

## **Die Gebirgscharakterisierung entsprechend der „Richtlinie für die Geomechanische Planung“ und ihre Anwendung bei den Projekten Semmeringbasistunnel und Koralmtunnel**

Goricki A.<sup>1</sup>, Schubert W.<sup>1</sup>, Riedmüller G.<sup>2</sup>

### **ZUSAMMENFASSUNG**

In dieser Arbeit wird die Anwendung der von der ÖGG herausgegebenen „Richtlinie für die Geomechanische Planung von Untertagebauarbeiten mit zyklischem Vortrieb“ im Bereich der Gebirgscharakterisierung behandelt. Auf Basis der in dieser Richtlinie verwendeten Begriffe wird die Systematik der Gebirgsbeschreibung erläutert. Der detaillierte Ablauf wird anhand der unterschiedlichen Vorgehensweise in der Planung und der Bauausführung kurz dargestellt. Die Umsetzung der Verfahrensabläufe entsprechend der Richtlinie wird anhand der Fallbeispiele Koralmtunnel und Semmering-Basistunnel gezeigt. Da sich die beiden Tunnelbauwerke in unterschiedlichen Planungsphasen befinden, kann der Einfluss von Projektstadium und Erkundungstiefe auf die Gebirgscharakterisierung verdeutlicht werden.

### **1 EINLEITUNG**

Im Zuge der Überarbeitung der Werkvertragsnorm ÖNORM B2203 [1] wurde der Teil der Gebirgscharakterisierung in die „Richtlinie für die Geomechanische Planung von Untertagebauarbeiten mit zyklischem Vortrieb“ [2] ausgegliedert. Die Richtlinie wurde von der ÖGG - Arbeitsgruppe Gebirgscharakterisierung unter der Leitung von Wulf Schubert erstellt und von der ÖGG im Oktober 2001 publiziert. In der neuen ÖNORM B2203-1 „Untertagebauarbeiten Teil 1: Zyklischer Vortrieb“ [3] wird in den entsprechenden Kapiteln des Abschnittes „Verfahrensbestimmungen“ auf diese Richtlinie verwiesen, wodurch sie Bestandteil der ÖNORM wird.

Die Richtlinie beschreibt den Ablauf der geomechanischen Planung als Summe aller bauvorbereitenden und baubegleitenden Maßnahmen und umfasst die Phasen der Entwurfs-, Ausschreibungs- und Ausführungsplanung. Die beschriebene Prozedur der geomechanischen Tunnelplanung gliedert sich in folgende Hauptelemente:

- Beschreibung des Gebirges
- Ermittlung und Beschreibung des Gebirgsverhaltens
- Ermittlung von Ausbruch und Stützung
- Umsetzung und Fortschreibung der Planung in den einzelnen Planungs- und Bauphasen.

In diesem Beitrag wird jener Teil der Richtlinie, der sich mit Gebirgscharakterisierung beschäftigt, dargestellt und die Anwendung der beschriebenen Methode anhand der Projekte Semmering-Basistunnel und Koralmtunnel gezeigt.

---

<sup>1</sup> DI. Andreas GORICKI, Univ.Prof.DI.Dr. Wulf SCHUBERT, Technische Universität Graz, Institut für Felsmechanik und Tunnelbau, A-8010 Graz, Rechbauerstr. 12, goricki@tugraz.at, schubert@tugraz.at

<sup>2</sup> Univ.Prof.Dr. Gunter RIEDMÜLLER †, Technische Universität Graz, Institut für Technische Geologie

## **2 GEBIRGSCHARAKTERISIERUNG ENTSPRECHEND DER „RICHTLINIE FÜR DIE GEOMECHANISCHE PLANUNG“**

Von grundlegender Bedeutung für die geomechanische Planung eines Tunnelbauwerkes ist die Kenntnis der Gebirgseigenschaften und der Wechselbeziehung zwischen Gebirge und Bauwerk. Da es nicht möglich erscheint, alle Eigenschaften des Gebirges vollständig im Voraus zu beschreiben und die komplexen Zusammenhänge der gegenseitigen Beeinflussung von Gebirge, Ausbruch und Stützung allgemein gültig festzulegen, wurde in der Richtlinie ein Ablauf zur Gebirgscharakterisierung entwickelt, der auf die Beschreibung der Gebirgseigenschaften und das damit in Zusammenhang stehende Gebirgsverhalten abzielt. Durch die vorgegebene, klar strukturierte und systematische Vorgehensweise ergibt sich neben der Nachvollziehbarkeit von Folgerungen und Entscheidungen auch die Möglichkeit, projekt- und gebirgsspezifische Besonderheiten in die Charakterisierung einfließen zu lassen.

Die Vorgaben bezüglich anzuwendender Methoden zur Parametererhebung und Gebirgsbeschreibung sowie zur Ermittlung abgeleiteter Parameter und des Gebirgsverhaltens wurden bewusst allgemein gehalten. Dadurch wird im Gegensatz zu bestehenden Klassifikationsverfahren ein hohes Maß an Anpassungsfähigkeit ermöglicht und eine breite Anwendbarkeit bei unterschiedlichsten Gebirgsverhältnissen und Randbedingungen gewährleistet. Dies bedeutet aber auch, dass ein existierendes Klassifikationssystem bei geeigneten Gebirgsverhältnissen und entsprechenden Voraussetzungen zur Anwendung kommen kann.

Die Vorgehensweise zur Gebirgscharakterisierung entsprechend der ÖGG - Richtlinie orientiert sich sehr stark an den jeweiligen Projektphasen, wobei grundlegend zwischen Planung und Bauausführung unterschieden wird.

In der Planungsphase liegt die Aufgabe der Gebirgscharakterisierung in der Prognose der zu erwartenden Gebirgseigenschaften und des Gebirgsverhaltens. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Bearbeitungstiefe können hier, besonders in frühen Planungsphasen, bestehende Gebirgsklassifikationsverfahren sehr gut in den Ablauf der geomechanischen Planung integriert werden.

Während der Bauausführung liegt der Schwerpunkt der Gebirgscharakterisierung auf der Erfassung der relevanten Gebirgseigenschaften sowie der Zuordnung des beobachteten Systemverhaltens zum jeweiligen Gebirgsverhaltenstyp. Aus dem Vergleich der Beobachtungen mit der Prognose und dem daraus resultierenden Informationsgewinn kann die Prognose für noch aufzufahrende Bereiche verfeinert werden, was zu einer kontinuierlichen Fortschreibung der Gebirgscharakterisierung und in weiterer Folge der geomechanischen Planung führt.

Mit Ausnahme einer klaren Trennung zwischen Gebirgs- und Systemverhalten unterscheiden sich die verwendeten Begriffe in der Richtlinie im Allgemeinen nicht von jenen der bisher gebräuchlichen alten ÖNORM B2203 Ausgabe 1994 [1]. Das Gebirgsverhalten und die daraus resultierenden Gebirgsverhaltenstypen beschreiben das Verhalten bzw. das Versagen des hohlraumumgebenden Gebirges nach dem Ausbruch ohne Berücksichtigung von Ausbruchsmethode, Abschlagslänge, Querschnittunterteilung oder Stützmaßnahmen. Erst das Systemverhalten bezieht sich auf das Verhalten des Systems „Gebirge und Baumaßnahme“. Durch diese klare Trennung von Ursache, Maßnahme und Wirkung ergibt sich zwangsläufig ein hierarchischer Ablauf der geomechanischen Planung.

## 2.1 Gebirgsart

Eine Gebirgsart ist nach Definition der Richtlinie ein „Gebirge mit gleichartigen Eigenschaften“. Zur quantitativen Beschreibung der Gebirgsart müssen neben der Eingrenzung des geotechnisch relevanten Gebirgsvolumens auch die tunnelbautechnisch relevanten Gebirgseigenschaften - die Schlüsselparameter - festgelegt werden. Diese können je nach Gesteinsart und Gebirgsbereich grundlegend unterschiedlich sein und beschreiben vorrangig jene Eigenschaften, die sich auf die Verhaltenscharakteristika des Gebirges bezüglich der sicheren und wirtschaftlichen Herstellung des Tunnelbauwerks beziehen. Es sind dies Parameter zur Beschreibung des Gebirges und des charakteristischen Verhaltens beim Ausbruch, Parameter der Standfestigkeit oder Parameter zur Charakterisierung zeitabhängiger Effekte. Dazu gehören Parameter bezüglich mineralogischer Zusammensetzung, Korngefüge, Trennflächeneigenschaften sowie mechanischer und hydraulischer Gesteins- und Gebirgseigenschaften. Die Tabelle 1 und der Anhang A (Gesteins- und Gebirgsparameter) der Richtlinie dienen als Hilfestellung bei der Auswahl und Festlegung von gebirgs- und projektspezifischen Schlüsselparametern.

Nach der Ermittlung tunnelbautechnisch relevanter Gesteinsarten werden Schlüsselparameter zugeordnet und daraus Gebirgsarten definiert. Die Kombination der verschiedenen Parameter bzw. der in Klassen eingeteilten Parameterwerte erfolgt in Abhängigkeit von den Gesteinsarten im Projektgebiet, von der Projektphase und der damit verbundenen Bearbeitungstiefe und Datenmenge sowie von der jeweiligen Fragestellung (Machbarkeit, Kosten, Stützmittelaufwand). Daraus ergeben sich Unterschiede in der Anzahl der Gebirgsarten bei verschiedenen Projekten oder Projektphasen, wobei darauf zu achten ist, dass die unterschiedlichen Gebirgsarten auch unterschiedliche Charakteristika im Verhalten des Gebirges beim Tunnelvortrieb repräsentieren. Es kann durchaus vorkommen, dass bei entsprechenden Voraussetzungen aus einer Vielzahl von Kombinationen von Gesteinsarten und Schlüsselparametern nur einige wenige Gebirgsarten resultieren. Das bedeutet, dass Abhängigkeiten und Korrelationen berücksichtigt werden müssen. Dies gilt ganz besonders bei der Verwendung von Laborwerten. Statistische Methoden zur Erfassung und Beschreibung von Daten können bei der Festlegung von Parameterwertgrenzen oder der Gruppierung von Gebirgsarten ein sehr hilfreiches Werkzeug darstellen. In der Richtlinie wird die Verwendung von statistischen Methoden vorgeschlagen, ohne konkrete Vorgaben zu definieren.

## 2.2 Gebirgsverhaltenstyp

Ein Gebirgsverhaltenstyp bezeichnet nach Definition der Richtlinie ein „Gebirge mit gleichartigem Verhalten in bezug auf Ausbruch, auf zeitliche und räumliche Verformungen und auf Versagensformen, ohne Berücksichtigung von Stütz- und Zusatzmaßnahmen“. Daraus ergibt sich der Bezug auf einen Tunnel mit unendlich langer Erstreckung im Vollprofil ohne den Einfluss von Baumaßnahmen wie Querschnittsuntereilungen, Abschlagslängen oder Stützmaßnahmen. Durch diese Festlegung erhält man gegenüber der bisherigen Definition des Gebirgstyps in der alten ÖNORM B2203 eine klare Trennung in das Verhalten des ungestützten Gebirges an sich und in die Beeinflussung des Verhaltens aufgrund von Maßnahmen jeglicher Art. Damit stellt der Gebirgsverhaltenstyp die Grundlage für die Planung des Vortriebsablaufes und der erforderlichen Stützmaßnahmen dar.

Zur Ermittlung der Gebirgsverhaltenstypen wird das Gebirge, in Form der ermittelten und beschriebenen Gebirgsarten, mit den jeweils vorherrschenden bzw. erwarteten Einflussfaktoren kombiniert und das Verhalten ermittelt. Die Einflussfaktoren sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1 Einflussfaktoren auf das Gebirgsverhalten

Einflussfaktoren		
Spannungsverhältnisse	Größe und Orientierung des Primärspannungszustandes (im unverritzten Gebirge)	
Form, Größe und Lage des Hohlraumes	Querschnittsform und Durchmesser des endgültigen Ausbauzustandes (die einzelnen Zwischenbauzustände werden nicht berücksichtigt)	
Trennflächenorientierung	Relative Orientierung des maßgebenden Trennflächengefüges zum Bauwerk	
Bergwasserverhältnisse	Menge, Strömungsdruck, hydrostatischer Druck	

Untersucht wird das Gebirge nun hinsichtlich der Versagenszustände und des Verformungsverhaltens. Dazu werden neben kinematischen Beurteilungen zur Feststellung von gefügebedingten Versagensmechanismen auch die vorherrschenden räumlichen Spannungsverhältnisse in Hohlraumumgebung bezüglich der Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Gebirges untersucht. Die Ermittlung von Bruchmechanismen ist von besonderer Bedeutung, da die Einteilung der Gebirgsverhaltenstypen auf den Bruch- bzw. Versagensmechanismen basiert. Dazu wird zumindest eine qualitative Beschreibung notwendig. Um Kinematik, Beanspruchung und mögliche Bruchmechanismen zu untersuchen, werden je nach Projektphase und Kenntnisstand verschiedene Methoden angewandt: Lagenkugel, Key Block Theorie, empirische, analytische und numerische Methoden ebenso wie Modellversuche und Erkenntnisse aus vergleichbaren Projekten. Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Ermittlung des Einflusses von unterschiedlichen Hohlraumquerschnitten auf das Gebirgsverhalten mit dem numerischen Programm UDEC [4]. Dargestellt sind die Verschiebungsvektoren. Durch die Änderung des Querschnittes (links: Vollausbuch; rechts: Ausbruch des Kalottenquerschnittes), bei sonst gleichen Bedingungen, zeigen sich deutliche Unterschiede im Verhalten des Gebirges bezüglich Verformungsverhalten und Menge der Ausbrüche im Ulmbereich.

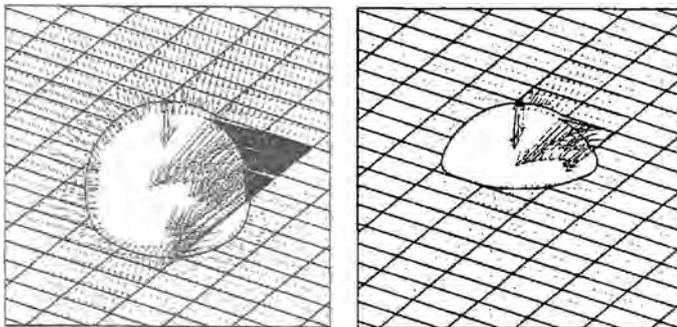


Abbildung 1 Ermittlung des Einflusses von Hohlraumform und Hohlraumgröße auf das Gebirgsverhalten mit UDEC [4]

Auf Grundlage des ermittelten Gebirgsverhaltens wird in weiterer Folge eine quantitative Unterteilung in Gebirgsverhaltenstypen vorgenommen. So kann beispielsweise das Ausmaß einer Radialverschiebung als Grenzwert für die Definition von Gebirgsverhaltenstypen herangezogen werden. Diese projektspezifische Unterteilung in Typen ist vorrangig von der auftretenden Bandbreite des Gebirgsverhaltens und der jeweiligen Projektphase bzw. der Bearbeitungstiefe abhängig. So wird in einer frühen Projektphase bei geringem Kenntnisstand eine grobe Unterteilung des Gebirgsverhaltens ausreichend sein, wobei mit Fortschritt des Projektes und bei zunehmender Bearbeitungstiefe eine Verfeinerung der Einteilung der Gebirgsverhaltenstypen anzustreben ist.

In jedem Projekt wird das Gebirgsverhalten objektiv und nachvollziehbar ermittelt. Um eine Vereinheitlichung der Abgrenzung und Benennung zu erreichen, wurden elf übergeordnete Kategorien von grundlegenden Gebirgsverhaltenstypen eingeführt. Die Einteilung der in Tabelle 2 beschriebenen übergeordneten Kategorien bezieht sich laut Richtlinie vorrangig auf unterschiedliche Versagensmechanismen. Die in einem Projektgebiet ermittelten Gebirgsverhaltenstypen werden diesen übergeordneten Kategorien zugeordnet. Ergeben sich mehrere Gebirgsverhaltenstypen in einer Kategorie, erfolgt eine Gliederung in Untergruppen.

**Tabelle 2 Übergeordnete Kategorien von Gebirgsverhaltenstypen lt. Richtlinie [2]**

GEBIRGSVERHALTENSTYPEN		Beschreibung des Gebirgsverhaltens (ohne Stützmaßnahmen)
1	Standfestes Gebirge	Standfestes Gebirge mit Potenzial zum schwerkraftbedingten Herausfallen oder Herausgleiten von kleinvolumigen Kluttkörpern
2	Gefügebedingte Nachbrüche	Tieferreichende gefüge- und schwerkraftbedingte Nachbrüche, vereinzelt lokales Überschreiten der Scherfestigkeit an Trennflächen
3	Hohlraumnahe Überbeanspruchung	Spannungsbedingte Entfestigung bzw. Plastifizierung des Gebirges in Hohlraumumgebung in Kombination mit gefügebedingten Nachbrüchen
4	Tieferreichende Überbeanspruchung	Spannungsbedingte tieferreichende Entfestigung bzw. Plastifizierung im Gebirge mit großen Deformationen
5	Bergschlag	Plötzliche Ablösungen zufolge hoher Spannungen in Kombination mit sprödem Gebirge
6	Schichtknicken	Knicken von schlanken Platten, häufig in Kombination mit Scherversagen
7	Scherversagen bei geringem Spannungsniveau	Potenzial zu großvolumigen Nachbrüchen und progressivem Scherversagen infolge geringer Verspannung
8	Rolliges Gebirge	Ausfließen von meist kohäsionslosem, trockenem bis feuchtem Gebirge
9	Fließendes Gebirge	Ausfließen von Gebirge mit hohem Wassergehalt
10	Quellendes Gebirge	Zeitabhängige Volumszunahme des Gebirges durch physikalisch-chemische Reaktion von Gebirge und Wasser in Kombination mit Entspannung
11	Gebirge mit rasch wechselnden Verformungseigenschaften	Starke Variation von Spannungen und Deformationen bedingt durch Block-Matrix Struktur (z. B. heterogene Störungzonen, tektonische Melange)

Auf Basis der kategorisierten Gebirgsverhaltenstypen bzw. der zur Ermittlung des Verhaltens des unendlich langen, unausgebauten Hohlraums angestellten Überlegungen und Berechnungen können in weiterer Folge die für die Herstellung eines wirtschaftlichen und sicheren Bauwerks sinnvollen bautechnischen Maßnahmen abgeleitet werden.

### 2.3 Systemverhalten

Das Systemverhalten ist nicht direkt Inhalt der Gebirgscharakterisierung. Um jedoch die einzelnen Begriffe und Arbeitsschritte in ihrer Gesamtheit abzugrenzen, wird der Begriff des Systemverhaltens hier kurz erläutert.

Das Systemverhalten beschreibt nach Definition der Richtlinie „das Verhalten des Gesamtsystems resultierend aus Gebirge und gewählten Baumaßnahmen“. Zur Ermittlung des Systemverhaltens werden die auf den projektspezifischen Gebirgsverhaltenstypen basierenden notwendigen Baumaßnahmen (Ausbruch, Stützung, Bauablauf, Gebirgsverbesserung, Wasserhaltung, usw.) festgelegt und die Auswirkungen auf das Verhalten des Gesamtsystems Gebirge - Bauablauf - Ausbau untersucht. Die eigentliche Ermittlung des Verhaltens erfolgt, wie bereits im Kapitel „Gebirgsverhaltenstypen“ beschrieben, mit analytischen und numerischen Methoden, sowie mit vergleichenden Untersuchungen auf Grundlage der Erfahrung von ähnlichen Bauwerken. Das Systemverhalten beschreibt neben der Standsicherheit in allen Bauzuständen und Verschiebungen des Hohlraumrandes (Gebrauchstauglichkeit, Verträglichkeit, usw.) auch Auswirkungen auf die Umwelt (Oberflächensetzungen, Erschütterungen, Quellschüttungen, usw.).

In Tabelle 3 sind die wichtigsten Begriffe für die Gebirgscharakterisierung aus der Richtlinie zusammengestellt. Neben der Zuordnung der zugrunde liegenden Daten werden die einzelnen Begriffe kurz beschrieben.

**Tabelle 3 Zusammenstellung der wichtigsten Begriffe der Gebirgscharakterisierung der Richtlinie für die geomechanische Planung [2]**

Bezeichnung	Datengrundlage	Beschreibung
Gebirgsart	Schlüsselparameter	gleichartige Eigenschaften des Gebirges
Gebirgsverhaltenstyp	Gebirgsart, Einflussfaktoren	gleichartiges Verhalten des Gebirges
Systemverhalten	Gebirgsverhaltenstyp, bautechnische Maßnahmen (Ausbruch, Stützung, Bauablauf)	Verhalten des durch Maßnahmen beeinflussten Systems

### 2.4 Ablauf der Gebirgscharakterisierung bei Planung und Bauausführung

Die geomechanische Planung ist begleitender Bestandteil der Entwicklung jedes Tunnelbauprojektes. Dies bezieht sich sowohl auf die Phasen der Planung und Bauvorbereitung wie auch auf die eigentliche Bauausführung. Durch den hierarchischen Charakter der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Begriffe ergibt sich ein strukturierter Ablauf bei der Gebirgsbeschreibung. Diese ist integrativer Bestandteil der Prozessabläufe in der geomechanischen Planung. Eine ausführliche Beschreibung erfolgt in der Richtlinie anhand von Flussdiagrammen.

Im Folgenden werden die Unterschiede der Abläufe bei der Gebirgscharakterisierung in der Planungsphase sowie während der Bauausführung dargelegt. In Tabelle 4 ist der Vorgang der Festlegung von Ausbruch und Stützung für die verschiedenen Projektphasen tabellarisch zusammengestellt.

**Tabelle 4 Zusammenstellung des Ablaufes der Festlegung von Ausbruch und Stützung in Planung und Bauausführung**

Schritt	genereller Ablauf	Ablauf Planung	Ablauf Bauausführung
1	Gesteinsart Schlüsselparameter	Definition und Erhebung	Identifikation und Aufnahme von gebirgsartenspezifischen Parametern
	Gebirgsart	Bestimmung der Gebirgsarten	Aktualisierung und Verfeinerung der prognostizierten Gebirgsart
2	Einflussfaktoren	Erhebung der relevanten Faktoren	Rückschließen auf die Parameter aufgrund des beobachteten Systemverhaltens im Vortrieb
	Gebirgsverhaltenstyp	Ermittlung des Gebirgsverhaltens und Bestimmung der Gebirgsverhaltenstypen	Aktualisieren der Prognosemodelle, Bestimmung des aktuellen Gebirgsverhaltenstyps aufgrund des beobachteten Systemverhaltens und Kurzzeitprognose
3	Ausbruch und Stützung	Rahmenfestlegung von Ausbruch und Stützung	Festlegung von Ausbruch und Stützung
	Systemverhalten	Ermittlung des Systemverhaltens	Überprüfung des Systemverhaltens

Der erste Schritt der Gebirgscharakterisierung ist die Beschreibung der Gebirgseigenschaften und die Bestimmung der Gebirgsarten. Dazu werden die Gesteinsarten bestimmt und die geomechanisch relevanten Parameter – die Schlüsselparameter – definiert und deren Wertebereiche erhoben. Der Bearbeitungsumfang und der Detaillierungsgrad der erforderlichen Untersuchungen orientieren sich stark an der jeweiligen Planungsphase. Je detaillierter die Schlüsselparameter erhoben sind, umso gezielter erfolgt eine Unterteilung in Gebirgsarten erfolgen. Während der Bauausführung richtet sich das Hauptaugenmerk auf die Fortschreibung der Planung und damit auf die Überprüfung, Verfeinerung oder Ergänzung der Prognosedaten bzw. der eigentlichen Prognose. Dazu werden die vor Ort feststellbaren Schlüsselparameter im Rahmen der baubegleitenden geologischen Dokumentation erhoben. Durch die Festlegung entsprechender Kriterien wird dann das Gebirge in Gebirgsarten eingeteilt. Dabei ist zu beachten, dass die geologisch-geotechnischen Eigenschaften jenes Gebirgsvolumens zu beschreiben sind, die für das Gebirgsverhalten maßgeblich sind. Die Datenerhebung im Vortriebsbereich dient also als Basis für die Extrapolation auf das hohlraumumgebende Gebirge.

Im zweiten Schritt werden jenen Faktoren, die Einfluss auf das Gebirgsverhalten haben, erhoben und mit den Gebirgsarten kombiniert. Darauf aufbauend wird das Verhalten der unausgebauten Ausbrüche im Vollprofil mit langer Erstreckung untersucht. In den Planungsphasen dienen, nach der Einteilung in Typen und der Zuordnung in übergeordnete Kategorien, die so erhaltenen Gebirgsverhaltenstypen als Grundlage für die Entwicklung bautechnischer Maßnahmen und Konzepte. Beim Tunnelvortrieb ist es möglich, Einflussfaktoren wie Bergwasserverhältnisse, Gefügesituation oder Spannungsverhältnisse zu beobachten oder auf diese indirekt rückzuschließen. Mit der verbesserten Kenntnis der Einflussfaktoren sowie den zusätzlichen Beobachtungs- und Messergebnissen können die zugrunde liegenden Prognosemodelle laufend aktualisiert werden. Dies führt zu einer verbesserten Kurzzeitprognose des unmittelbar vor der Ortsbrust anstehenden Gebirges und zu einer genaueren Zuordnung des aktuellen Gebirgsverhaltenstyps für die nächsten Abschlüsse. Aufgrund des Einflusses des Bauablaufes kann selbst bei Tunnelvortrieben im ungestützten standfesten Gebirge nicht der Gebirgsverhaltenstyp direkt, sondern nur des Systemverhalten beobachtet werden. Von diesem muss dann auf das Gebirgsverhalten rückgeschlossen werden, um die Vergleichbarkeit mit den Modellen der Planung

herzustellen. Auf diese Weise kann das Gebirgsmodell während des Baues entsprechend der tatsächlich angetroffenen Verhältnisse laufend verfeinert bzw. aktualisiert werden.

Bezogen auf die anstehenden Gebirgsverhältnisse, repräsentiert durch die Gebirgsverhaltenstypen, erfolgt im dritten Schritt die Festlegung der Baumassnahmen. Dabei werden im Rahmen der Planung Bauweisen und/oder Stützmittel so lange variiert, bis eine Übereinstimmung zwischen dem aus Gebirgsverhalten und gewählter Baumaßnahme ermittelten Systemverhalten und den definierten Anforderungen erzielt wird. Beim Bau werden auf Basis aller gewonnenen Erkenntnisse aus Beobachtung, Detailanalyse und Aktualisierung der Prognosemodelle die bautechnischen Maßnahmen, entsprechend den Rahmenvorgaben, für das Auffahren des anstehenden Gebirges festgelegt und das zu erwartende Systemverhalten prognostiziert.

Aus dem beschriebenen Ablauf wird deutlich, dass sich der Aufgabenbereich des Baustellengeologen neben der baugeologischen Dokumentation auch auf die Bestimmung der Gebirgsarten als Grundlage der Zuordnung des Gebirgsverhaltenstyps sowie auf die laufende Modellierung und Kurzzeitprognose der geologischen Situation erstreckt. Diese Daten bilden eine Grundlage für die Überprüfung des Prognosemodells und die Interpretation geotechnischer Messungen zur Beurteilung des Systemverhaltens.

### 3 FALLBEISPIELE

#### 3.1 Koralmtunnel

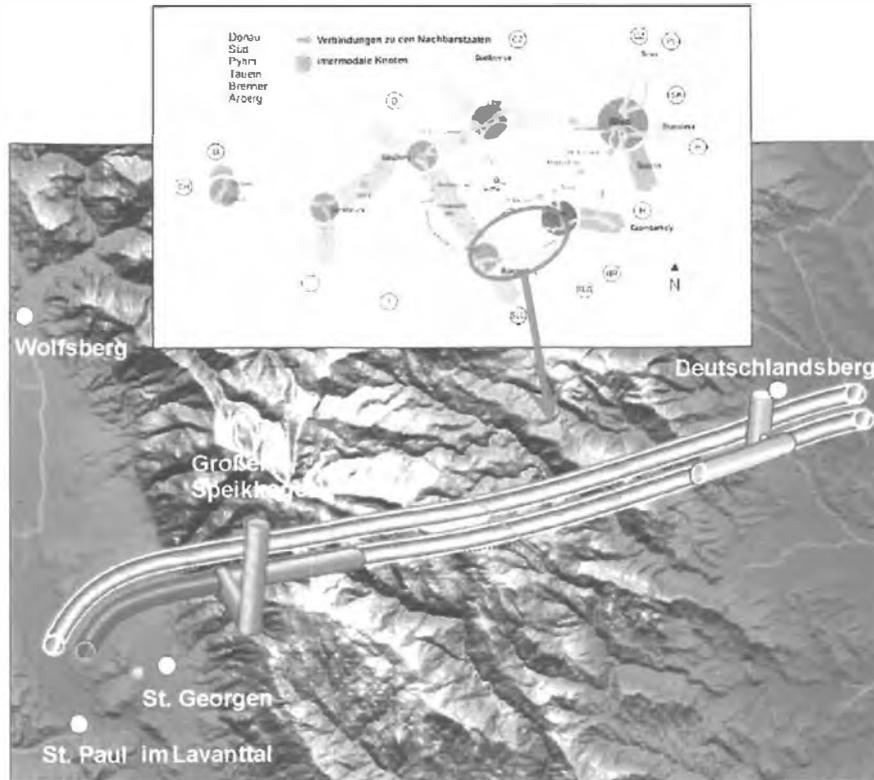
##### 3.1.1 Projektbeschreibung

Die Koralmbahn ist ein wichtiger Streckenabschnitt der „Neuen Südbahn“ und damit ein Baustein zur Umsetzung des TEN – Transeuropean Network. Die Hochgeschwindigkeitsverbindung ist Teil der Pontebbana-Route und schafft als östlichste Alpenquerung neben der international wichtigen Verbindung zwischen dem nördlichen Osteuropa und Norditalien auch eine deutlich verbesserte verkehrstechnische Anbindung des südösterreichischen Wirtschaftsraumes [5].

Das Schlüsselbauwerk der Verbindung Steiermark – Kärnten ist der Koralmtunnel mit einer Länge von rund 32,8 km und einer maximalen Überlagerung von 1250 m. Es wurden zwei Einspurröhren mit einem Ausbruchsquerschnitt von rund 80 m<sup>2</sup>, Querschläge alle 500 m und eine Überleitstelle mit anschließender Nothaltestelle etwa in Tunnelmitte als Tunnelsystem festgelegt [6]. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt in einem generellen Überblick die Hauptkorridore des hochrangigen Verkehrsnetzes Österreichs (aus [7]) und eine schematische Darstellung des geplanten Tunnels sowie der Erkundungstunnel.

##### 3.1.2 Geologischer Überblick

Der Hauptteil des Koralmtunnels ist im polymetamorphen kristallinen Grundgebirge situiert, das vorwiegend durch verschiedene Gneistypen und Glimmerschiefer gebildet wird und untergeordnet auch Quarzite, Amphibolite, Eklogite und Marmore aufweist. Das Gebirgsmassiv wird auf beiden Seiten von extensionalen Störungssystemen begrenzt, wobei das Lavanttalstörungssystem auf der Westseite stärker ausgeprägt und dadurch von größerer tunnelbautechnischer Bedeutung ist. In den tektonischen Becken haben sich mächtige tertiäre Sand- und Schluffsteinlagen gebildet.



**Abbildung 2 Lage des Koralmtunnels (schematisch)**

### 3.1.3 Erkundung

Die in dieser Arbeit beschriebene Gebirgscharakterisierung bezieht sich auf die Projektphase der UVE/UVP. Die verwendeten Daten stammen dementsprechend aus den verschiedenen Erkundungskampagnen, die im Laufe der Projektentwicklung durchgeführt wurden [8], [9], [10].

Vorrangig bei Auswahl der Erkundungsstrategie sowie der einzelnen Erkundungsmethoden war die Erstellung eines dreidimensionalen geologisch-geotechnischen Modells. Dazu wurden die umfangreichen geologischen Kartierungen durch eine Vielzahl von Erkundungsbohrungen ergänzt. Zusätzliche In-situ Versuche wie hydraulische Messungen, Spannungsmessungen oder geophysikalische Untersuchungen (Refraktionseismik, Geoelektik, usw.) lieferten zusätzlich Informationen, um das räumliche Gebirgsmodell zu verifizieren, zu vervollständigen oder zu verfeinern. An zahlreichen ausgewählten Kernstücken wurden Laborversuche zur Bestimmung der mineralogischen und mechanischen Eigenschaften durchgeführt.

Die Darstellungen in Abbildung 3 zeigen Ergebnisse der 3-D Modellierung des Projektgebietes. Von signifikanter Bedeutung ist dabei die räumliche Zuordnung der, für die Beschreibung des Gebirgsverhaltens notwendigen Parameter. Dadurch wird beispielsweise die Erstellung verschiedener Schnitte möglich, die einzelne Schlüsselparameter beinhalten.

In Abbildung 4 ist zusätzlich zum geologischen Oberflächenmodell ein Horizontalschnitt auf Tunnelniveau generiert, der den Parameter Lithologie für den gesamten Verlauf des Tunnels beinhaltet. Neben der Lithologie wurden auch alle anderen im Projektgebiet erhobenen Daten nach diesem Prinzip verarbeitet. Ein weiterer Vorteil dieser Art der Bearbeitung ist die rasche und einfache Verarbeitung von Informationszugewinnen während der Projektentwicklung.

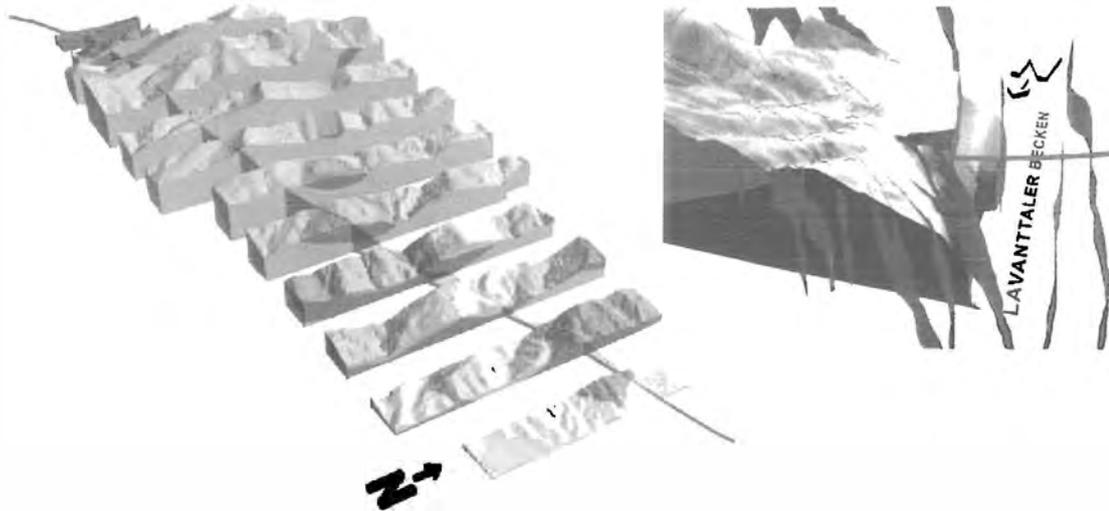


Abbildung 3 3-D Modellierung des Projektgebietes

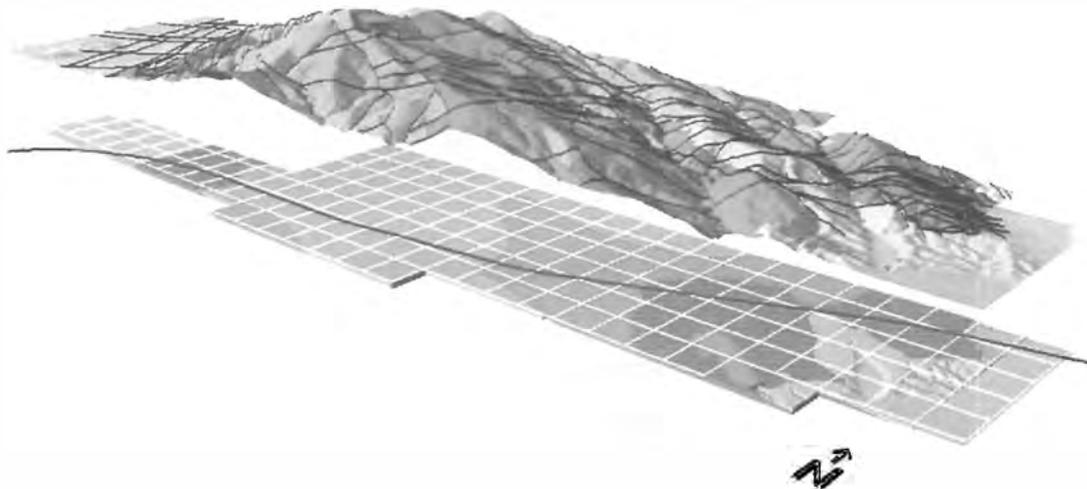


Abbildung 4 Horizontalschnitt auf Tunnelniveau

### 3.1.4 Gebirgscharakterisierung

Zur Ermittlung der Gebirgsarten wurden die Parameter Lithologie, Isotropie, Verwitterung, Zerlegung, einaxiale Druckfestigkeit und Abrasivität als geotechnisch maßgebende Schlüsselparameter festgelegt. Neben der quantitativen Bestimmung der Parameterwerte wurde zusätzlich der GSI (Geological Strength Index nach Hoek [11]) abgeschätzt. Dieser, auf Grundlage von Gebirgszerlegung und Trennflächeneigenschaften abgeschätzte Indexwert, dient gemeinsam mit den Gesteinskennwerten aus Laborversuchen als Grundlage für die Ermittlung der Gebirgsfestigkeiten.

**Tabelle 5 Gebirgsarten und zugehörige Parameter**

Gebirgsart	Lithologie	Anisotropie		Verwitterung	Verkarstung	Zerlegung [cm]					UCS [MPa]					Abrasivität		GSI		
		anisotrop	isotrop			gering bis nicht verändert	verändert (merkliche Festigkeitsänderung)	keine oder geringe Lösungssicherungen	Verkarstet	>100	100-20	20-5	<5	<5	5-15	15-40	40-80		80-150	150-250
1	Glimmerschiefer - Schiefergneisfolge	■	■	■															■	75 - 90
2		■		■															■	60 - 75
3		■		■															■	45 - 60
4		■		■															■	75 - 90
5		■		■															■	60 - 75
6		■		■															■	45 - 60
7		■		■															■	75 - 90
8		■		■															■	60 - 75
9		■		■															■	45 - 60
10		■		■															■	75 - 90
11		■		■															■	60 - 75
12		■		■															■	45 - 60
13		■		■															■	50 - 60
14		■		■															■	40 - 50
15		■		■															■	30 - 40
4	Feinkorngneisfolge	■		■															■	75 - 90
5		■		■															■	60 - 75
6		■		■															■	45 - 60
7		■		■															■	75 - 90
8		■		■															■	60 - 75
9		■		■															■	45 - 60

Die Unterteilung in Gebirgsarten ergibt sich aus unterschiedlichen Kombinationen von Werten (bzw. Wertbereichen) verschiedener Schlüsselparameter. In Tabelle 5 ist ein Teil dieser Zuordnung von erwarteten projektspezifischen Gesteins- und Gebirgseigenschaften auf Gebirgsarten dargestellt. Dabei zeigt sich, dass Gebirgsbereiche mit ähnlichen Eigenschaften unabhängig von der unterschiedlichen Benennung aufgrund des zu erwartenden geotechnischen Verhaltens gleichen Gebirgsarten zugewiesen werden können.

Zur Beurteilung des Gebirgsverhaltens wurden in weiterer Folge die Einflussfaktoren quantifiziert. Unter der Annahme eines maschinellen Vortriebes ergibt sich als Grundlage für die weiteren Untersuchungen ein kreisförmiger Ausbruch. Die Spannungssituation wurde entsprechend der Überlagerungshöhe und der durchgeführten indirekten Spannungsmessungen abgeschätzt. Zur Ermittlung der relativen Orientierung des Trennflächengefüges zum Bauwerk wurden die Gefügedaten dem dreidimensionalen geologischen Modell entnommen, in Wertebereiche unterteilt und den einzelnen Tunnelabschnitten zugewiesen. Eine hydraulisch-geothermale Modellierung ermöglicht Aussagen über Menge und Druck von Bergwasserzutritten [12].

In Abbildung 5 sind Ergebnisse des 3D-Finite-Elemente-Modells dargestellt. Links ist ein Beispiel für die stationäre Änderung der hydraulischen Druckhöhe an der Oberfläche über der Tunnelachse dargestellt, das Diagramm im rechten Teil der Abbildung zeigt den kurzzeitigen Tunnelzufluss als Abschätzung aus dem regionalen Modell.

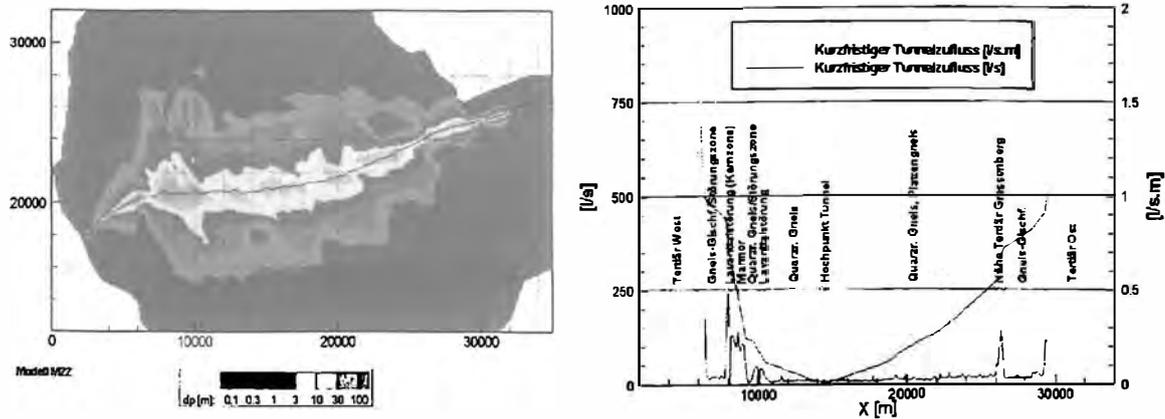


Abbildung 5 Ergebnisse der hydraulisch-geothermalen Modellierung aus [12]

Auf Grundlage der Schlüsselparameter der Gebirgsarten und der Einflussfaktoren wurde das Gebirgsverhalten ermittelt. Aufgrund verschiedener Einflüsse wie Projektphase, Prognostizierbarkeit oder Priorität für die Projektentwicklung lagen die Eingangsdaten verschiedener Tunnelabschnitte in unterschiedlicher Qualität und Quantität vor. Daher war es wichtig, die Daten entsprechend ihrer zu erwartenden natürlichen Bandbreite und ihrer Prognoseunsicherheit zu streuen [13].

Auf Basis einfacher analytischer Modelle wurden Hohlraumverschiebungen und Bruchzontiefen abgeschätzt. Im linken Teil der Abbildung 6 sind die errechneten Bruchzontiefen entlang der Tunnelachse dargestellt. Das Diagramm zeigt jeweils die ermittelten Ober- und Untergrenzen der einzelnen Rechanquerschnitte. Die Bereiche zwischen den jeweiligen Grenzen repräsentieren mögliche Wertebereiche aufgrund der Streuungen der Eingangsdaten.

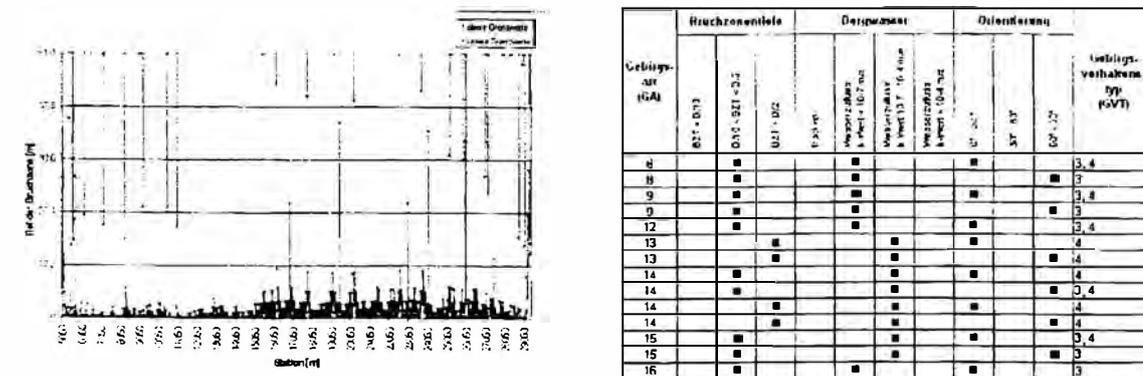


Abbildung 6 Bereiche von Bruchzontiefen entlang der Tunnelachse und Auszug aus der tabellarischen Zusammenstellung der Parameter der Gebirgsverhaltenstypen

Entsprechend ihrem erwartenden Auftreten im Projektgebiet wurden die einzelnen Parameter kombiniert, das Gebirgsverhalten ermittelt und in die übergeordneten Kategorien der Gebirgsverhaltenstypen eingeteilt. Die Tabelle auf der rechten Seite der Abbildung 6 zeigt jene Parameter die zur Ermittlung des Gebirgsverhaltens herangezogen wurden:

- Gebirgsarten mit den zugehörigen Schlüsselparametern
- Gebirgsdurchlässigkeiten als Parameter zur Beurteilung der Bergwasserverhältnisse



## 3.2 Beispiel Semmering-Basistunnel

### 3.2.1 Projektbeschreibung und kurzer geologischer Überblick

Der Semmering Basistunnel ist, wie der zuvor beschriebene Koralmtunnel als Teil der „Neuen Südbahn“ ein Streckenabschnitt des übergeordneten europäischen Eisenbahn-Hochgeschwindigkeitsnetzes und soll die traditionsreiche Eisenbahnlinie über den Semmering entlasten. Mit einer Länge von rund 22 km würde der Tunnel eine den modernen Anforderungen einer Hochleistungsstrecke entsprechende Verbindung zwischen Niederösterreich und der Steiermark darstellen [14].

Der Tunnel durchörtert verschiedene geologische Großeinheiten am Nordostsporn der Zentralalpen. Von Gloggnitz im Norden nach Mürzzuschlag im Süden sind dies die oberostalpine Grauwackenzone, gegliedert in die altpaläozoische Norische und die jungpaläozoische Veitscher Decke sowie das unterostalpine Stockwerk, bestehend aus einem polymetamorphen, kristallinen Grundgebirge mit einer alpidisch metamorphen, permomesozoischen Sedimenthülle. Neben dem großräumigen Deckenbau finden sich lokale Verschuppungen und Verfaltungen. Von großer bautechnischer Bedeutung sind junge tektonische Störungen, deren Aktivität eine erhebliche Festigkeitsminderung des Gebirges bewirkte [15].

### 3.2.2 Erkundung

In den verschiedenen Erkundungskampagnen von der Trassenauswahl bis zum Ausschreibungsprojekt wurden die geologischen, hydrogeologischen und geotechnischen Gegebenheiten erkundet. Neben Kartierungen, Kernbohrungen, geophysikalischen Untersuchungen sowie Labor- Feld- und Bohrlochversuchen wurde ein 4300m langer Pilotstollen aufgeföhren, durch den die Modellvorstellungen verifiziert und detaillierte Informationen gewonnen werden konnten. Die Daten wurden in einem 3D GIS-Modell verarbeitet [16]. Abbildung 8 zeigt einen Teil des räumlichen Modells mit einem Horizontal- und einem Vertikalschnitt entlang der Tunnelachse und einen Ausschnitt aus dem Störungsmodell.

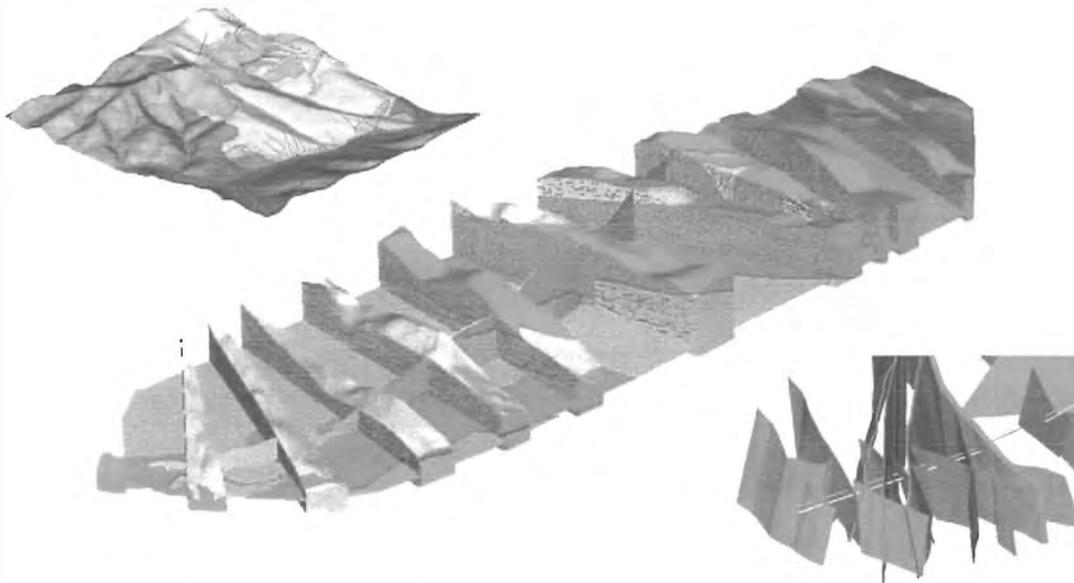


Abbildung 8 Ausschnitte aus dem 3D-Modell des Projektgebietes

Die während der Herstellung des Pilotstollens erhobenen Daten wurden in einer speziell für diese Anwendung entwickelte Datenbank verwaltet [17]. Diese Art der Datenverwaltung war aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten der Auswertung eine wichtige Grundlage für die Zuordnung und Einteilung des heterogenen Gebirges in Gebirgsarten.

Die ausführliche Beschreibung der Erkundungsstrategie bzw. der Erkundungsmaßnahmen war nicht Ziel dieser Arbeit und kann der Literatur entnommen werden [18, 19, 20].

### 3.2.3 Gebirgscharakterisierung

Die im Folgenden beschriebene Gebirgscharakterisierung diente als Grundlage für die Ausschreibungsplanung. Aufgrund der großen Heterogenität des Gebirges im Projektgebiet wurde versucht die geotechnisch relevanten Gebirgseigenschaften durch eine ausreichende Anzahl von Parametern zu beschreiben. Folgende Schlüsselparameter wurden festgelegt: Gesteinsarten, Schieferung/Anisotropie, Klufkörpergröße, Trennflächencharakteristik und felsmechanische Kennwerte.

Neben beobachteten Parametern kommen zur Gebirgsbeschreibung auch errechnete Parameter zur Anwendung. Die Ermittlung der Gebirgsfestigkeiten wurde entsprechend den Ansätzen von Hoek [11] mit Hilfe des GSI (Geological Strength Index) durchgeführt. Der GSI-Wert stellt einen Abminderungsfaktor von Gesteins- auf Gebirgsfestigkeiten dar und wurde für die jeweiligen Gebirgsbereiche geschätzt und im Bereich des Pilotstollens durch Rückrechnungen kalibriert.

Aus der Auswertung der im Laufe der Projektentwicklung erhobenen Daten wurden für das Tunnelprojekt 21 Gebirgsarten bestimmt. Der Detaillierungsgrad dieser Gliederung und damit die Anzahl der Gebirgsarten ist von Gebietsgröße, Bearbeitungstiefe und Aufgabenstellung abhängig und hat sich im Zuge der Projektentwicklung verändert. Die einzelnen Gebirgsarten mit den jeweils zugehörigen Wertebereichen wurden in tabellarischer Form ausgearbeitet. Beispielhaft ist in Tabelle 6 eine solche Zusammenstellung für Phyllit mit einer Aufgliederung der einzelnen Parameter dargestellt. Dabei wurden die Gebirgskennwerte auf Basis des oben beschriebenen Schätzwertes GSI und der im Labor gemessenen Gesteinskennwerte ermittelt.

Auf Grundlage der Gebirgsarten und den ermittelten Einflussfaktoren wurde entsprechend der systematischen Vorgehensweise zur Gebirgscharakterisierung das Gebirgsverhalten ermittelt. Auch dabei spielen die aus dem Pilotstollen gewonnenen Informationen und Erkenntnisse eine wichtige Rolle. Beim Vortrieb wurde nicht nur das Gebirge detailliert erfasst, sondern auch das Systemverhalten „Gebirge-Ausbruch-Ausbau“ beobachtet. Mit Hilfe der Beobachtungen von Bergwasserzutritten, dem Ausbruchverhalten oder dem Verformungsverhalten des Gebirges kann man auf das Gebirgsverhalten rückschließen. Dieses Gebirgsverhalten wiederum bildet den Ausgangspunkt für die Extrapolation bzw. Prognose auf das Systemverhalten des Hauptvortriebes. So wurden beispielsweise für den gesamten Tunnel Verformungsberechnungen durchgeführt, die an den Daten des aufgefahrenen Pilotstollens und der Aufweitungsstrecken kalibriert und auf den Hauptvortrieb extrapoliert wurden.

Die möglichen Versagensmechanismen sind das entscheidende Kriterium bei der Gliederung der Verhaltenstypen. Darum wurden vor der Entwicklung von Vortriebs- und Ausbaukonzepten mögliche Versagensmechanismen aufgrund der Beobachtungen beim Vortrieb des Pilotstollens untersucht. Abbildung zeigt beispielhaft Ergebnisse von numerischen Berechnungen [21] und Modellversuchen [22] zur Ermittlung des Verhaltens von anisotropem Gebirge unter hoher Primärspannung.

Tabelle 6 Parameter der Gebirgsart 15

GA 15			
Lithologie	Phyllit		
Schieferung/Anisotropie	<6 cm / hoch anisotrop		
Kluftkörpergröße	< 20 cm		
TF-Beschaffenheit	sf: teilweise schmierig, K: rau		
Trennflächenausbisslänge	überwiegend niedrig		
Öffnung	überwiegend geschlossen		
<b>Gesteinskennwerte</b>	Mittelwert	Standardabweichung	Versuchszahl
UCS [MPa]	28,2	13,6	19
$m_i$ [-]	14,5	6,0	6
c [MPa]	10,8	3,1	6
$\varphi$ [°]	31,7	1,5	6
E [GPa]	26,7	19,1	18
$\nu$ [-]	0,43	0,18	5
CAI [-]	2,5 bis 3		
<b>Trennflächenkennwerte</b>	Mittelwert	Standardabweichung	Versuchszahl
Reibungswinkel [°]	33,7	6,3	15
Restreibungswinkel [°]	28,5	5,6	23
<b>Gebirgskennwerte</b>	Mittelwert /	Standardabweichung	
GSI [-]	40	5	
UCS [MPa]	3,9	2,0	
c [MPa]	1,1	0,5	
$\varphi$ [°]	31,3	3,6	
E [GPa]	3,0	1,0	



..... schattiert unterlegte Werte sind Schätzwerte

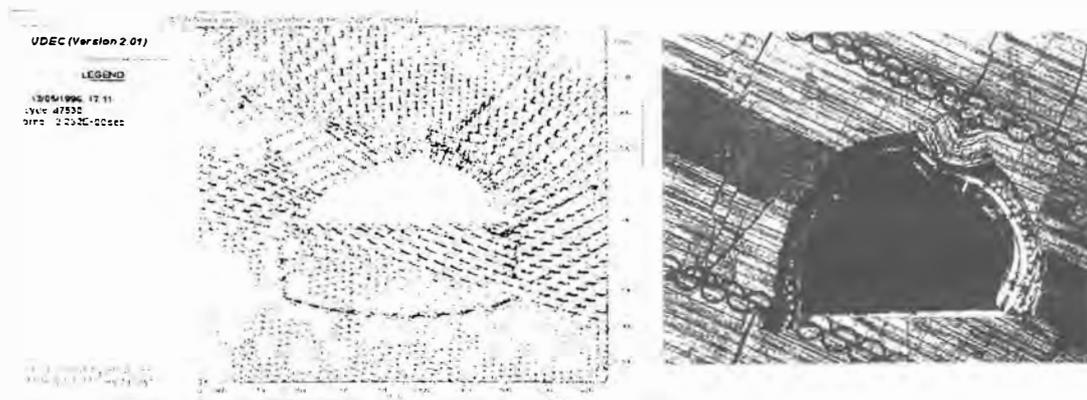
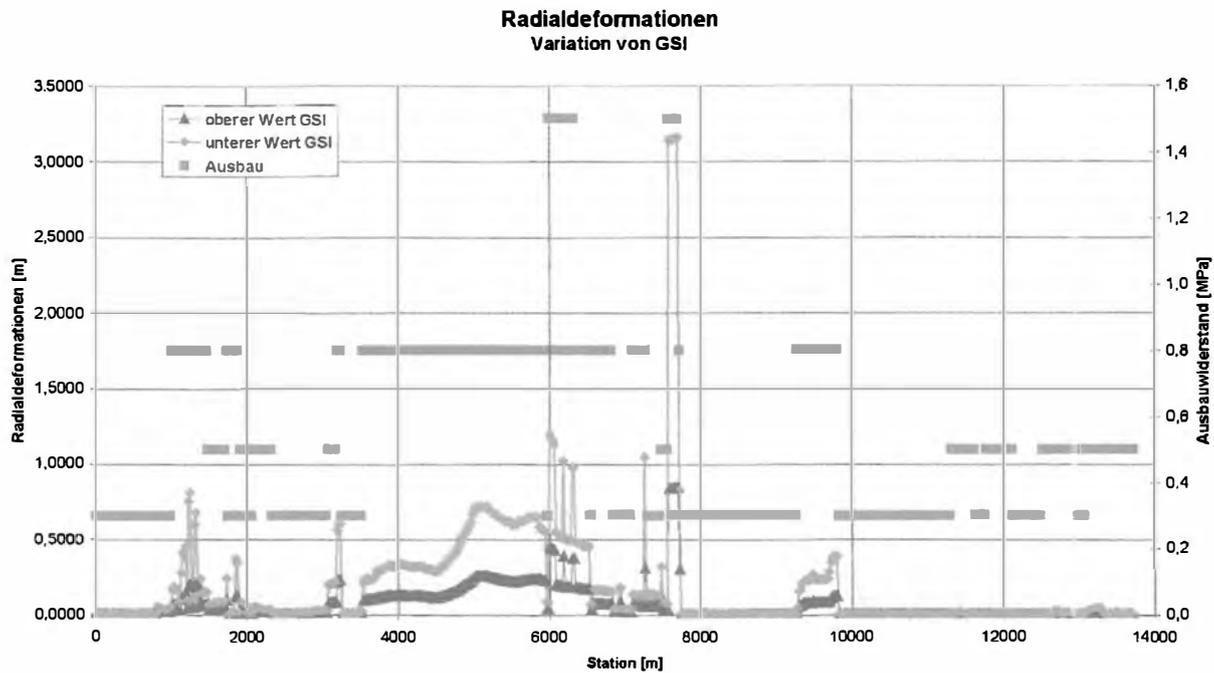


Abbildung 9 Versagensmechanismen im Phyllit

Im Diagramm der Abbildung 10 sind die Ergebnisse einer vereinfachten Berechnung der Verschiebungen für den Hauptvortrieb des Semmering Basistunnels unter Berücksichtigung des Ausbaues dargestellt. Die analytische Berechnung nach Hoek [23] wurde an den Daten des Pilotstollens und an einzelnen numerischen Referenzberechnungen kalibriert. Durch die Variation des GSI wurden die Gebirgskennwerte verändert, wodurch sich bei den errechneten Verschiebungen obere und untere Grenzwerte ergeben. Die Rückrechnungen des Systemverhaltens dienten als Hilfsmittel zur Ermittlung des Gebirgsverhaltens. Die Planung der Baumaßnahmen für den Hauptvortrieb erfolgte in einem gesonderten Prozess.

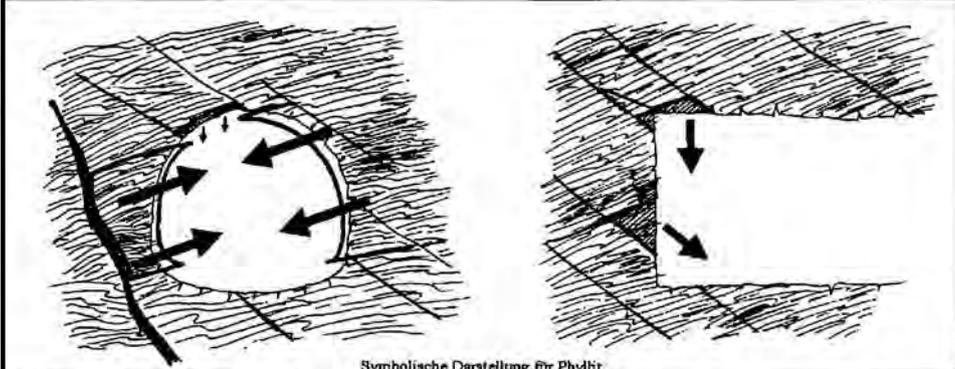


**Abbildung 10 Verschiebungsprognose für den Hauptvortrieb**

Zur eigentlichen Bestimmung der Gebirgsverhaltenstypen wurden Untersuchungen von Löse-, Ausbruch- und Nachbruchverhalten, Beeinflussung durch Bergwässer, Gebirgsauslastung, Verformungsverhalten inklusive Quellpotential sowie Bruchmechanismen durchgeführt. Auf Basis dieser Ergebnisse erfolgte zuerst eine Einteilung und Beschreibung der verschiedenen Typen und dann eine Zuordnung in übergeordnete Kategorien.

In Tabelle 7 ist ein prognostizierter Gebirgsverhaltenstyp beschrieben. Es findet sich neben einer Auflistung der Gebirgsart(en), der qualitativen Beschreibung der Einflussfaktoren und des Gebirgsverhalten auch eine schematische Darstellung einer charakteristischen Ausbruchsituation. Für das gesamte Bearbeitungsgebiet wurden 14 Gebirgsverhaltenstypen ausgewiesen, die den übergeordneten Kategorien zugewiesen wurden. Entsprechend den jeweils prognostizierten geotechnischen Verhältnissen ergibt sich damit die Zuteilung der Gebirgsverhaltenstypen auf die Gebirgsbereiche. Daraus ergibt sich die prognostizierte Verteilung der Gebirgsverhaltenstypen in den einzelnen geotechnischen Bereichen und in weiterer Folge für den gesamten Tunnel.

Tabelle 7 Darstellung des Gebirgsverhaltenstyps 4/1

Gebirgsverhaltenstyp 4/1	
 <p style="text-align: center;">Symbolische Darstellung für Phyllit</p>	
<b>Gebirgsarten</b>	GA15
<b>Orientierung der Haupttrennflächenschar(en)</b>	Die Schieferungsflächen fallen flach bis mittelsteil in Vortriebsrichtung ein.
<b>Primärspannung</b>	Spannungsniveau im Bereich der Gebirgsfestigkeit.
<b>Bergwasser</b>	Überwiegend trocken, vereinzelt Tropfwasser.
<b>Gebirgsverhalten (Ausbruchverhalten, Art der Überbeanspruchung/ Bruchverhalten)</b>	Das Gebirge neigt zur Bildung von Überprofilen. Geringe Scherfestigkeit an Trennflächen bewirkt strukturbedingtes stark anisotropes Gebirgsverhalten (z.B. Spannungsgleiten an Schieferungsflächen). Bei hohlraumnaher Lage von Harnischflächen und Störungen kann es zu Spannungskonzentrationen und damit zu lokaler Überbeanspruchung des Gebirges kommen, was zu tieferreichenderen Neubrüchen im Gebirge führen kann (im Bereich der Ortsbrust können trennflächenbedingte Ablösungen und lokales Scherversagen auftreten).
<b>Radialdeformation</b>	Strukturbedingt, mehrere Zentimeter.

## ZUSAMMENFASSUNG

Im ersten Teil dieser Arbeit wurde die Gebirgscharakterisierung entsprechend der Richtlinie für die geomechanische Planung erläutert. Dazu wurden die Begriffe Gebirgsart, Gebirgsverhaltenstyp und Systemverhalten diskutiert und deren systematische Anwendung im Prozess der Gebirgscharakterisierung anhand der Unterschiede in der Planungs- und der Bauphase dargestellt. Im zweiten Teil wurde am Beispiel von zwei langen tiefliegenden Alpentunneln die Umsetzung der systematischen, gebirgsspezifischen und projektphasenabhängigen Gebirgscharakterisierung gezeigt.

## LITERATUR

- [1] Österreichisches Normungsinstitut, 1994. ÖNORM B2203 Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm. Wien
- [2] ÖGG - Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (ed.), 2001. Richtlinie für die Geomechanische Planung von Untertagebauarbeiten mit zyklischem Vortrieb. Salzburg
- [3] Österreichisches Normungsinstitut, 2001. ÖNORM B2203-1 Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm, Teil 1: Zyklischer Vortrieb. Wien
- [4] UDEC, Itasca Consulting Group, Inc. Minnesota USA

- [5] Vavrovsky G.M., Schneider K., Harer G., 2001. Koralmbahn – A new Railway Line in Southern Austria. Felsbau 19(6): 8-12. VGE, Essen
- [6] Burger D., Lauffer-Neumann D., Mussger K., 2002. Risikoinduzierte Bewertung von Tunnelvortrieben. Felsbau 20(5): 65-72. VGE, Essen
- [7] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), 2002. Generalverkehrsplan Österreich 2002, Wien
- [8] Harer G., Riedmüller G., 1999. Assessment of Ground Condition for the Koralm Tunnel during the Early Stage of Planning. Felsbau 17(5): 374-380. VGE, Essen
- [9] Goricki A., Schubert W., Fuchs R., Steidl A., 2001. Geotechnical Assessment of the Route Corridor for the Koralm Base Tunnel. ISRM Reg. Symp. Eurock 2001, Espoo, Finland, page 77-82. Balkema, Rotterdam
- [10] Steidl A., Goricki A., Schubert W., Riedmüller G., 2001. Geological and Geotechnical Ground Characterisation for the Koralm Tunnel Route Selection. Felsbau 19(6):14-21. VGE, Essen
- [11] Hoek E., Brown E.T. 1997. Practical Estimates of Rock Mass Strength. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 34(8): 1165-1186
- [12] Graf F., Kohl T., Megel T., Rybach L., Fuchs R., 2001. Hydraulic-Geothermal Modelling of the Koralm Tunnel for Rock Mass Classification. Felsbau 19(6): 54-59. VGE, Essen
- [13] Goricki A., Schubert W., Steidl A., Vigl L., 2002. Geotechnical Risk Assessment as the Basis for Cost Estimates in Tunnelling. Felsbau 20(5): 24-30. VGE, Essen
- [14] Vavrovsky G.M., 1995. Semmering-Basistunnel, ein Projektsüberblick. ÖIAZ 140, Nr.7/8: 509-512
- [15] Riedmüller G., 1995. Zur Geologie des Semmering-Basistunnels. ÖIAZ 140, Nr.7/8: 518-524
- [16] Fuchs R., 1998. Methoden digitaler und multimedialer geologischer und geotechnischer Datenverarbeitung am Beispiel des Semmering Basistunnels. Diplomarbeit am Institut für Technische Geologie und Angewandte Mineralogie, TU-Graz
- [17] Liu Q., Brosch F.J., Klima K., Riedmüller G., Schubert W., 1999. Application of data base system during tunnelling. Felsbau 17(1): 47-50. VGE, Essen
- [18] Riedmüller G., 1992. Geologische, geotechnische und hydrogeologische Erkundungen für den Semmering-Basistunnel. BHM 137, Nr.12: 457-463
- [19] Vavrovsky G.M., Bauer F., 1995. Die geotechnische Erkundung und ihre Umsetzung. ÖIAZ 140, Nr.7/8: 512-517
- [20] Riedmüller G., Schubert W., Pölsler P., Goricki A., 2000. Investigation Strategies for the Design of the Semmering Base Tunnel. Felsbau 18(4): 28-36, VGE, Essen
- [21] Sellner P.J., 1996. Ausbauoptimierung am Beispiel des Semmering Pilotstollens. Diplomarbeit am Institut für Felsmechanik und Tunnelbau, TU-Graz
- [22] Modellversuch der Bergbau-Forschungs-GmbH Essen
- [23] Hoek E., 1999. Support in very weak rock associated with faults and shear zones. Int. Symp. Rock Support and Reinforcement Practice in Mining, Kalgoorie, Australia