regelvorrieb (Slurry)	1,6	2,3	2,5	2,4	1,1	1,5	1,3	0,9	0,9	1	0,7	1,3	1,4	1,5	1,1	1,1	0,8
	Voraus. Stützdruck Regelvorrieb (EPB)	1,8	2,4	2,7	2,6	1,3	Tiefenlage	Tiefenlage	1,1	1,1	1,2	Tiefenlage	1,5	1,6	1,7	1,3	1,4	Tiefenlage
	Quellpotential	gering	gering	gering	gering	gering	kein	kein	kein	kein	gering	gering	gering	kein	kein	gering	kein	kein
	Achsenverformungsverhalten	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
	Satzungsempfindlichkeit	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering
	zusätzliche Kriterien	Verklebung - Thewes	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering
Verklebung - Hollmann		gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	
Verschleiß - Slurry		Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	
Verschleiß - EPB		Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	Moderat	
Verschleiß - m / AT		Niedrig	Niedrig	Niedrig	Niedrig	Niedrig	Niedrig	Niedrig	Niedrig	Niedrig	Niedrig	Niedrig	Niedrig	Niedrig	Niedrig	Niedrig	Niedrig	
Verschleiß - EPB (Durchschnitt) - m / AT		8	8	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Verschleiß - EPB (Durchschnitt) - m / AT		4	5	7	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Vortriebsleistung - Slurry (Durchschnitt) - m / AT		3	5	7	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Vortriebsleistung - EPB (Durchschnitt) - m / AT		4	5	7	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
verfahrensbezogene Einteilung der VA (tfd. Nr.)		Slurry-Schild	67%	75%	74%	65%	84%	69%	65%	72%	65%	70%	65%	86%	69%	60%	69%	79%
	Erdreich-Schild	74%	72%	83%	73%	74%	63%	77%	85%	74%	62%	74%	78%	77%	74%	78%	68%	
	Variable-Density-Schild																	
	Hybrid / Multimode																	
	1. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	1. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	
	2. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	2. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	2. Rang
	Erdreich-Schild	Slurry-Schild	Erdreich-Schild	Erdreich-Schild	Erdreich-Schild	Slurry-Schild	Slurry-Schild	Erdreich-Schild	Erdreich-Schild	Erdreich-Schild	Slurry-Schild	Slurry-Schild	Erdreich-Schild	Slurry-Schild	Erdreich-Schild	Erdreich-Schild	Slurry-Schild	Slurry-Schild
	Hybrid / Multimode	Slurry-Schild	Slurry-Schild	Slurry-Schild	Slurry-Schild	Slurry-Schild	Slurry-Schild	Slurry-Schild	Slurry-Schild	Slurry-Schild	Slurry-Schild	Slurry-Schild	Slurry-Schild	Slurry-Schild	Slurry-Schild	Slurry-Schild	Slurry-Schild	Slurry-Schild
	1. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	1. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang
	2. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	2. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	1. Rang	2. Rang	2. Rang
mögliche Baugrundzusammensetzung (max. Konzentration: Einsatzbereich Slurry-Schild / Konzentration: Einsatzbereich EPB-Schild)	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	
	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	
	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	
	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	
	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	
	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	
	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	
	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	
	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	Slurry-B	
	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	EPB-A	

## 9 ZUSAMMENFASSUNG

Bei Variante 1a wurde die Bauweise bereits im Vorfeld zu dieser Studie als offene Bauweise festgelegt. Daher erübrigt sich eine weitere Differenzierung des Bauverfahrens bei dieser Variante (es wird auf Kapitel 5.1 verwiesen).

Bei den beiden anderen Trassierungs-Varianten 1d und 3i, bei denen Teilstrecken in geschlossener Bauweise aufgefahen werden sollen, erfolgt die Maschinenauswahl auf Basis der DAUB-Empfehlung zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen [N1]. Damit der Tunnelvortrieb – vor dem Hintergrund der oben beschriebenen projektspezifischen Randbedingungen – auch zukünftig erfolgreich durchgeführt werden kann, ist die Untersuchung und die Auswahl einer geeigneten Vortriebsmaschine frühzeitig sinnvoll.

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand werden die Tunnel der beiden Varianten (1d und 3i) in den Bodenschichten 4a, 4b und 4c aufgefahen. Damit zeichnet sich der Baugrund durch Tertiäre Sande sowie Schluffe, Tone und Tertiären Fels aus. Es wird durch die vorgesehene Trassierung der Tunnel-Varianten Abschnitte geben, in denen die volle Ortsbrust in nur einer Schicht liegt. In anderen Abschnitten wird es jedoch auch gemischte Ortsbrustverhältnisse geben.

Grundsätzlich ist ein Slurry-Schild eher für Vortriebe in gemischtkörnigen Böden geeignet, während der Erddruckschild in schluffigen Böden sein Haupteinsatzgebiet hat.

Bei Betrachtung des Baugrunds können theoretisch sowohl eine EPB- als auch eine Slurry-TBM verwendet werden. Im Bereich der Tunneltrasse werden die Kornfraktionen fein bis grob abgedeckt, da überwiegend Sand und Schluff zu finden sind.

Im Bereich der Schluffe (4b) ist mit einem höheren Verklebungspotenzial zu rechnen, welches sich bei dem Einsatz einer Slurry-TBM auf die Vortriebsgeschwindigkeit auswirken kann, da die Suspension getauscht und gegebenenfalls Drucklufteinstiege zur Schneidradreinigung eingeplant werden müssen. Die EPB-TBM könnte mit Zugabe von Additiven gegen das Verklebungspotential anarbeiten. Hier liegen die Vorteile bei dem Einsatz einer EPB-TBM. Hier wären allerdings die Drucklufteinstiege sowohl logistisch aufwendiger als auch zeitaufwendiger.

Im Hinblick auf die Aspekte Verschleiß und Werkzeugwechsel empfiehlt sich eine Slurry-TBM aufgrund des geringeren Verschleißes und des einfacheren Werkzeugwechsel unter Druckluft.

Mit Blick auf die Setzungsempfindlichkeit können sowohl EPB- als auch Slurry-TBM im Projektgebiet eingesetzt werden. Es wurden noch keine Setzungsberechnungen durchgeführt.

Grundsätzlich unterscheidet sich die Regelgenauigkeit des Stützdrucks prinzipiell bei EPB- und Slurry-Schild, da eine EPB-TBM kein fein regelbares Druckluftpolster hat. Weiterhin wird dort jedoch festgestellt, dass die EPB-TBM durch Konditionierung mit annähernd der gleichen Regelgenauigkeit wie ein

Slurry-Schild arbeiten kann und sowohl in bindigen als auch in sandigen Böden Anforderungen an einen setzungsarmen Vortrieb erfüllt.

Zur Beherrschung der geringen Trassenradien und der daraus resultierenden Korrekturradien ist ein Schildschwanzgelenk in der Konzeptionierung der Maschine zu berücksichtigen. Dies ist bei allen im Rahmen dieser Voruntersuchung behandelten Schildmaschinen möglich.

Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung einer Hybridlösung. Wie in Kapitel 5.2.2.3 beschrieben, zeichnet sich diese Methode durch die Umbaumöglichkeit von einer EPB- zu einer Slurry-TBM und umgekehrt aus und ist somit prädestiniert für Trassen mit variabler Geologie. Durch diese Umbaumöglichkeit beinhaltet die Hybrid-Methode sowohl die Vorteile als auch die Nachteile einer EPB- und Slurry-TBM. In der Theorie würde sich daher die Verwendung einer Multi-Mode TBM anbieten, da diese sowohl mit den Speise- und Förderleitungen für einen Slurry-Vortrieb, als auch mit der für einen EPB-Vortrieb notwendigen Förderschnecke ausgestattet ist. Diese Vorgehensweise wird im vorliegenden Fall vermutlich aber aufgrund der relative kurzen Tunnellängen, einem zusätzlichen logistischen Aufwand, Platzbedarf und Abtransport wirtschaftlich nicht darstellbar sein. Zudem ist für die Umstellung von einem Vortriebsmodus in den anderen ein längerer Stillstand der Vortriebsanlage erforderlich.

Die Alternativmöglichkeit der Variable Density TBM ermöglicht zwar einen kurzfristigen Wechsel zwischen Flüssigkeitsstützung und Erddruckstützung, benötigt aber sowohl eine Konditionierung des Bodens als auch eine Separation des Aushubs und verursacht dadurch einen erheblich höheren Aufwand mit Blick auf Konditionierung, Logistik und Platzbedarf und sollte im Projekt nicht weiterverfolgt werden.

Tabelle 9 Übersicht EPB - Slurry

	EPB	Slurry
<b>Baugrund</b>	✓	○
<b>Bodenbehandlung</b>	✓	✓
<b>Setzungsempfindlichkeit / Regelgenauigkeit</b>	○	✓
<b>Verschleiß</b>	○	○
<b>Werkzeugwechsel</b>	○	○
<b>Parallelität der weiteren Arbeiten</b>	○	○

Das vorliegende Tunnelvorhaben der Variante 1d ist durch einen kurzen Abschnitt in geschlossener Bauweise gekennzeichnet. In der Aufstellung der Wertungskriterien ist zu sehen, dass sich kein Maschinentyp deutlich hervorhebt – es gibt zum jetzigen Zeitpunkt und auf Basis der betrachteten Kriterien also keinen favorisierten Maschinentyp.

Der Einsatz eines EPB-Schilds im Frankfurter Untergrund für die Verlängerung der Stadtbahnlinie U5 wurde sicher durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen. Da es hier keine eindeutige Empfehlung gibt, aber bereits positive Erfahrungen mit einer EPB-TBM im Frankfurter Raum gemacht wurden, empfiehlt sich die Verwendung einer reinen EPB-TBM für den Tunnel der Trassenvariante 3i.

CDM Smith SE  
2024-05-29

i.V. 

Dr.-Ing. Heiko Huber

erstellt:

i. A. 

Dipl. -Ing. Ralitsa Angelov

i. A. 

Dipl.-Ing. Nils Thöle