

1 Einleitung und Übersicht

Der geologisch-geotechnische Planungsprozess für Tunnel dient zur Ableitung der geologischen, hydrogeologischen und geotechnischen Modelle für einen Tunnel in den verschiedenen Projektphasen. Wesentlich für den Erfolg dieses Planungsprozesses ist es, dass dieser das Tunnelprojekt von seiner Entstehung bis zur Fertigstellung begleitet.

Am Beispiel tiefliegender Tunnel in metamorphen Festgesteinen wird im vorliegenden Beitrag der geologisch-geotechnische Planungsprozess aufgezeigt. Dabei umfasst der Begriff Geologie auch den Fachbereich Hydrogeologie.

Da die Tiefenschärfe der geologisch-geotechnischen Planung wesentlich von der jeweiligen Projektphase abhängt, werden deren Ziele einleitend aufgezeigt.

Der Beitrag gibt eine Übersicht über internationale Leitfäden zur geologisch-geotechnischen Planung und zeigt ein daraus abgeleitetes generelles Ablaufschema auf. Auf Besonderheiten der einzelnen Leitfäden wird hingewiesen und ein Vergleich derselben vorgenommen.

Die Bedeutung der geologisch-geotechnischen Planung ist bei der Untersuchung der Machbarkeit eines Tunnelprojektes und bei der Trassenwahl, somit in einer sehr frühen Projektphase, sehr groß. Sowohl die Machbarkeit als auch die Trassenfestlegung hängen eng mit den geologisch-geotechnischen Baugrundverhältnissen zusammen. Die erforderlichen geologischen und geotechnischen Parameter für die frühen Projektphasen werden mit Schwerpunkt auf tiefliegende Festgesteinstunnel im Beitrag aufgezeigt.

Grundlegend ist die geologisch-geotechnische Planung auch für die Wahl der Vortriebsmethode. Diesbezüglich wird ein Leitfaden vorgestellt, dessen Ziel es ist, bereits in einer frühen Phase des Planungsprozesses die Entscheidung für die Vortriebsmethode des gesamten Tunnels oder bei langen Tunneln von einzelnen Bauabschnitten zu treffen. Dies beinhaltet auch die Entscheidung, ob nur eine Vortriebsart (entweder konventionell oder maschinell) oder beide im weiteren detaillierten geologisch-geotechnischen Planungsprozess verfolgt werden müssen.

Die wesentlichen Schritte, die bei der geologisch-geotechnischen Planung von tiefliegenden Tun-

nelbauwerken für deren Genehmigungen, Ausschreibungen und Baubegleitung erforderlich sind, sowie die dabei heranzuziehenden geologischen und geotechnischen Parameter werden im letzten Teil des Beitrags aufgezeigt und erläutert.

Obwohl der Beitrag seinen Schwerpunkt auf tiefliegende Tunnel im metamorphen Festgestein legt, können die behandelten Prozesse auch für seicht liegende Tunnel wertvoll sein.

2 Projektphasen der Tunnelplanung und deren spezifische Ziele

Die geologisch-geotechnische Planung von Tunnelbauwerken ist ein fortlaufender Planungsprozess, der eng an die Erfordernisse und Fragestellungen der jeweiligen Projektphase geknüpft ist. Daher werden die Projektphasen und deren, für die geologisch-geotechnische Planung relevanten, Anforderungen zusammenfassend dargestellt:

- Machbarkeitsstudie,
- Vorprojekt,
- Einreichprojekt,
- Ausschreibungsprojekt,
- Ausführungsprojekt,
- Baubegleitung.

In der Projektphase Machbarkeitsstudie ist das geologisch-geotechnische Modell von großer Bedeutung: Der geologische Aufbau des Baugrunds und dessen geotechnisches Verhalten müssen soweit bekannt sein, dass Faktoren, welche die Machbarkeit des Projekts aus geologischer und geotechnischer Sicht infrage stellen können, erkennbar und beurteilbar sind. Dem geologischen Modell, welches den regionalen Gebirgsbau zeigt, kommt in dieser Phase eine besondere Rolle zu. Die Verteilung und Lage der lithologischen Einheiten, die Größe und der Tiefgang von tiefliegenden Hangbewegungen sowie die Lage, der Verlauf und Tiefgang von Störungen müssen aus dem geologischen Modell bereits in dieser frühen Phase hervorgehen. Insbesondere bei den lithologischen Einheiten sind verkarstungsfähige, quellfähige und veränderlich feste Gesteine hervorzuheben. Die räumliche Lage von Störungen im geologischen Modell ist darzustellen, da eine Machbarkeit des Projektes von diesen bestimmt werden kann. Bei tiefliegenden Tunneln erfordern diese Anforderungen bereits erste, mit einem nicht unbedeutlichen zeitlichen und finanziellen Aufwand

verbundene Erkundungen in Form von geologisch-geotechnischen Oberflächenkartierungen, geophysikalischen Untersuchungen sowie erste tiefe Erkundungsbohrungen.

Mit dem Vorprojekt muss das geologische und geotechnische Modell soweit verfeinert werden, dass eine Trassenwahl erfolgen und das technische Projekt geplant werden kann. Dieses hat neben einer Bewertung der technischen Kriterien auch die Benennung von betroffenen Schutzgütern zu beinhalten, um eine Schätzung der Projektkosten und des Projektzeitraums (Planung und Bau) erstmals durchführen zu können. Zusätzlich sind Kenntnislücken aufzuzeigen und auf Basis des geologisch-geotechnischen Modells ein vertieftes Erkundungsprogramm auszuarbeiten. In einzelnen Staaten, wie z. B. Italien, können für strategisch wichtige Projekte die Genehmigungen bereits mit dem Vorprojekt eingeholt werden, wobei die Einhaltung der festgelegten Auflagen dann im Zuge der Überprüfung des fortgeschriebenen Projektes durch die Behörde erfolgt.

Die Vertiefung des geologisch-geotechnischen Kenntnisstandes ist in der Projektphase Einreichplanung unerlässlich. Erst auf der Grundlage eines detaillierten geologisch-geotechnischen Modells können die Trassenfestlegung und die Genehmigungsplanung als Basis für die erfolgreiche Abwicklung der verschiedenen Genehmigungsverfahren erfolgen. Eine fachübergreifende Projektentwicklung ist besonders in dieser Phase erforderlich, damit die geologisch-geotechnische Planung zielgerecht Grundlagen für die Umweltplanung und technische Planung liefern kann.

Mit der Erstellung des Ausschreibungsprojekts hat die geologisch-geotechnische Planung einen Tiefgang zu erreichen, der es erlaubt, den Baugrund so realitätsnah wie möglich darzustellen, zu beschreiben und seine Eigenschaften zu quantifizieren. Dadurch soll das Baugrundrisiko möglichst klein gehalten werden.

Mit Auffahren der Tunnel sind die geologischen und geotechnischen Gegebenheiten vor Ort soweit zu erfassen, dass das geologisch-geotechnische Modell baubegleitend fortgeschrieben werden kann und damit einen Vergleich der Prognose mit der Ist-Situation ermöglichen. Insbesondere bei Errichtung eines vorausseilenden Erkundungsstollens ist die Aktualisierung des geologisch-geotechnischen Modells für die aufzufahrenden Haupttunnel zwingend.

3 Bestehende Regelwerke zur geomechanischen Planung

3.1 Überblick bestehender Richtlinien und Ableitung grundlegender Arbeitsschritte im geologisch-geotechnischen Arbeitsprozess

Die geologisch-geotechnische Charakterisierung des anstehenden Baugrunds und die Beurteilung der Wechselwirkung zum Tunnelhohlraum ist eine wesentliche Grundlage für die geomechanische Planung von tiefliegenden Tunneln.

Die geotechnische Bemessung ist zwar in vielen europäischen Ländern durch die nationale Normung bzw. seit einigen Jahren durch den Eurocode 7 und die zugehörigen nationalen Anwendungsdokumente geregelt. Über die geotechnische Planung von Tunneln sagen diese Normen aber in der Regel wenig aus.

Daher haben sich zur Systematisierung der erforderlichen Arbeitsschritte international verschiedene Regelwerke und Normen entwickelt. Diese sind von nationalen Normungsinstituten, Vereinen und Gesellschaften sowie Forschungseinrichtungen erarbeitet worden. Daneben gibt es Vorschriften einzelner Bauherren/Infrastrukturbetreiber.

Folgende Liste gibt einen Überblick (Auszug):

Österreich:

- ÖNORM B 2203-1, Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm, Teil 1: Zyklischer Vortrieb, 2001.
- ÖNORM B 2203-2, Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm, Teil 2: Maschineller Vortrieb, 2005.
- Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG), Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb, Gebirgscharakterisierung und Vorgangsweise zur nachvollziehbaren Festlegung von bautechnischen Maßnahmen während der Planung und Bauausführung, 2. Auflage, 2008.
- Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG), Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb, *in Bearbeitung*.
- Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik e. V. (ÖVBB), Richtlinie Schildvortrieb, 2009.
- Universität Innsbruck, Institut für Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement, Entwurfsrichtlinie – Kontinuierlicher Vortrieb von Eisenbahntunneln mit Tunnelvortriebsmaschinen, 2002.

- Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr (FSV), RVS 09.01.31, Projektierungsrichtlinie, Bautechnische und geotechnische Arbeiten, Kontinuierlicher Vortrieb von Straßentunneln, 2003.

Deutschland:

- Deutscher Ausschuss für Unterirdisches Bauen e. V. (DAUB), Empfehlungen des Deutschen Ausschusses für Unterirdisches Baues e. V. (DAUB) zu Planung und Bau von Tunnelbauwerken, Tunnel 4/2004, S. 73–79
- Deutscher Ausschuss für Unterirdisches Bauen e. V. (DAUB), Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen, 2010

Italien:

- National project for design and construction standards in underground works (promoted by AGI, ANIM, GEAM, IAEG, ITCOLD, SIG, SIGI), Guidelines for Design, Tendering and Construction of Underground Works, 1997, inserted in No. 51 of Gallerie e Grandi Opere Sotteranee.

Schweiz:

- SIA 197, Projektierung Tunnel – Grundlagen, 2004
- SIA 197/1, Projektierung Tunnel – Bahntunnel, 2004
- SIA 197/2, Projektierung Tunnel – Strassentunnel, 2004
- SIA 199, Erfassen des Gebirges im Untertagebau, 1998

Weitere:

- International Tunneling Association, Working Group No. 14, Preparation of the report „Guidelines for the selection of TBMs“, 1998 (ITA-Guideline)
- Geotechnical Baseline Reports for Construction, Suggested Guidelines, ASCE, 2007

Der Detaillierungsgrad hinsichtlich der einzelnen Arbeitsschritte für die geologisch-geotechnische Planung von Tunnelbauwerken unterscheidet sich in den aufgezählten Dokumenten deutlich.

Im Folgenden werden die grundlegenden Arbeitsschritte für die geologisch-geotechnische Planung, die in den benannten Normen und Richtlinien aufgeführt werden, kurz vorgestellt. Dabei wird zwischen Tunnelvortrieben mit zyklischem und kontinuierlichem Vortrieb unterschieden.

Die grundlegenden Arbeitsschritte für den **zyklischen** Vortrieb, die in den oben genannten Regelwerken beschrieben werden, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Geologische Charakterisierung des Gebirges (geologische und hydrogeologische Eigen-

schaften: tektonische Einheit, Trennflächengefüge, hydrogeologische Randbedingungen, Geomorphologie, Lithologie, Mineralogie und Petrographie (vgl. auch Abschn. 6).

- Charakterisierung des Gebirges (geologische Einheit, In-situ-Spannungszustand, mechanische Eigenschaften (Unterscheidung intaktes Gestein – Gebirge), Trennflächenbeschaffenheit, -gefüge und -orientierung, Gesteinsart und -zustand, Durchlässigkeit).
- Definition von geotechnischen Einheiten (Gebirgsarten) mit vergleichbaren Charakteristiken hinsichtlich der geotechnisch relevanten Eigenschaften für die Tunnelplanung und Zuordnung dieser Gebirgsarten zu den Tunnelabschnitten (Berücksichtigung von Störzonen separat). Zur Definition der Gebirgsarten gehört auch die Angabe von Werten/Bandbreiten für die charakteristischen Eigenschaften der Gebirgsarten, die aus vergleichbarer Erfahrung, Literatur, empirischen Verfahren, Versuchen oder numerischen Verfahren abgeleitet werden.
- Evaluierung des Gebirgsverhaltens infolge des Hohlraumausbruchs (Versagensmechanismen) im Querschnitt. In der Regel erfolgt dies mittels analytischen und numerischen Berechnungen (Spannungsanalyse mit Kontinuumsmodellen, Strukturanalyse mit Diskontinuumsmodellen, Blockanalysen) sowie der Erfahrung aus vergleichbaren Projekten. Bei der Beurteilung der Versagensmechanismen wird die Größe und Orientierung des Hohlraums berücksichtigt. Außerdem wird zwischen Kurz- und Langzeitverhalten des Gebirges unterschieden (z. B. im Hinblick auf zeitabhängige Verformungen). In den meisten Regelwerken wird für die Analyse der Versagensmechanismen die Anwendung statistischer und/oder probabilistischer Methoden empfohlen.
- In manchen Regelwerken folgt nach der Analyse der Versagensmechanismen die Zuordnung zu vordefinierten Versagensmechanismen (ÖGG-Richtlinien: „Gebirgsverhaltenstypen“, SIA-Normen: „Gefährdungsbilder“).
- Im Zuge der technischen Tunnelplanung erfolgt dann auf Grundlage der prognostizierten Versagensmechanismen die Wahl eines geeigneten Vortriebsverfahrens und der erforderlichen Bodenvergütungsmaßnahmen, der Entwässerung und der Sicherungsmaßnahmen für den Vortrieb.

Der Ablauf für die geomechanische Planung von **kontinuierlich** vorgetriebenen Tunneln ist in den Regelwerken prinzipiell identisch zur oben beschriebenen Vorgehensweise. Im Detail werden aber für die Ableitung der geotechnischen Einhei-

ten weitere Parameter angeführt (z. B. Hohlräume im Gebirge, Bohrbarkeit, Abrasivität, Klebrigkeit, Schwell- und Quellfähigkeit, veränderlich feste Gesteine). Diese sollen helfen, das Potenzial für Verflüssigung, Verklebung und Verschleiß zu evaluieren. Dabei werden nicht nur die Eigenschaften des Gebirges beim Abbau berücksichtigt, sondern in weiterer Folge auch während des Transports und bei der Deponierung oder Wiederverwendung des Ausbruchmaterials.

Für die Bestimmung der Versagensmechanismen während des Vortriebs wird außerdem der Ortsbruststabilität eine erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt.

3.2 Besonderheiten und Unterschiede bestehender Regelwerke

Die italienische Richtlinie SIG'97 liefert eine Übersicht über detaillierte italienische Bauherrenrichtlinien, wie z. B. RFI/ITALFERR (Eisenbahntunnel) oder ANAS/SPEA (Straßentunnel). Die Gebirgsarten nach Definition der ÖGG-Richtlinien sind hierbei vergleichbar mit den geomechanischen Gruppen der SIG'97 und die Gebirgsverhaltenstypen nach Definition der ÖGG-Richtlinien mit dem Ausbruchverhalten der SIG'97. Darüber hinaus sind die Anforderungen an die darzustellenden Informationen in einem geotechnisch/geomechanischen Tunnellängsprofil sehr ähnlich gestaltet. Die SPEA-Richtlinien in Italien sind im Vergleich zu den ITALFERR-Richtlinien noch umfangreicher und gehen verstärkt auf Risikokategorien ein, die bestimmten Tunnelabschnitten zugewiesen werden können. Ein ähnliches Konzept wird von den SIA-Richtlinien in der Schweiz mit den sog. Gefährdungsbildern verfolgt. In den USA werden vielfach Gebirgsklassen definiert, die Gebirgsarten und Versagensmechanismen kombinieren (s. [26]).

Natürlich gibt es im Detail Unterschiede in der Vorgehensweise für die geomechanische Planung, die in den einzelnen Richtlinien beschrieben ist. Einige davon sollen hier kurz erwähnt werden.

Für die Bestimmung des Gebirgsverhaltens infolge Hohlraumausbruchs wird in der österreichischen ÖGG-Richtlinie vorwiegend der Tunnelquerschnitt betrachtet, weniger die Tunnelortsbust, wie dies z. B. in den italienischen oder schweizerischen Richtlinien explizit vorgeschrieben ist. Auch die Interaktion des Tunnels mit seiner Umgebung (z. B. Beeinflussung durch naheliegende Tunnelröhren oder Oberflächensetzungen) wird in den italienischen und schweizerischen Richtlinien bereits für die Einschätzung des Gebirgsverhaltens viel deutlicher berücksichtigt.

In Deutschland finden sich keine spezifischen Richtlinien zur geologisch-geotechnischen Cha-

rakterisierung von Tunnelbauwerken. In der Schweiz oder in Italien werden die möglichen Gefährdungsbilder für den Tunnelvortrieb etwas weiter gefasst als in Österreich. Während sich die österreichischen Richtlinien bei der Festlegung des Gebirgsverhaltens i. W. auf gebirgsmechanische Aspekte beschränken, werden in der Schweiz und Italien auch Parameter wie Gas (explosive Gase, giftige Gase), geogene Gefährdungen (z. B. Asbest), Temperatur, Radioaktivität und Seismizität explizit mit einbezogen.

4 Die Trassenwahl als ein Meilenstein im geologisch-geotechnischen Planungsprozess

Der geologisch-geotechnische Planungsprozess ist gerade in einer frühen Phase des Tunnelprojektes, in der Trassenvarianten verglichen und schlussendlich die Trasse festgelegt wird, gefordert, da die beste Methode zur Minimierung von geologisch-geotechnischen Gefahren und Nutzung von Chancen eine fachübergreifende Trassenwahl bietet. Geologische und geotechnische Gefahren lassen sich durch eine sorgfältige Wahl der Trasse reduzieren bzw. sogar gänzlich vermeiden. Diesbezüglich ist eine enge Zusammenarbeit zwischen geologisch-geotechnischer Planung, Streckenplanung und Umweltplanung erforderlich.

Bereits in einer frühen Phase muss das geologisch-geotechnische Modell das Erkennen und das Bewerten der geologisch-geotechnischen Gefahren, sowie einen Vergleich der geologisch-geotechnischen Gegebenheiten verschiedener Trassenvarianten zulassen.

Grundsätzlich kann die Trassenwahl in drei Schritten erfolgen, wobei unterschiedliche Schwerpunkte in der geologisch-geotechnischen Planung gesetzt werden:

Schritt 1: Abgrenzung Arbeitskorridor

Dieser umfasst einen breiten „Arbeitsstreifen“, der sich aus den Anforderungen der Streckenplanung und aus der Analyse des regionalgeologischen Modells ergibt. Das regionalgeologische Modell ermöglicht es frühzeitig, Zonen mit geologischen Problemen zu erkennen und zu beurteilen. Ziel ist es, diesen Problemzonen möglichst auszuweichen. Als Beispiel können Großstörungen, Karst und quellfähige Lithologien genannt werden.

Schritt 2: Variantenstudie inklusive Auswahl Arbeitstrasse

Innerhalb des Arbeitskorridors werden mehrere Trassenvarianten untersucht. Ein Vergleich der Trassen u. a. aus geologisch-geotechnischer Sicht führt zur Auswahl der Arbeitstrasse. Für tieflie-

gende Tunnel im metamorphen Festgestein werden dabei folgende geologische und geotechnische/bautechnische Parameter als Auswahlkriterien herangezogen:

Geologische Parameter

- Störzonen: Beschreibung und Charakterisierung der Störungsgesteine, Mächtigkeit, Bündelung mehrerer Störungen, Orientierung zur Trasse und Ausdehnung der Verschneidung;
- quellfähige und auslaugungsgefährdete Gesteinsserien: Anhydrit/Gips oder quellfähige Tonminerale (Volumenzunahme), rezente Auslaugungsvorgänge von evaporitischen oder karbonatischen Gesteinen mit möglichen Setzungen an der Oberfläche;
- Lösungserscheinungen: Ausbildung als Kluftkarst und Karsthohlräume, Auflösung von karbonatischen Gesteinen, Entfestigung und Kohäsionsverlust, aktueller Karstwasserspiegel und regionaler Ursprung der Verkarstung, aktive Karstvorgänge;
- neotektonische Bewegungen: rezente tektonische Verformungen;
- hydrothermale Felszersetzung;
- schädliche Stoffe: Gas (Methan, Propan, Radon, Schwefelwasserstoff), Radioaktivität, asbesthaltige und lungengängige Fasern;
- Einfluss der Dränagewirkung des Tunnels unter Berücksichtigung der Wasserwegeigenschaften des Gebirges im Bauzustand und im Betriebszustand;
- Ausdehnung von Grundwasserabsenkungen insbesondere zur Beurteilung von möglichen Setzungen;
- Auswirkungen der dränierenden Wirkung des Tunnels auf Grund- und Bergwasser, somit auf Quellen, Brunnen, Gerinne, Seen und Feuchtbiootope;
- Wassereintritte insbesondere in Zonen mit Kluftsystemen, Auslaugungshorizonten oder Karstsystemen;
- Chemismus des Grundwassers: Bewertung der chemisch-physikalischen Zusammensetzung des Bergwassers zur Bestimmung des Grades der Betonaggressivität.

Geotechnische/bautechnische Parameter

- druckhaftes Gebirge: Bruchzonen, Verformungen, Auswirkung auf Achsabstand;
- Quellen: Schwelldruck bei Antreffen von Anhydrit, Quelldruck bei Vorhandensein von quellfähigen Tonmineralien;
- Bergschlag: Spannungsniveau, Sprödigkeit des Gebirges;
- Auswirkung Karst: auf Vortrieb, auf Ausbau;

- Auswirkung des im Gebirge zirkulierenden Bergwassers: auf Vortrieb, auf Ausbau;
- Auswirkung wasserdruckabhängiger Aspekte: auf Vortrieb, auf Ausbau;
- Auswirkung des Bergwasserchemismus: auf Ausbau, auf Betrieb;
- Einwirkung auf Bebauung: durch Setzungen, durch Erschütterungen.

Schritt 3: Trassenoptimierung

Optimierung der gewählten Arbeitstrasse aufgrund verschiedener technischer Anforderungen (z. B. Kurvenradien), aber auch aufgrund noch möglicher geologisch-geotechnischer Optimierungen, z. B. Reduzierung der Verschnittlängen bei zwingend zu querenden Störungen oder sensiblen geologischen Einheiten. Diese optimierte Arbeitstrasse wird in den Einreichoperaten dargestellt. Aus den Genehmigungsverfahren geht schlussendlich die festgelegte Trasse hervor, welche nun Grundlage für die weiteren Planungsschritte ist.

5 Geologisch-geotechnische Planung als Grundlage für die Wahl der Vortriebsmethode

5.1 Prozess zur Wahl der Vortriebsmethode

Neben der Trassenfestlegung ist die Wahl der Vortriebsmethode für den weiteren Planungsprozess ein wesentlicher Schritt. Diesbezüglich sei auch auf Kapitel IV „Auswahl der Tunnelvortriebsmethode – Dynamisches Entscheidungsmodell“ von *Matthias Flora* und *Peter Teuscher* in diesem Beton-Kalender verwiesen.

Eine Beurteilung ausgewählter geologisch-geotechnischer Parameter kann bereits zu einem frühen Zeitpunkt als Entscheidungshilfe für die Wahl der Vortriebsmethode vollzogen werden. Der Vorteil der frühzeitigen Betrachtung liegt darin, dass die folgende detaillierte geologisch-geotechnische Planung gezielt auf die gewählte Vortriebsmethode hin ausgearbeitet werden kann. Die geologisch-geotechnische Planung für einen konventionellen Vortrieb unterscheidet sich in einigen Punkten von jener für einen maschinellen Vortrieb. Mit der frühen Entscheidung kann vermieden werden, dass für den gesamten Tunnel oder, wie im Falle von tiefliegenden Tunneln für mehrere und zum Teil auch lange Abschnitte die arbeits- und zeitaufwendigen geologisch-geotechnischen Planungen für beide Vortriebsmethoden ausgearbeitet werden müssen.

Die frühzeitige Entscheidung der Vortriebsmethode erfolgt auf Basis geologisch-geotechnischer Beurteilungen unter Einbeziehung der technischen Tunnelplanung (s. Bild 1). Für jene Abschnitte, für die eine frühe Entscheidung nicht

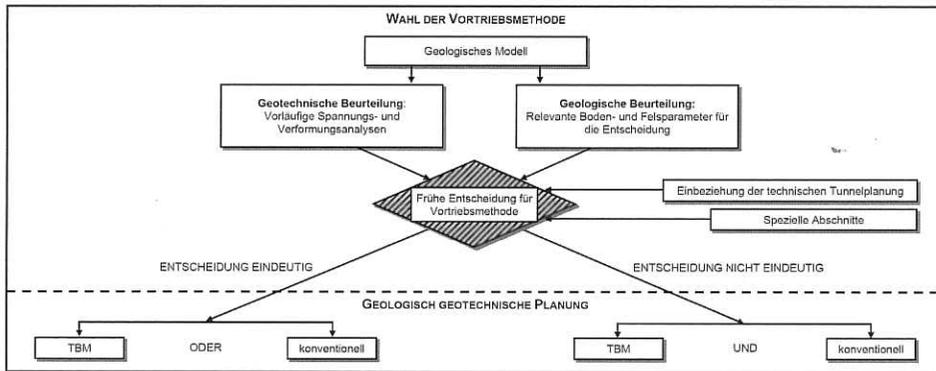


Bild 1. Prozess zur frühen Wahl der Vortriebsmethode innerhalb des geologisch-geotechnischen Planungsprozesses. Bei eindeutiger Entscheidung der Vortriebsmethode erfolgt die weitere geologisch-geotechnische Planung entweder bezogen auf einen TBM-Vortrieb oder einen konventionellen Vortrieb. Kann keine frühzeitige eindeutige Entscheidung getroffen werden, ist die geologisch-geotechnische Planung sowohl für den TBM-Vortrieb als auch konventionellen Vortrieb auszuarbeiten.

eindeutig möglich ist, muss die Ausarbeitung der detaillierten geologisch-geotechnischen Projekte sowohl für den maschinellen als auch den konventionellen Vortrieb in Betracht gezogen werden. Eine Auswahl der Vortriebsmethode erfolgt schlussendlich auf Basis der ausgearbeiteten geologisch-geotechnischen sowie auch technischen Projekte.

5.2 Annahmen für die Entscheidung der Vortriebsmethode

Mittels Grenzwerten erfolgt nach durchgeführter geologisch-geotechnischer Bewertung die Entscheidung, ob nur eine Vortriebsart (entweder konventionell oder maschinell) oder beide im weiteren detaillierten geotechnischen Planungsprozess verfolgt werden müssen. Diesbezüglich empfiehlt es sich, diesen wesentlichen Schritt unter Berücksichtigung und Einbeziehung der technischen Tunnelplanung und von Expertenmeinungen durchzuführen.

Dahingehend sind bei der Entscheidungsfindung in dieser frühen Phase folgende Annahmen zu treffen:

- Fokussierung auf eine Bewertung der Anwendbarkeit eines TBM-Vortriebs aus geotechnischer Sicht unter Berücksichtigung geologischer und geotechnischer Einflussfaktoren, wobei die Wahl des Maschinentyps an dieser Stelle nicht relevant ist und es sich um eine rein qualitative Beurteilung der Anwendbarkeit der TBM handelt.
- Sowohl offene Grippermaschinen als auch Schildmaschinen (Einfachschild, Doppelschild) werden berücksichtigt.

- Nicht berücksichtigt sind „Zusatzmaßnahmen“ zur Bewältigung von schwierigen geologischen Passagen, wie z. B.:

- Vorbohrung und Injizieren von der Ortsbrust aus,
- Installation von vorlaufenden Dränagemaßnahmen,
- Herstellung von Injektionspfählen vor der Ortsbrust,
- lokales Auffüllen/Ausinjizieren von Hohlräumen (mit Mörtel oder Schaum).

- Nicht berücksichtigt sind „Sondermaßnahmen“ zur Bewältigung außergewöhnlicher Ereignisse und Vortriebsituationen, wie z. B.:

- Umgehungstunnel und -kavernen, um den Bohrkopf der TBM freizulegen,
- umfangreiche Auffüll- und Injektionsarbeiten,
- Dränagemaßnahmen und/oder Baugrundvereinsmaßnahmen, die von bergmännisch vorgetriebenen Nischen oder Aufweitungen aus vorgenommen werden,
- Demontage der TBM und/oder Modifikationen an der TBM und/oder Umlegung der TBM.

- Wirtschaftliche Aspekte werden im Rahmen des geologisch-geotechnischen Entscheidungsprozesses nicht berücksichtigt, sondern es werden ausschließlich technische Ausschlusskriterien beurteilt.

- Vortriebsgeschwindigkeit, Bauzeit, Logistik, etc. werden im geologisch-geotechnischen Entscheidungsprozess nicht betrachtet.

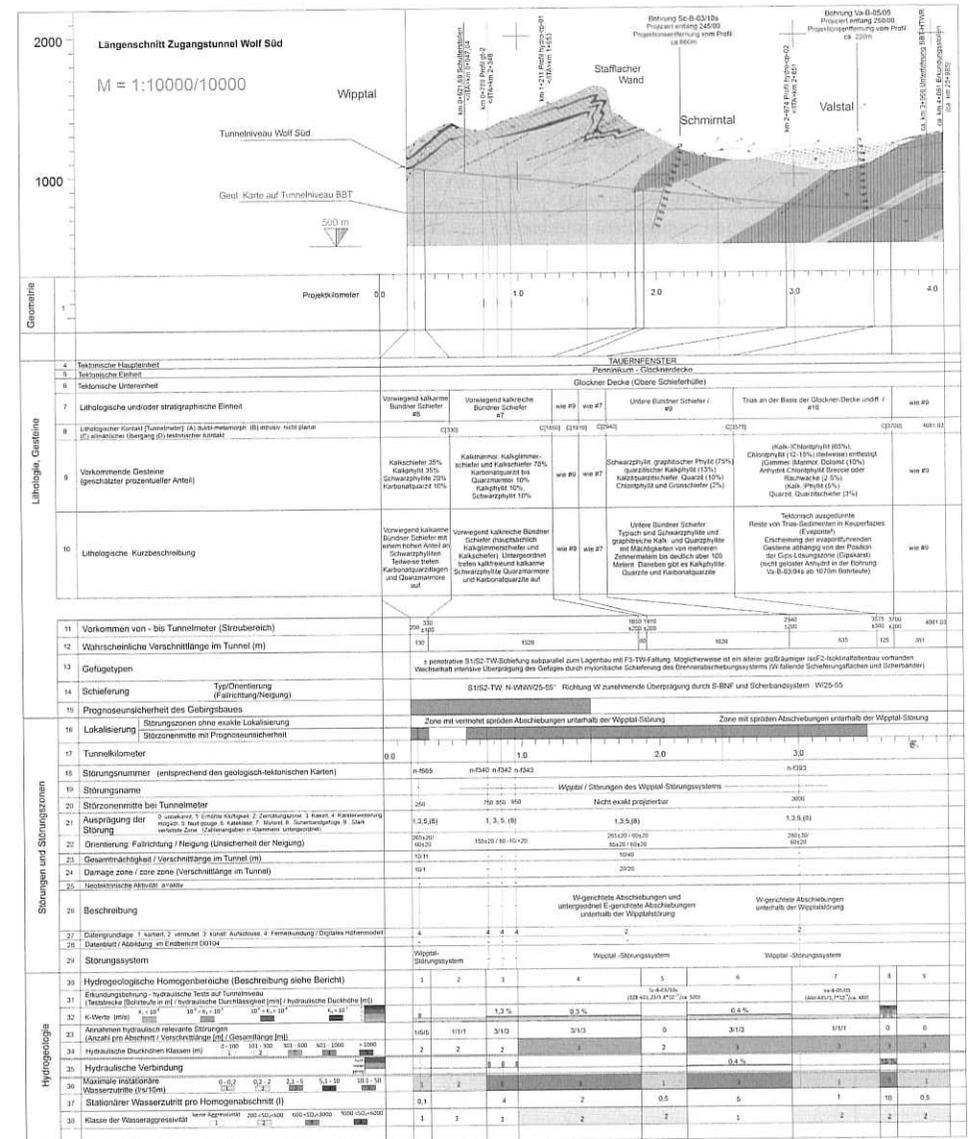


Bild 2. Beispiel eines geologischen Längsschnittes (Projekt Brenner Basistunnel, Zugangstunnel Wolf) mit bewerteten geologischen und hydrogeologischen Parametern. Der geologische Längsschnitt muss bereits frühzeitig im geologisch-geotechnischen Planungsprozess erstellt werden. Im Zuge des Planungsprozesses ist durch den zunehmenden Kenntniserwerb eine Detaillierung und Aktualisierung desselben notwendig.

5.3 Geologisches Modell als Grundlage für die Wahl der Vortriebsmethode

Im geologischen Modell (als Darstellungsform empfiehlt sich unter anderem ein geologischer Längsschnitt) müssen für die Entscheidung der Vortriebswahl folgende Parameter dargestellt und bewertet werden:

- Geometrie: Kilometrierung des Projekts.
- Lithologie: tektonische Haupteinheit und Untereinheiten, lithologische und/oder stratigraphische Einheit, Typ und Position des lithologisch-stratigraphischen Kontakts, vorkommende Gesteine (in %), lithologische Kurzbeschreibung, wahrscheinliche Verschnittlänge der lithologischen Einheit im Tunnel, Gefügetypen, Schieferung (Typ/Orientierung), Prognoseunsicherheit des Gebirgsbaus.

- Störungen: Darstellung der Verschnittposition bekannter Störungen sowie Angabe von Störungen, deren Vorkommen zwar generell bekannt, deren genaue Position jedoch nur ungenau bestimmt werden kann (Angabe von Zonen, in denen diese häufiger auftreten). Von prognostizierten Störungen sind die Achse der Störung (zentral) mit Prognoseunsicherheit, Störungsbezeichnung, Störungsmitte bei Tunnelmeter, kurze Charakterisierung der Störung (Gefüge, Störngesteine, Karst), Orientierung (Fallrichtung/Neigung), Gesamtmächtigkeit und Verschnittlänge im Tunnel, Verschnittlänge von Kernzone und zerlegter Zone im Tunnel sowie die neotektonische Aktivität anzugeben.

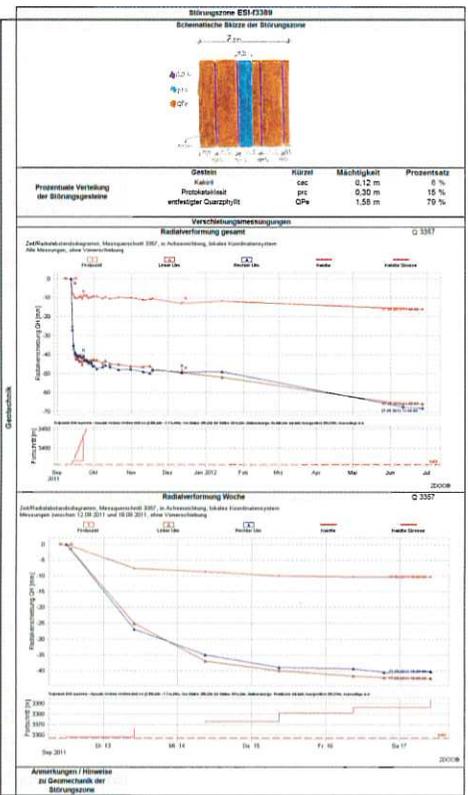
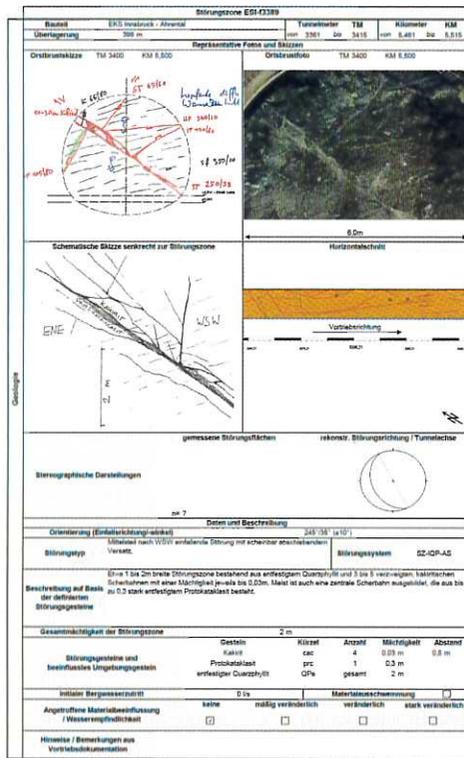


Bild 3. Beispiel eines Datenblattes für Störzonen (Projekt Brenner Basistunnel, spitzwinklig zum Erkundungsstollen streichende Störzone im Innsbrucker Quarzphyllit mit abschiebendem Charakter). Das Datenblatt ist im Zuge des geologisch-geotechnischen Planungsprozesses und in Abhängigkeit vom Tiefgang der Erkundungen bzw. des Kenntnisergebnisses sukzessive fortzuschreiben bzw. zu aktualisieren. Bei Vorliegen von Daten aus Erkundungsstollen sind auch Messwerte der gemessenen Verformungen und Dokumentationen an der Ortsbrust mitaufzunehmen.

- Hydrogeologie: hydrogeologische Homogenbereiche, aus Erkundungsbohrungen: Werte hydraulischer Tests auf Tunnelniveau (K, T und p), abgeleitete hydraulische Durchlässigkeit (K-Werte) auf Tunnelniveau, Anzahl/ Verschnittlänge/Mächtigkeit von Störungen mit hydraulischer Relevanz für jeden Homogenbereich, hydraulische Druckhöhe, hydraulische Verbindung mit Oberfläche, maximale instationäre Wasserzutritte, stationäre Wasserzutritte je Homogenbereich, Wasseraggressivität.

Ein Beispiel für die Darstellung der geologischen Parameter in einem geologischen Längsschnitt ist in Bild 2 zu finden.

Zusätzlich zum geologischen Längsschnitt empfiehlt es sich im Zuge des geologisch-geotechnischen Planungsprozesses frühzeitig für die bauwerksrelevanten Störungen technische Datenblätter von Störzonen anzulegen und auszufüllen (s. Bild 3).

5.4 Geologische Beurteilung mittels Ausschluss- und Entscheidungskriterien

5.4.1 Geologische Ausschlusskriterien

Aus geologischer Sicht werden die Störzonen, die Grund- und Bergwasserzutritte sowie das Quellpotenzial als technische Ausschlusskriterien eingestuft.

Störzonen

- Orientierung zur Tunnelachse,
- Mächtigkeit der Störzone,
- Länge,
- Auftretenswahrscheinlichkeit,
- Charakteristik.

Werte für die aufgezählten Parameter können dem geologischen Längsschnitt sowie den technischen Formblättern für die Charakterisierung der Störzonen entnommen werden, müssen also in einer frühen Phase bereits erfasst sein.

Grund-/Bergwasserzutritt

Initialer Zufluss: Werte für diesen Parameter können dem geologischen Längsschnitt entnommen werden. Sie müssen in Zusammenhang mit der Gebirgsart (Boden oder Fels) gesehen werden, um das Potenzial für fließendes Gebirge einzuschätzen. Falls fließendes Gebirge identifiziert wird, ist unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen ein maschineller Tunnelvortrieb auszuschließen. Falls kein fließendes Gebirge angetroffen wird (standfester Boden/Fels), ist der maximal zulässige Zustrom durch die Aufnahme- und Förderkapazität des Dränagesystems (Freispiegelabfluss) bzw. die Pumpenkapazität (bei fallendem Vortrieb) bestimmt.

Quellpotenzial (Tonminerale, Anhydrit)

Werte für diese Parameter können dem geologischen Längsschnitt und den Ergebnissen der Laborversuche entnommen werden.

Anhand von definierten Entscheidungskriterien wird die Umsetzbarkeit der Vortriebsmethodik aus geologischer Sicht beurteilt. Als Beispiel wird kurz auf das geologische Entscheidungskriterium für Störzonen eingegangen.

5.4.2 Geologisches Entscheidungskriterium für Störzonen

In Störzonen können die Tunnelverformungen so groß sein, dass ein TBM-Vortrieb unter Berücksichtigung der beschriebenen Annahmen nicht machbar ist.

Diesbezüglich sind sowohl die Mächtigkeit der Störzone als auch die Streichrichtung derselben die entscheidenden Parameter (Bild 4). Während Störzonen mit Mächtigkeiten von bis zu 5 m bei senkrecht auf die Tunnelachse verlaufendem Streichen keine oder nur geringe Probleme beim Vortrieb schaffen, so kann dieselbe Störung bei spitzwinkligem bis hin zu parallel zum Tunnel verlaufendem Streichen erfahrungsgemäß auch zum Stillstand einer TBM führen. Abhängig von den lithologischen Gegebenheiten und abhängig von den Überlagerungshöhen können diese Zusammenhänge in Diagrammen dargestellt werden, aus denen dann bei bekannten Eingabewerten (Winkel zwischen Störung und Tunnelachse sowie Mächtigkeit der Störung) eine Bewertung abgeleitet werden kann. Bei steigender Überlagerung in einer Störzone nimmt jener Bereich zu, für den gemäß Diagramm große Probleme für einen TBM-Vortrieb erwartet werden bzw. für den die Ausführbarkeit des TBM-Vortriebs infrage gestellt wird.

5.5 Geomechanische Beurteilung mittels Ausschluss- und Entscheidungskriterien

5.5.1 Geomechanische Ausschlusskriterien

Parallel zur geologischen und hydrogeologischen Evaluierung erfolgt die Beurteilung der wesentlichen geotechnischen Parameter und unter Heranziehung von zugehörigen Entscheidungskriterien die Entscheidung zur Wahl der Vortriebsmethode, wobei der geomechanische Homogenbereich als unendlich langer, ungestützter Hohlraum angenommen wird.

Als geomechanische Ausschlusskriterien werden empfohlen:

- Bewertung des GSI
- Spannungsverteilung und mechanisches Verhalten in der Umgebung des Tunnels durch

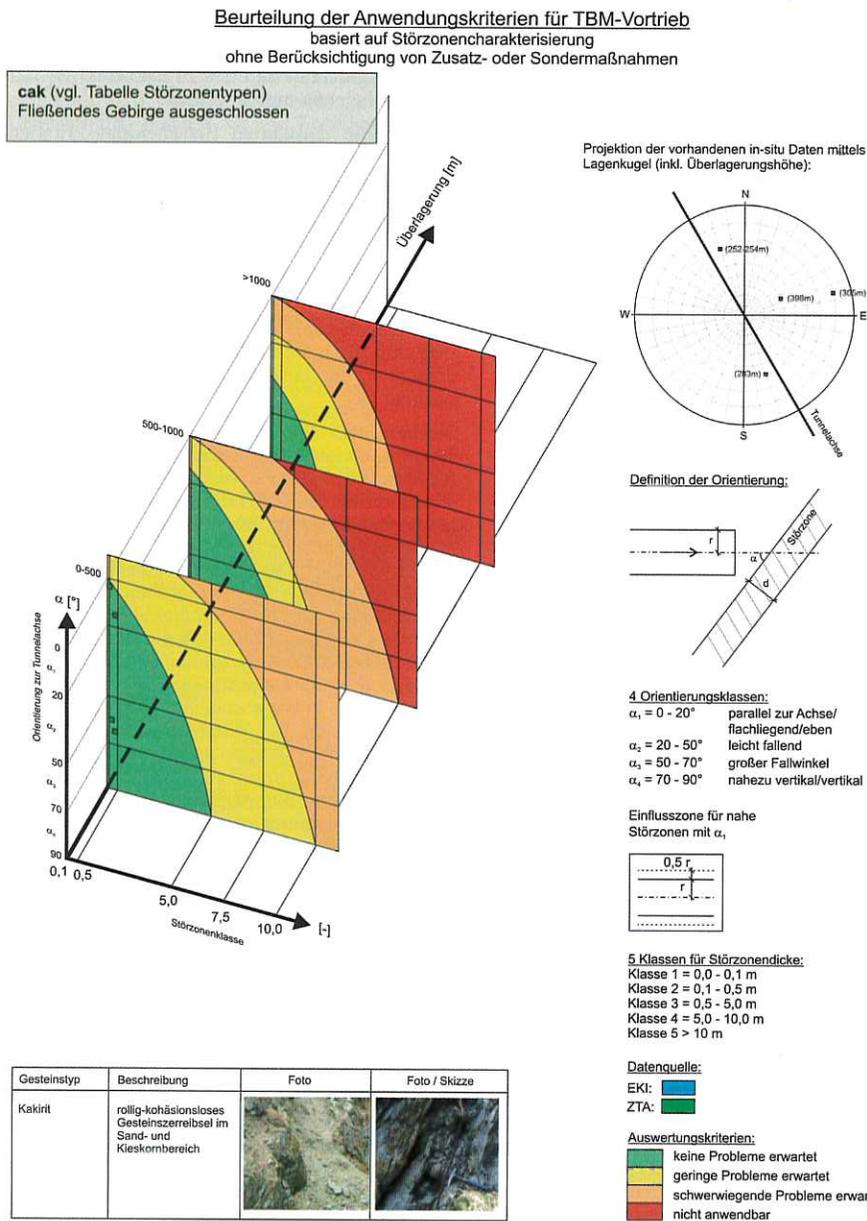


Bild 4. Geologisches Entscheidungsdiagramm für den entscheidenden Parameter „Störzonen“. Mit unterschiedlichen Überlagerungshöhen (dargestellt sind die Überlagerungsklassen 0 bis 500 m, 500 bis 1.000 m, > 1.000 m) ändern sich die Beurteilungsgrenzen. Je nach Orientierung der Störung zum Tunnel (y-Achse) sowie je nach Mächtigkeit der Störung (x-Achse) ist im betrachteten Abschnitt ein maschineller Vortrieb problemlos ausführbar (grünes Feld) oder nicht ausführbar (rotes Feld). Das dargestellte Modell wird zunächst lithologiebezogen, z. B. den Kakirit (cak) im Quarzphyllit betreffend, angelegt und dann im Zuge der Vertiefung der Erkundungen sukzessive verfeinert. Dies betrifft insbesondere die Beurteilungsgrenzen.

Bewertung des Verhältnisses t_p/r (Tiefe der plastischen Zone/Tunnelradius):

- elastisch,
 - elasto-plastisch, stabil,
 - elasto-plastisch, instabil.
- Verformung/Konvergenz des Tunnels unter Berücksichtigung des zeitabhängigen Gebirgsverhaltens, z. B. für quellendes Gebirge
- radiale Verformungen $u_r, u_r(t)$

5.5.2 Geomechanische Entscheidungskriterien

In weiterer Folge ist die Entscheidung zu treffen, ob ein maschineller Vortrieb (Gripper-TBM bzw. TBM S/DS) auszuschließen ist. Wie in der Bild 5 dargestellt, werden hierzu mögliche Versagensmechanismen allgemeingültig als „geotechnische Versagensszenarien“ aufgelistet (Spalte 1) und diesen bestimmte Beurteilungskriterien zugewiesen (Spalte 2). Unter Berücksichtigung der Annahmen für die Entscheidung der Vortriebsmethode (s. Abschn. 5.2) und unter Berücksichtigung der geologischen/hydrogeologischen Randbedingungen gemäß Abschnitt 5.3 können für die einzelnen Kriterien „Grenzen der Einsatzbarkeit“ (Spalte 3 und 4) definiert werden. Das erwartete Deformationsverhalten des Gebirges ist durch das Verhältnis der „bezogenen Dicke der plastischen Zone“ zur „bezogenen Radialverformung“ gegeben (s. Bild 5, Diagramm rechts unten).

Am Ende dieses Prozesses sind die Bearbeitungsergebnisse in einem Erläuterungsbericht zusammenzufassen und in einem Längsschnitt darzustellen, da die Entscheidung der Vortriebsmethode von projektstrategischer Bedeutung ist. Im Längsschnitt muss ersichtlich sein, welche Bereiche des Tunnels mit beiden Vortriebsarten aufgeföhren werden können und welche nur mit einer.

6 Geotechnische Modellbildung und Parameterwahl

6.1 Grundsätzliches zum geologisch-geotechnischen Planungsprozess

Auf Basis des geologischen Modells werden Homogenbereiche mit gleichartigen Eigenschaften hinsichtlich des geologischen Aufbaus definiert. Zunächst werden dabei die tektonischen Grobheiten unterschieden. Die weitere Unterteilung der Homogenbereiche ist dann geprägt vom struktur-geologischen Aufbau (Trennflächengefüge). Das heißt, Bereiche mit gleichem Trennflächenaufbau werden zu struktur-geologischen Homogenbereichen zusammengefasst. Innerhalb dieser struktur-geologischen Homogenbereiche können wiederum verschiedene Lithologien auftreten. Bereiche, welche geologisch und geotechnisch gleichartig sind, werden schlussendlich zu geotechnischen

Homogenbereichen zusammengefasst. Innerhalb der geotechnischen Homogenbereiche sind folgende Punkte einheitlich:

- tektonische Grobheit,
- struktur-geologische Einheit (Bereich mit gleichem Trennflächengefüge),
- hydrogeologische Randbedingungen,
- Spannungszustand des Gebirges (z. B. insbesondere bei tiefliegenden Tunneln können tektonische Spannungen wirksam werden, je nach Richtung dieser Spannungen müssen die Homogenbereiche unterschieden werden),
- lithologische Einheiten (können verschiedene Gesteine umfassen, so z. B. kann die lithologische Einheit Quarzphyllit die Gesteine Quarzphyllit, Grünschiefer und Glimmerschiefer implizieren).

Innerhalb des geotechnischen Homogenbereiches werden nun wiederum die Gebirgsarten unterschieden. Eine Gebirgsart definiert eine in sich geologisch-geotechnisch homogene Einheit mit gleichen bzw. vergleichbaren Eigenschaften, zu denen neben der tektonischen Grobheit, der struktur-geologischen Einheit, den hydrogeologischen Randbedingungen und dem Spannungszustand des Gebirges auch die Gesteinsart/lithologische Einheit (z. B. Quarzphyllit, Grünschiefer, Glimmerschiefer) und geotechnische Charakteristika des Gesteins und des Gebirges einschließlich der Trennflächen gehören.

Den einzelnen Gebirgsarten müssen sämtliche für die technische Tunnelplanung erforderlichen Kenndaten zugeordnet werden. Dies betrifft die Kennwerte des Gesteins, der Trennflächen sowie des Gebirges.

Als letzter Schritt der geologisch-geotechnischen Planung als Grundlage für die technische Tunnelplanung ist das Verhalten des Gebirges durch den Hohlraumausbruch (Gebirgsverhalten) zu ermitteln. Im weiteren Sinne sind hierbei die möglichen potenziellen Versagensmechanismen zu betrachten und darzustellen. Dies bildet die Basis für die Wahl des Vortriebsverfahrens und der Ausbaumittel im Zuge der technischen Tunnelplanung.

6.2 Berechnungsverfahren für tiefliegende Tunnelbauwerke und erforderliche geotechnische Parameter

Für die geotechnische und die technische Tunnelplanung tiefliegender Tunnelbauwerke kommen unterschiedliche Berechnungsverfahren in Betracht. Die Berechnungsverfahren müssen dabei auf zwei Ebenen unterschieden werden. Zum einen muss beurteilt werden, wie sich das Gebirge verhält. Dabei können insbesondere bei tiefliegenden Tunneln die beiden Varianten spannungs-

Tabelle 2. Blockgleitverfahren – erforderliche geotechnische Parameter

Berechnungsverfahren	Element	Parameter	Index	Dimension
Blockgleitverfahren	Geologische Parameter:	Orientierung der Trennflächen (Einfallswinkel/Einfallrichtung)		[Winkel]
	Mohr-Coulomb-Ansatz:	Reibungswinkel der Trennflächen	φ'	[Winkel]
		Kohäsion der Trennflächen	c'	[Spannung]
		Zugfestigkeit der Trennflächen	σ_t'	[Spannung]
	Barton-Bandis-Ansatz:	Trennflächenrauigkeit	JRC	[dimensionslos]
		Trennflächenfestigkeit	JCS	[Spannung]
		Basisreibungswinkel	φ'	[Winkel]

6.2.2 Numerische Berechnungsverfahren

Die numerischen Berechnungsverfahren lassen sich in Kontinuumsverfahren (Finite-Elemente- und Finite-Differenzen-Verfahren) sowie Diskontinuumsverfahren (Diskrete-Elemente-Verfahren) unterscheiden. Dabei kommen aufgrund des hohen Rechenaufwandes der Diskontinuumsverfahren hauptsächlich Kontinuumsverfahren zur Anwendung.

Bei Verwendung von numerischen Berechnungsverfahren werden in Abhängigkeit vom Detaillierungsgrad der Abbildung des Gebirges (Stoffgesetz) unterschiedliche Parameter benötigt. Zu-

nächst muss unterschieden werden, wie die Abbildung des Gebirges im Berechnungsmodell erfolgen soll.

Das Gebirgsvolumen setzt sich aus folgenden Elementen (geologischen Strukturelementen) zusammen (s. Bild 7):

- Gestein,
- Trennflächen (Klüfte, Großklüfte),
- Störungszonen.

Störungszonen (Großstörungen) sollen immer vollständig über Kontinuumsmodellierung abgebildet werden. Die Berücksichtigung des mit Trenn-

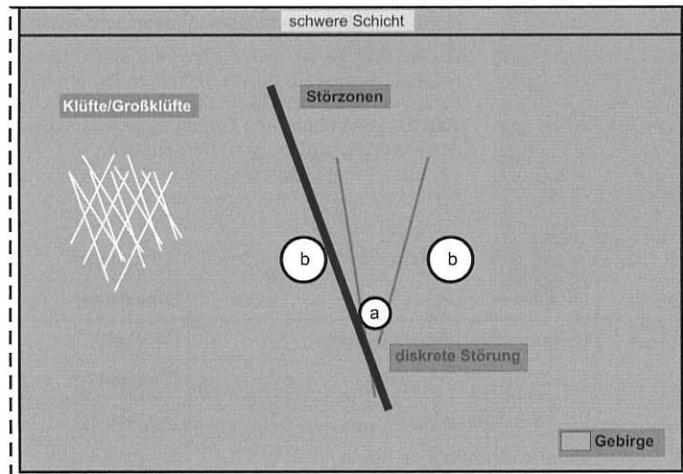


Bild 7. Geologische Strukturelemente in der numerischen Modellierung

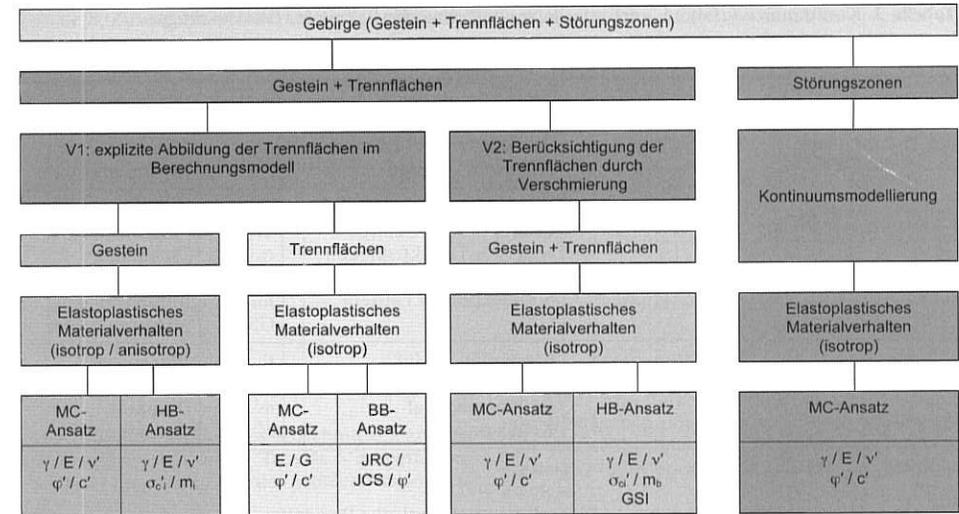


Bild 8. Wege zur Abbildung des Gebirges bestehend aus Gestein, Trennflächen und Störungszonen im kontinuumsmechanischen Berechnungsmodell

Tabelle 3. Kontinuumsverfahren – erforderliche geotechnische Parameter

Berechnungsverfahren	Element	Parameter	Index	Dimension
Kontinuumsverfahren mit diskreter Abbildung der Trennflächen	Gestein (MC-Ansatz)	Elastizitätsmodul Querdehnzahl Reibungswinkel Kohäsion Zugfestigkeit	E ν' φ' c' σ_z'	[Spannung] ϵ [dimensionslos] [Winkel] [Spannung] [Spannung]
	Gestein (HB-Ansatz)	Elastizitätsmodul Querdehnzahl einaxiale Druckfestigkeit Stifexponent	E ν' σ_{ci}' m_i	[Spannung] [dimensionslos] [Spannung] [dimensionslos]
Trennflächen	Trennflächen (Einfallswinkel/Einfallrichtung)	Normalsteifigkeit	E	[Spannung]
		Schubsteifigkeit	G	[Spannung]
Trennflächen (MC-Ansatz)	Trennflächen (Einfallswinkel/Einfallrichtung)	Reibungswinkel	φ'	[Winkel]
		Kohäsion	c'	[Spannung]
		Zugfestigkeit	σ_t	[Spannung]
Trennflächen (BB-Ansatz)	Trennflächen (Einfallswinkel/Einfallrichtung)	Trennflächenrauigkeit	JRC	[dimensionslos]
		Trennflächenfestigkeit	JCS	[Spannung]
		Basisreibungswinkel	φ'	[Winkel]
Gebirge	Gebirge	Seitendruckbeiwert	K_0	[dimensionslos]

Tabelle 3. Kontinuumsverfahren – erforderliche geotechnische Parameter (Fortsetzung)

Berechnungsverfahren	Element	Parameter	Index	Dimension
Kontinuumsverfahren ohne diskrete Abbildung der Trennflächen	MC-Ansatz	Elastizitätsmodul Gebirge Querdehnzahl Gebirge Reibungswinkel Gebirge Kohäsion Gebirge	E v' φ' c'	[Spannung] [dimensionslos] [Winkel] [Spannung]
	HB-Ansatz	Elastizitätsmodul Gebirge Querdehnzahl Gebirge einaxiale Druckfestigkeit Gestein Steifeexponent Gestein GSI	E v' σ_{ci} m _i GSI	[Spannung] [dimensionslos] [Spannung] [dimensionslos] [dimensionslos]
Störungszonen	Störungszone	Elastizitätsmodul Querdehnzahl Reibungswinkel Kohäsion	E v' φ' c'	[Spannung] [dimensionslos] [Winkel] [Spannung]

Tabelle 4. Diskontinuumsverfahren – erforderliche geotechnische Parameter

Berechnungsverfahren	Element	Parameter	Index	Dimension
Diskontinuumsverfahren	Gestein	Elastizitätsmodul Querdehnzahl Reibungswinkel Kohäsion	E v' φ' c'	[Spannung] [dimensionslos] [Winkel] [Spannung]
		Trennflächen	Orientierung der Trennflächen (Einfallwinkel/ Einfallrichtung)	
	Trennflächen	Normalsteifigkeit Schubsteifigkeit	E G	[Spannung] [Spannung]
		Reibungswinkel Kohäsion	φ' c'	[Winkel] [Spannung]

flächen geprägten Gebirges im Berechnungsmodell kann auf zwei verschiedenen Wegen erfolgen (s. Bild 8). Zum einen besteht die Möglichkeit, das Gestein mit seinen Parametern zu verwenden und die Trennflächen explizit im Berechnungsmodell mit den zugehörigen Trennflächenparametern abzubilden. Zum anderen kann die „Störung“ des Gesteins durch die Trennflächen durch „Verschmierung“ der Gesteins- und Trennflächenparameter abgebildet werden. Die „Verschmierung“ erfolgt dabei z. B. über ein Gebirgsklassifikationssystem (z. B. GSI oder RMR).

6.2.3 Zusätzliche, vom Berechnungsverfahren unabhängige, erforderliche Parameter

Die zuvor erwähnten Parameter und Kennwerte ergeben sich im Wesentlichen aus statischen Gesichtspunkten. Diese Parameter werden haupt-

sächlich für die Ermittlung der Gebirgslast und des erforderlichen Ausbaus benötigt. Neben diesen Parametern werden für die technische Tunnelplanung noch zusätzliche Parameter benötigt, welche z. B. das Abrasivitätsverhalten sowie das Quellverhalten betreffen (s. Tabelle 5).

Aufgabe der geotechnischen Planung ist nun, diese für die technische Planung erforderlichen Gebirgskennwerte zu ermitteln und dem technischen Planer zur Verfügung zu stellen.

6.3 Ermittlung der erforderlichen Gesteins- und Gebirgskennwerte

Im vorangehenden Abschnitt 6.2 wurde dargestellt, welche Kennwerte im Zuge der geotechnischen Planung als Basis für die technische Tunnelplanung zu ermitteln sind. Im Folgenden wird nun

Tabelle 5. Zusätzlich erforderliche geotechnische Parameter

	Element	Parameter	Index	Dimension
Zusätzlich erforderliche Parameter	Quellverhalten	Quelldruck Quelldehnung	σ_q ϵ_q	[Spannung] [Dehnung]
		Abrasivität	Cerchar Abrasivitätsindex	CAI
	äquivalenter Quarzgehalt		eQu	[%]
		Cutter Life Index Drilling Rate Index	CLI DRI	[dimensionslos] [dimensionslos]

aufgezeigt, wie diese Parameter ermittelt werden können.

Fasst man die Tabellen aus Abschnitt 6.2 zusammen, ergeben sich die in Tabelle 6 aufgeführten Parameter, die es im Zuge der geotechnischen Planung zu ermitteln gilt.

Die Bestimmung der Gesteins- und Trennflächenparameter erfolgt dabei entweder im Labor anhand von Bohrkernen oder in situ. Je nach vorliegendem Aufschluss kann die Ermittlung der In-situ-Parameter im Bohrloch oder in Erkundungsstollen erfolgen.

Tabelle 6. Zusammenstellung der für die technische Tunnelplanung erforderlichen geotechnischen Parameter

Element	Parameter	Index	Dimension
Gestein	Dichte/Wichte	ρ/γ	[Dichte/Wichte]
	Elastizitätsmodul Querdehnzahl	E v'	[Spannung] [dimensionslos]
	Reibungswinkel Kohäsion	φ' c'	[Winkel] [Spannung]
	einaxiale Druckfestigkeit Steifeexponent	σ_{ci} m _i	[Spannung] [dimensionslos]
	Zugfestigkeit	σ_z'	[Spannung]
	Quelldruck Quelldehnung	σ_q ϵ_q	[Spannung] [Dehnung]
	Cerchar Abrasivitätsindex	CAI	[dimensionslos]
	äquivalenter Quarzgehalt	eQu	[%]
	Cutter Life Index Drilling Rate Index	CLI DRI	[dimensionslos] [dimensionslos]
	Trennflächen	Orientierung	
Normalsteifigkeit Schubsteifigkeit		E G	[Spannung] [Spannung]
Reibungswinkel Kohäsion		φ' c'	[Winkel] [Spannung]
Trennflächenrauigkeit Trennflächenfestigkeit Basisreibungswinkel		JRC JCS φ'	[dimensionslos] [Spannung] [Winkel]

Tabelle 6. Zusammenstellung der für die technische Tunnelplanung erforderlichen geotechnischen Parameter (Fortsetzung)

Element	Parameter	Index	Dimension
Gebirge	Elastizitätsmodul	E	[Spannung]
	Querdehnzahl	ν'	[dimensionslos]
	Reibungswinkel	φ'	[Winkel]
	Kohäsion	c'	[Spannung]
	Gebirgsklassifikation	GSI	[dimensionslos]
	Seitendruckbeiwert	K_0	[dimensionslos]
Störungszonen	Elastizitätsmodul	E	[Spannung]
	Querdehnzahl	ν'	[dimensionslos]
	Reibungswinkel	φ'	[Winkel]
	Kohäsion	c'	[Spannung]

Parameterermittlung im Labor

Die wesentlichen Versuche zur Ermittlung der erforderlichen Gesteins- und Trennflächenparameter sind einaxiale und triaxiale Druckversuche sowie Scherversuche. Tabelle 7 enthält eine Zuordnung, welche der in Tabelle 6 dargestellten Parameter mit welchen Laborversuchen ermittelt werden können.

Bei Gesteinen, die eine starke Anisotropie aufweisen (z. B. durch engständige Schieferung) ist zu empfehlen für die Gesteinsparameter anisotrope Parameter (zumindest für die einaxiale Druckfestigkeit und den Elastizitätsmodul) anzugeben. Die Anzahl der Versuche sollte möglichst so festgesetzt werden, dass zumindest einfache statistische Auswertemethoden angewendet werden können. Das Zurückgreifen auf Werte aus der Literatur oder aus vergleichbaren Projekten sollte nur in Ausnahmefällen erfolgen.

Tabelle 7. Übersicht über die Ermittlung geotechnisch relevanter Parameter im Labor

Element	Parameter	Index	Dimension	Versuchstyp
Gestein	Dichte/Wichte	ρ/γ'	[Dichte/Wichte]	Tauchwägung
	Elastizitätsmodul	E	[Spannung]	einaxialer/triaxialer Druckversuch
	Querdehnzahl	ν'	[dimensionslos]	
	Reibungswinkel	φ'	[Winkel]	Triaxialer Druckversuch/ Scherversuch intaktes Gestein
	Kohäsion	c'	[Spannung]	
	einaxiale Druckfestigkeit	σ_{ci}'	[Spannung]	einaxialer Druckversuch Triaxialer Druckversuch
	Steiexpone	m_i	[dimensionslos]	
	Zugfestigkeit	σ_z'	[Spannung]	Spaltzugversuch, Biegezugversuch, MTT
	Quelldruck	σ_q	[Spannung]	Quellversuche
Quelldehnung	ε_q	[Dehnung]		
	Cerchar Abrasivitätsindex	CAI	[dimensionslos]	Cerchar Abrasivitätsversuch
	äquivalenter Quarzgehalt	eQu	[%]	Dünnschliffanalyse
	Cutter Life Index Drilling Rate Index	CLI, DRI	[dimensionslos] [dimensionslos]	CLI DRI Versuch

Tabelle 7. Übersicht über die Ermittlung geotechnisch relevanter Parameter im Labor (Fortsetzung)

Element	Parameter	Index	Dimension	Versuchstyp
Trennflächen	Normalsteifigkeit	E	[Spannung]	Scherversuch an Trennflächen
	Schubsteifigkeit	G	[Spannung]	
	Reibungswinkel	φ'	[Winkel]	Scherversuch an Trennflächen
Kohäsion	c'	[Spannung]		
	Trennflächenrauigkeit	JRC	[dimensionslos]	visuelle Beurteilung Schmidt'scher Hammer Abgleitversuch
	Trennflächenfestigkeit	JCS	[Spannung]	
	Basisreibungswinkel	φ'	[Winkel]	
Störungszonen	Elastizitätsmodul	E	[Spannung]	triaxialer Druckversuch
	Querdehnzahl	ν'	[dimensionslos]	
	Reibungswinkel	φ'	[Winkel]	triaxialer Druckversuch/ Scherversuch Locker- gestein
	Kohäsion	c'	[Spannung]	

Parameterermittlung in situ

Während im Labor stets nur ein sehr kleiner Ausschnitt des Gebirgskörpers betrachtet und untersucht werden kann, besteht bei In-situ-Versuchen die Möglichkeit, einen wesentlich größeren Gebirgsbereich zu erfassen. Die ideale Möglichkeit bieten hierbei Erkundungsstollen. Im Vergleich zu Bohrungen bieten Erkundungsstollen nicht nur die Möglichkeit einer großflächigeren Gebirgsbetrachtung, sondern zusätzlich noch die Möglichkeit, das Verhalten des Gebirges beim Ausbruch unmittelbar zu erfassen. Tabelle 8 gibt einen Überblick, welche der erforderlichen geotechnischen Parameter in situ ermittelt werden können.

Empirische Ermittlung der Gebirgsparameter

Für die Variante 2 gemäß Bild 8 werden die verschmierten Gebirgsparameter (Gestein-Trennflächen) benötigt. Das gängige Vorgehen sieht dabei üblicherweise drei Schritte vor. Zunächst werden die Kennwerte des Gesteins über Laborversuche an Gesteinsproben ermittelt (s. Abschn. *Parameterermittlung im Labor*). Anschließend wird die Störung des Gesteins durch die Trennflächen (Gestein + Trennflächen = Gebirge) über einen Indexwert, wie beispielsweise den GSI, beschrieben. Schlussendlich werden die Parameter des Gesteins über empirische Formeln auf Basis dieses Indexwertes abgemindert und so die Gebirgsparameter ermittelt. Für die theoretischen Hintergründe dieses

Tabelle 8. Übersicht über die Ermittlung geotechnisch relevanter Parameter in situ

Element	Parameter	Index	Dimension	Versuchstyp
Trennflächen	Orientierung		[Winkel]	geologische Aufnahme mit Kompass
	Trennflächenrauigkeit	JRC	[dimensionslos]	visuelle Beurteilung Schmidt'scher Hammer
	Trennflächenfestigkeit	JCS	[Spannung]	
Gebirge	Elastizitätsmodul	E	[Spannung]	Bohrloch: Dilatometer Erkundungsstollen: Lastplatten-/Doppellastplattenversuch Radialpresse
	Reibungswinkel	φ'	[Winkel]	In-situ-Großscherversuch
	Kohäsion	c'	[Spannung]	
	Gebirgsklassifikation	GSI	[dimensionslos]	visuelle Beurteilung
	Seitendruckbeiwert	K_0	[dimensionslos]	Hydro Frac, CSIRO Test, Door-Stopper Test

Vorgehens wird auf die Arbeiten von *Hoek* [27–30] verwiesen.

6.4 Gebirgsverhalten und Kriterien für die Festlegung des Gebirgsverhaltens bei tiefliegenden Tunnelbauwerken

Neben der Festlegung der geotechnischen Berechnungsparameter des Gebirges ist es die Aufgabe der geotechnischen Planung, das Verhalten des Gebirges durch den Hohlraumausbruch (Gebirgsverhalten) zu ermitteln. Es sind hierbei die möglichen potenziellen Versagensszenarien zu betrachten und darzustellen. Dies bildet die Basis für die Wahl des Vortriebsverfahrens und der Ausbaumittel im Zuge der technischen Tunnelplanung.

Die globalen Gebirgsverhaltenstypen bzw. Versagensszenarien sind teilweise, (z. B. länder-spezifisch) schon vorgegeben. Es empfiehlt sich jedoch, diese globalen Typen/Szenarien projektspezifisch zu adaptieren und ebenso projektspezifische Kriterien für die Festlegung des Gebirgsverhaltens zu definieren. Ein Gebirgsverhaltenstyp/Versagensszenario ist definiert durch ein Gebirge mit gleichartigem Verhalten bezüglich seines Ausbruchverhaltens, den relevanten Versagensmechanismen sowie seinem Verformungsverhalten. Es wird bestimmt durch die Gesteinseigenschaften, das Trennflächengefüge und deren

Eigenschaften, den In-situ-Spannungsverhältnissen, den Bergwasserverhältnissen sowie der Hohlraumform.

Die für tiefliegende Tunnelbauwerke wesentlichen geotechnischen Versagensszenarien sind dabei folgende:

- Schwerkraftbedingter Ausbruch von klein-volumigen, gefügebedingten Klufkörpern. Das Blockversagen wird ausschließlich durch die Trennflächenparameter (Orientierung, Verschnitt, Festigkeit) bestimmt.
- Ausbruch von großvolumigen, gefügebedingten Klufkörpern, nicht nur schwerkraftinduziert, sondern auch durch Überschreitung der Scherfestigkeit auf den Trennflächen.
- Spannungsinduzierte, hohlraumnahe Überbeanspruchung/Plastifizierung des Gebirges. Das Versagensszenario ist kombiniert mit verstärktem Blockversagen.
- Spannungsinduzierte, tiefgreifende Überbeanspruchung/Plastifizierung des Gebirges/druckhaftes Gebirge.
- Bergschlag.
- Firstniederbruch.
- Quellen.
- Ausrieseln von Lockergestein ohne und mit Wasserzutritt.

Tabelle 9. Geotechnische Versagensszenarien, Eigenschaften und Voraussetzungen für das Auftreten sowie Beurteilungskriterien

Versagensszenario	Eigenschaften und Voraussetzungen für das Auftreten	Beurteilungskriterien
Schwerkraftbedingter Ausbruch von kleinvolumigen, gefügebedingten Klufkörpern	Geringer gefügebedingter Entfestigungsgrad. Gebirgsfestigkeit liegt deutlich über der in Hohlraumnähe vorhandenen Spannung.	$GSI > GSI_{lim}^{1)}$ Tiefe der gefügebedingten Ausbrüche $<$ Grenztiefe $^{1)}$
Ausbruch von großvolumigen, gefügebedingten Klufkörpern, nicht nur schwerkraftinduziert, sondern auch durch Überschreitung der Scherfestigkeit auf den Trennflächen	Höherer gefügebedingter Entfestigungsgrad. Höhere Gebirgsbeanspruchung, aber maximal nachbrüchig (gemäß Definition von <i>Hoek</i>).	$GSI < GSI_{lim}^{1)}$ Tiefe der gefügebedingten Ausbrüche $>$ Grenztiefe 1 und $<$ Grenztiefe 2 $^{1)}$ $\sigma_{cm}/\sigma_{max} > 0,45$
Spannungsinduzierte, hohlraumnahe Überbeanspruchung/Plastifizierung des Gebirges	Die Spannungen am Hohlraumrand überschreiten die Gebirgsfestigkeit. Die Scherfestigkeit auf den Trennflächen wird hohlraumnah überschritten. Es bildet sich eine plastische Zone/Bruchzone um den Hohlraum mit hohlraumnah begrenzter Tiefe. Die Gebirgsbeanspruchung liegt im leicht druckhaften Bereich.	Tiefe der gefügebedingten Ausbrüche $>$ Grenztiefe 2 und $<$ Grenztiefe 3 $^{1)}$ $0,28 < \sigma_{cm}/\sigma_{max} < 0,45$

Tabelle 9 enthält die wesentlichen geotechnischen Versagensszenarien, deren Voraussetzungen für das Auftreten sowie mögliche Kriterien für deren Beurteilung. Neben den geotechnischen Versagensmechanismen existieren noch weitere geogene Gefährdungen wie Gas, Temperatur oder

Radioaktivität, die hier jedoch nicht betrachtet werden.

Für die Ermittlung der Versagensszenarien sind verschiedenen Untersuchungsverfahren erforderlich. Unter anderem sollten folgende Methoden herangezogen werden:

Tabelle 9. Geotechnische Versagensszenarien, Eigenschaften und Voraussetzungen für das Auftreten sowie Beurteilungskriterien (Fortsetzung)

Versagensszenario	Eigenschaften und Voraussetzungen für das Auftreten	Beurteilungskriterien
Spannungsinduzierte, tiefgreifende Überbeanspruchung/Plastifizierung des Gebirges/druckhaftes Gebirge	Die Spannungen am Hohlraumrand überschreiten maßgeblich die Gebirgsfestigkeit. Die Scherfestigkeit auf den Trennflächen wird tiefreichend überschritten. Durch das hohe Spannungsniveau entwickeln sich neue Scherflächen auch unabhängig von den Trennflächen. Es bildet sich eine tiefgreifende plastische Zone/Bruchzone um den Hohlraum. Die Verformungen nehmen stark zu und können ohne Stützmaßnahmen nach oben hin unbegrenzt sein. Die Gebirgsbeanspruchung liegt im mittel bis stark druckhaften Bereich. Voraussetzung für dieses Versagensszenario sind Gebirgsbereiche mit geringen Festigkeiten wie beispielsweise Störungszonen und/oder hohe Gebirgsspannungen.	$\sigma_{cm}/\sigma_{max} < 0,28$ $U_r > U_{r,lim}^{1)}$
Bergschlag	Sprödes Gebirge unter hohen Spannungen. Schlagartiger Abbau von hoher gespeicherter Energie. Massives Gebirgsvolumen.	$GSI > GSI_{lim}^{1)}$ $\sigma_{ci}/\sigma_z < (\sigma_{ci}/\sigma_z)_{lim}^{1)}$ $PES > PES_{lim}^{1)}$
Firstniederbruch	Voraussetzung sind geringe Horizontalspannungen und geringe Scherfestigkeiten des Gebirges. Typischerweise bei flach liegenden Tunnelbauwerken mit geringer Überlagerung relevant. Bei tiefliegenden Tunnelbauwerken im Bereich flach liegender Störungssysteme relevant. Große Steifigkeitsunterschiede zwischen benachbarten Schichten.	
Quellen	Voraussetzung ist das Vorhandensein quellfähiger Gesteine in Verbindung mit Wasserzutritt.	Anhydrit quellfähiger Ton
Ausrieseln von Lockergestein ohne und mit Wasserzutritt	Ausrieseln bzw. Ausfließen von nichtbindigem, gering verzahntem Lockergestein mit geringer Kohäsion.	$c' < c'_{krit}^{1)}$ Wasserzutritt

¹⁾ Die jeweiligen Grenzwerte sind projektspezifisch festzulegen.

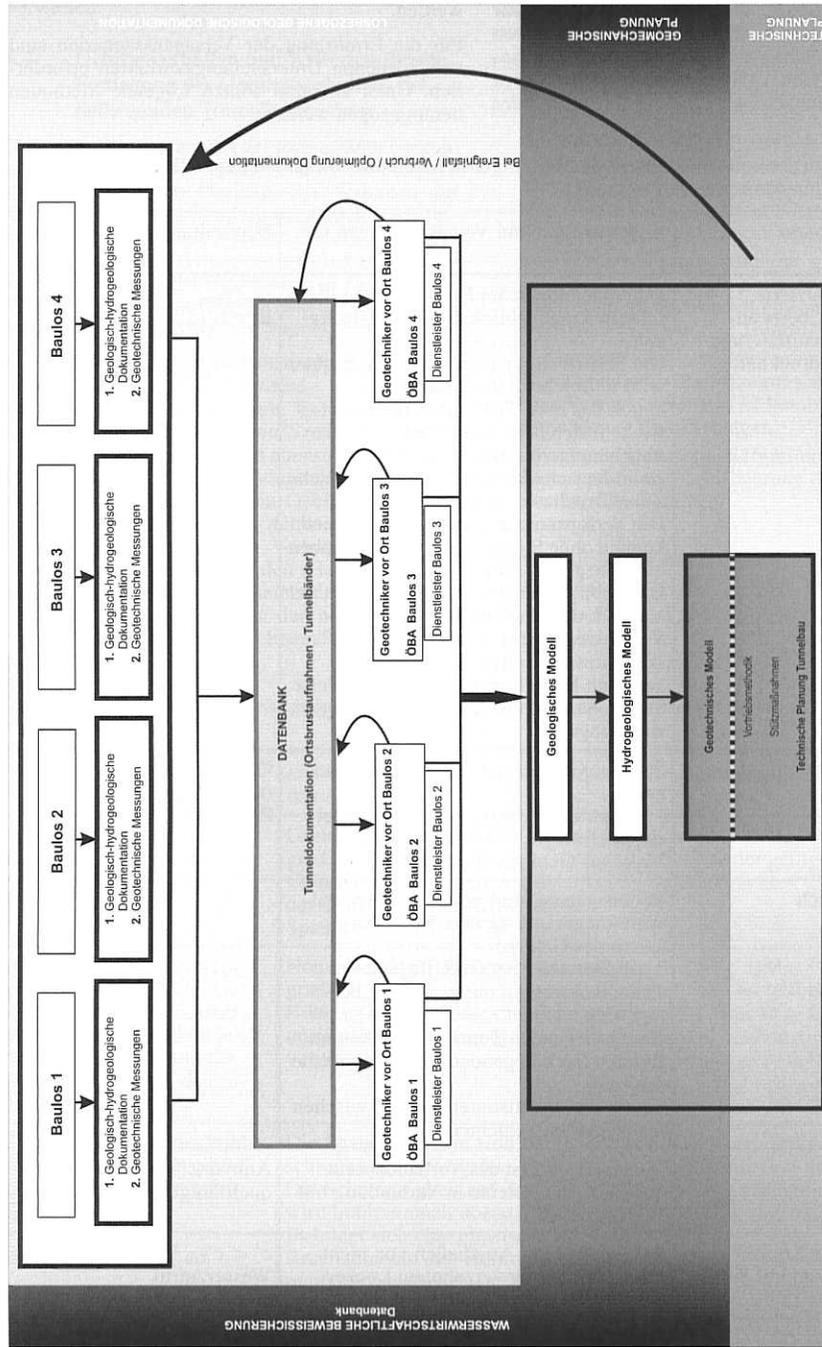


Bild 9. Arbeitsprozess der Aktualisierung der geomechanischen und tunnelbautechnischen Planung für tiefliegende Tunnel mit Erkundungsstollen. Aus den verschiedenen Erkundungsstollen kommen verschiedene Kenntnisgewinne mit z. T. baulosübergreifender Bedeutung. Die aktualisierten Modelle der geologisch-geotechnischen Planung dienen als Grundlage für die technische Ausschreibungsplanung der Haupttunnel. Im Falle, dass diese Haupttunnelabschnitte (in Baulose) bereits vergeben wurden, können diese aktualisierten geologisch-geotechnischen Modelle ähnlich wie im Ereignisfall baubegleitend für die Optimierungen des Vortriebs und der Festlegung der Stützmaßnahmen verwendet werden.

- empirische Verfahren (z. B. Gebirgsbeanspruchung nach *Hoek*),
- analytische Berechnungsverfahren (z. B. Blockgleitverfahren, Kennlinienverfahren),
- numerische Berechnungsverfahren (z. B. Finite Elemente, Finite Differenzen).

Die Versagensszenarien, deren Eigenschaften und Parameter sollen zusammenfassend in Datenblättern dargestellt werden, die zumindest folgende Angaben beinhalten:

- Name und Beschreibung des Versagensszenarios,
- Auftreten im geotechnischen Homogenbereich,
- Skizze mit Darstellung der maßgeblichen Versagensmechanismen,
- Trennflächenorientierungen zum Hohlraum,
- Gebirgsbeanspruchung/Spannungszustand,
- Einfluss des Bergwassers auf den Versagensmechanismus,
- erwartete Radialdeformationen.

7 Schlussfolgerungen

Wesentlich für den Erfolg des geologisch-geotechnischen Planungsprozesses von tiefliegenden Tunneln ist die umfassende Beurteilung ausgewählter Parameter und Faktoren, um den Erfordernissen in den verschiedenen Projektphasen Rechnung zu tragen. Liegt in einer frühen Projektphase (Machbarkeitsstudie, Trassenwahl) der Schwerpunkt auf regionalgeologischen Fragestellungen, so verlagert sich dieser im Zuge der weiteren Projektbearbeitung auf trassenbezogene geologisch-geotechnische Parameter.

Die Betrachtung ausgewählter geologisch-geotechnischer Parameter ermöglicht jedoch bereits zu einem frühen Zeitpunkt eine Entscheidungshilfe für die Wahl der Vortriebsmethodik. Damit kann die geologisch-geotechnische Planung für den Tunnel oder definierte Tunnelabschnitte gezielt auf die gewählte Vortriebsmethode hin ausgelegt werden.

Der geologisch geotechnische Planungsprozess, insbesondere jener von tiefliegenden Tunnelprojekten, ist geprägt durch den zunehmenden Tiefgang der Erkundungen und damit eines fortlaufenden Kenntnisgewinnes mit Projektfortschritt. Während in frühen Projektphasen die Erkundungen sich auf Kartierungen und Bohrungen beschränken, bieten Erkundungsstollen im fortgeschrittenen Projektstadium schlussendlich die beste Möglichkeit, die geologisch-geotechnischen Gegebenheiten auf Tunnelniveau zu erkunden. Das Auffahren von Erkundungsstollen erfordert dahingehend im Planungsprozess einen besonderen Ablauf (s. Bild 9).

Die Vielzahl von neuen geologischen und geotechnischen Daten müssen in die geologischen und geotechnischen Modelle eingearbeitet werden. Diesbezüglich ist darauf zu achten, dass die neuen Erkenntnisse aus den verschiedenen Baulosen im weiteren Planungsprozess baulosübergreifend genutzt werden.

8 Literatur

8.1 Regelwerke

Österreich:

- [1] ÖNORM B 2203-1:2001: Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm, Teil 1: Zyklischer Vortrieb.
- [2] ÖNORM B 2203-2:2005: Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm, Teil 2: Maschinelles Vortrieb.
- [3] Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb, Gebirgscharakterisierung und Vorgangsweise zur nachvollziehbaren Festlegung von bautechnischen Maßnahmen während der Planung und Bauausführung. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG), 2. Auflage, 2008.
- [4] Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG), in Bearbeitung.
- [5] Richtlinie Schildvortrieb. Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik e. V. (ÖVBB), 2009.
- [6] Entwurfsrichtlinie – Kontinuierlicher Vortrieb von Eisenbahntunneln mit Tunnelvortriebsmaschinen. Universität Innsbruck, Institut für Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement, 2002.
- [7] Projektierungsrichtlinie – Bautechnische und geotechnische Arbeiten, Kontinuierlicher Vortrieb von Straßentunneln. Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr (FSV), RVS 09.01.31, 2003.

Deutschland:

- [8] Empfehlungen des Deutschen Ausschusses für Unterirdisches Bauen e. V. (DAUB) zu Planung und Bau von Tunnelbauwerken. Deutscher Ausschuss für Unterirdisches Bauen e. V. (DAUB), Tunnel 4/2004, S. 73–79.
- [9] Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen. Deutscher Ausschuss für Unterirdisches Bauen e. V. (DAUB), 2010.

Italien:

- [10] SIG '97, National project for design and construction standards in underground works (promoted by AGI, ANIM, GEAM, IAEG, ITCOLD, SIG, SIGI), Guidelines for Design, Tendering and Construction of Underground Works, 1997, inserted in No. 51 of *Gallerie e Grandi Opere Sotterranee*.
- [11] RFI: Planungshandbuch – Geologie, 2003; RFI: Manuale di progettazione – Geologia, 2003.
- [12] RFI: Planungshandbuch – Tunnel, 2003; RFI: Manuale progettazione – Gallerie, 2003.

- [13] ITALFERR: Planungshandbuch, 1995, 2006; ITALFER: Manuale di progettazione, 1995, 2006.
- [14] ITALFERR: Technische Vorgaben zur Planung der Vorprojekte, der Einreichplanung und der Ausführungsplanung – Geologische, geomorphologische und hydrogeologische Untersuchungen; ITALFER: Prescrizioni tecniche per la progettazione preliminare, definitiva ed esecutiva – Studi geologici, geomorfologici ed idrogeologici.
- [15] ITALFERR: Technische Planungsvorgaben – Tunnel, 1995, 2003; ITALFERR, Prescrizioni Tecniche per la Progettazione – Sezione III – Prescrizioni Tecniche – Gallerie, 1995, 2003.
- [16] ITALFERR: Richtlinien zur Planung, zum Bau und zur Abnahme von neuen Eisenbahnbauten unter Tage, 1995; ITALFERR: Linee guida per la progettazione, la costruzione ed il collaudo di nuove opere ferroviarie in sotterraneo, 1995.
- [17] ANAS: Verdingungsordnung zur Planung des Einreichprojektes; ANAS: Capitolato d'oneri per la redazione del progetto definitivo.
- [18] SPEA: Richtlinien zur geotechnisch-geomechanischen Charakterisierung von Tunneln in bergmännischer Bauweise, 2005; SPEA: Linee guida alla caratterizzazione geotecnica-geomeccanica delle gallerie naturali, 2005.
- [19] SPEA: Richtlinien zur statischen Planung von Tunneln in bergmännischer Bauweise, 2004; SPEA: Linee guida alla progettazione statica delle gallerie naturali, 2004.
- Schweiz:
- [20] SIA 197:2004: Projektierung Tunnel – Grundlagen..
- [21] SIA 197/1:2004: Projektierung Tunnel – Bahntunnel..
- [22] SIA 197/2:2004: Projektierung Tunnel – Strassentunnel..
- [23] SIA 199:1998: Erfassen des Gebirges im Untertagebau.
- Weitere:
- [24] International Tunneling Association, Working Group No. 14, Preparation of the report „Guidelines for the selection of TBMs“, (ITA-Guideline) 1998.
- [25] Geotechnical Baseline Reports for Construction, Suggested Guidelines. ASCE, 2007.

8.2 Monografien

- [26] Marcher, T.; John, M.; Thapa, B. B.; McRae, M. T.: NATM Strategies In The U. S. – Initial Support Design for the Caldecott 4th Bore. In: World Tunnel Congress, Budapest, 2009.
- [27] Hoek, E.; Marinos, P.: Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. Tunnels and Tunnelling International, 2002.
- [28] Hoek, E.; Carranza-Torres, C.; Corkum, B.: Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition, 2002. www.rockscience.com.
- [29] Hoek, E.; Diederichs, M. S.: Empirical estimation of rock mass modulus, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 43, 203–215, 2006.
- [30] Hoek, E.; Carranza-Torres, C.; Diederichs, M. S., Corkum, B.: Kersten Lecture – Integration of geotechnical and structural design in tunneling. Proceedings University of Minnesota 56th Annual Geotechnical Engineering Conference, Minneapolis, 29 February 2008, 1–53, 2008.