

Zur Problematik der Gebirgsklassifizierung im Tunnelbau

Von Dipl.-Ing. Josef Daller, o. Univ.-Professor Dr. Gunter Riedmüller,
o. Univ.-Professor Dipl.-Ing. Dr. mont Wulf Schubert

Einleitung

Eine der zentralen Aufgaben bei der Planung und Ausführung von Tunneln ist die Gebirgsklassifizierung. Sie bildet die Grundlage für die Abschätzung von Baukosten, Entwurf von Stützmaßnahmen, Erstellung des Bauvertrages und Durchführung der Abrechnung.

Die grundsätzliche Zielsetzung der Gebirgsklassifizierung besteht darin, das Gebirge entlang einer Tunneltrasse nach seinen Eigenschaften und seinem Verhalten bei der Herstellung des Hohlraumes zu klassifizieren.

Bekanntlich wird das Gebirgsverhalten beim Tunnelvortrieb durch miteinander in Wechselbeziehung stehende geologische, geomechanische und tunnelbautechnische Einflußfaktoren bestimmt. Aus dieser Komplexität folgt die Forderung nach interdisziplinärer Zusammenarbeit.

Ausgehend von den ersten Gebirgsklassifizierungen durch Terzaghi 1946 (1)* und Stini 1950 (2), bei denen verschiedene qualitativ beschriebene Gebirgseigenschaften mit einem zu erwartenden Auflockerungsdruck in Beziehung gebracht wurden, kamen verschiedenste Gebirgsklassifizierungssysteme zur Anwendung (Lauffer 1958, Deere 1967, Wickham 1972) (3, 4, 5). Ab Mitte der 70er Jahre konnten sich international vor allem die „Quantitativen Systeme“ von Bieniawski (6, 7) und Barton (8, 9) durchsetzen. Dies dürfte zur Hauptsache an der klaren Dokumentation und einfachen Handhabung dieser Klassifizierungen liegen. Auch ein Geotechniker mit geringer Erfahrung kann aufgrund einfach erfaßbarer Gesteins- und Gebirgskennwerte wie Gesteinsfestigkeiten, Kluftdichte, Kluftrauhigkeiten usw. das Gebirge ohne große Schwierigkeiten klassifizieren.

Den „Quantitativen Systemen“ steht jene Gebirgsklassifizierung gegenüber, die seit Jahrzehnten in Österreich angewendet wird (Pacher, Rabcewicz, Golser 1974) (10), ÖNORM B 2203 (1994) (11). Bei der „Österreichischen Klassifizierung“ gilt das Hauptaugenmerk dem Verhalten des Gebirges in Wechselwirkung mit den jeweiligen Ausbaumaßnahmen. Die „Österreichische“ Klassifizierung setzt im Sinne der NATM eine gleichzeitig mit dem Vortrieb erfolgende messende Beobachtung der Gebirgsreaktionen voraus. Sie ist besonders für Tunnelvortriebe in schwierigen, wechselhaften geologischen Verhältnissen geeignet, wo eine hohe Flexibilität erforderlich ist.

Sowohl die „Quantitativen Klassifizierungssysteme“ wie auch die „Österreichische Klassifizierung“ weisen Unzulänglichkeiten auf, und es gibt aus unserer Sicht gegen beide Klassifizierungen eine Reihe von Einwänden, die eine sinnvolle Anwendung in vielen Fällen in Frage stellt.

Der erstgenannte Verfasser ist Partner der Ingenieurgesellschaft Geconsult Wien, die beiden anderen sind Professoren an der TU Graz.

* Die eingeklammerten Zahlen beziehen sich auf den Quellennachweis am Schluß des Aufsatzes.

Die wesentlichsten Unzulänglichkeiten der „Quantitativen Klassifizierungssysteme“ bestehen darin, daß die Bewertung des Gebirges aufgrund einer schematischen, nicht gebirgsspezifisch gewichteten, vorgegebenen Parameterermittlung erfolgt. Für die Bewertung wird ein zu kleiner, meist nicht repräsentativer Gebirgsausschnitt verwendet. Die Stützmittelzuordnung, die weder Versagensmechanismen noch Verformungen berücksichtigt, wird empirisch aus ausgeführten Projekten abgeleitet und ist für die meisten alpinen Gebirgsarten nicht anwendbar.

Einwände gegen die „Österreichische“ Klassifizierung bestehen zur Hauptsache darin, daß es sich dabei um ein auf subjektiven Erfahrungen basierendes, kaum objektivierbares und zu wenig transparentes, nachvollziehbares Verfahren handelt. Die Klassifizierungskriterien sind im wesentlichen auf Abschlagslängen, Stützmittelaufwand und erforderliche Zusatzmaßnahmen abgestimmt. Maßgebliche Gesteins- sowie Gebirgskennwerte werden nur unzulänglich definiert, bzw. nicht in die Klassifizierung einbezogen. Diese im wesentlichen auf persönlicher Erfahrung beruhende Klassifizierung ist nur schwer an Personen mit geringer Erfahrung weiterzugeben, worunter die internationale Akzeptanz leidet.

Im folgenden möchten wir eine modifizierte Vorgangsweise bei der Gebirgsklassifizierung zur Diskussion stellen. Sie erscheint uns besser geeignet zu sein, um insbesondere bei schwierigen geologischen Verhältnissen, sowohl während der Planungsphase, wie auch beim Vortrieb eine optimale Zuordnung von Gebirgsverhalten und Stützmitteleinsatz zu erreichen.

Modifizierte Vorgangsweise

An Stelle der bisher üblichen Einteilung des Gebirges in Klassen, die entweder durch eine generelle Erfassung von Gesteins- und Gebirgsparametern oder durch eine meist auf subjektive Erfahrungswerte gestützte Abschätzung von Gebirgsverhalten und Stützungsmaßnahmen nur unvollkommen und schematisch definiert werden, wird eine Vorgangsweise vorgeschlagen, bei der den verschiedenen Gebirgsarten unter Zuhilfenahme von gezielt durchgeführten geologischen und geomechanischen Analysen charakteristische Verhaltenstypen zugeordnet werden.

Projektierungsphase

Wir wollen betonen, daß nur durch eine sorgfältige Untersuchung der jeweiligen lithologischen und kinemastatischen/dynamischen Gegebenheiten sowie der Bergwasserverhältnisse die gesteins- sowie trennflächenbedingten Verformungstypen des Gebirges erfaßt werden können (Bild 1).

Ohne Anwendung starrer, genereller Klassifizierungsschemata werden jeweils tunnelbautechnisch relevante,

PLANUNGSPHASE

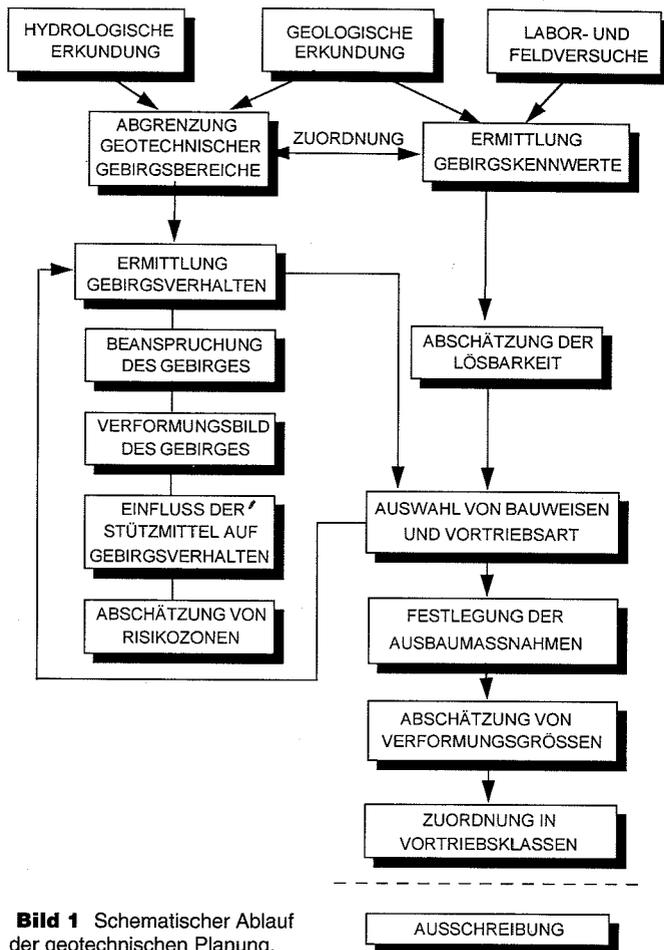


Bild 1 Schematischer Ablauf der geotechnischen Planung.

BAUAUSFÜHRUNGSPHASE

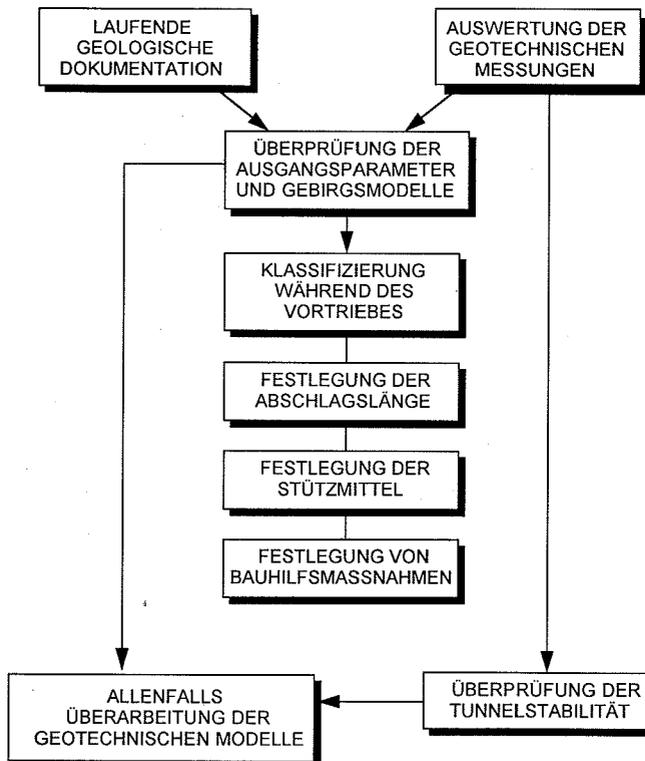


Bild 2 Schematischer Ablauf während der Bauausführung.

gebirgsspezifisch gewichtete Gesteins- und Gebirgsparameter sowie für das Verformungsverhalten wesentliche Singularitäten, wie die Raumlage und Lokalisierung von Störungszonen oder lithologische Einschaltungen, die besondere Schwäche zonen darstellen, erfaßt. Auf Grundlage dieser Daten werden unter Berücksichtigung der jeweiligen Spannungssituation verschiedene Verhaltenstypen spezifiziert. Ihre möglichst realitätsnahe Modellierung bildet die Voraussetzung für die optimale Anpassung von Stützmitteln und Bauweise.

Im Zuge der Projektierung müssen durch Detailuntersuchungen im Gelände sowie gezielt angeordnete Tiefenerkundungen mittels Kernbohrungen und geophysikalischen Methoden Gesteinsabfolgen, geologischer Bau, Trennflächensysteme, Störungszonen und Bergwasserverhältnisse erfaßt werden. Mit Hilfe von Feld- und Laborversuchen erfolgt die Ermittlung von mechanischen und hydrologischen Kennwerten.

Durch Zusammenschau all dieser Daten werden Gebirgsarten definiert, die in der Folge geotechnisch repräsentativen Gebirgsbereichen zugeordnet werden. Diesen sogenannten „Geotechnischen Gebirgsbereichen“ entspricht eine weitgehende, unter Umständen auch in ihrer Wechselhaftigkeit einheitliche Charakteristik, die durch Lösbarkeit und Gebirgsverformungen bestimmt wird.

Die Erfassung des Gebirgsverhaltens erfolgt durch analytische und/oder numerische Methoden bzw. aufgrund von Erfahrungswerten unter Berücksichtigung der räumlichen Situation und der Lokalisierung besonderer Risikozonen, wie ausgeprägte Störungen und Bergwasserzutritte. Es werden für die verschiedenen „Geotechnischen Gebirgsbereiche“ Erwartungsmodelle mit einer entsprechenden Bandbreite erstellt. Diese Modelle beinhalten das typische Beanspruchungs- und Verformungsbild und eine Abschätzung des Einflusses der Stützmittel auf das Gebirgsverhalten, auch im post-failure Bereich.

Von der bisher üblichen Projektierung schematischer Regelstützmaßnahmen für Gebirgsklassen wird abgegangen. Dafür wird für jeden charakteristischen Verhaltenstyp die Bauweise, die Bandbreite der möglichen Abschlagslängen, die Stützmittelauslegung und Bauhilfsmaßnahmen entworfen und gemeinsam mit dem zu erwartenden Ausbruchs- und Verformungsverhalten dargestellt.

Durch eine derartige Evaluierung wird eine transparente Grundlage für die Ermittlung der Verteilung von Vortriebsklassen nach der neuen Werksvertragsnorm ÖNORM B 2203 geschaffen.

Ausführungsphase

Während des Vortriebes sind die geologische Dokumentation und die geotechnischen Messungen laufend durchzuführen. Die Auswertung der geologischen Dokumentation und der Ergebnisse von absoluten Verformungsmessungen erlaubt bei Anwendung fortschrittlicher Interpretationstechniken eine gewisse Extrapolation der Gebirgsverhältnisse über den sichtbaren Bereich hinaus. Dadurch ist eine vorausschauende Gebirgscharakterisierung möglich, wodurch die während der Planungsphase entwickelten modellhaften Vorstellungen zeitgerecht überprüft, und wenn nötig, überarbeitet werden können.

Die detaillierte Festlegung von Abschlagslängen, Stützmitteln und Zusatzmaßnahmen wird aufgrund der angebotenen Verhältnisse vor Ort und unter Berücksichtigung

Prognostizierte Ortsbrust

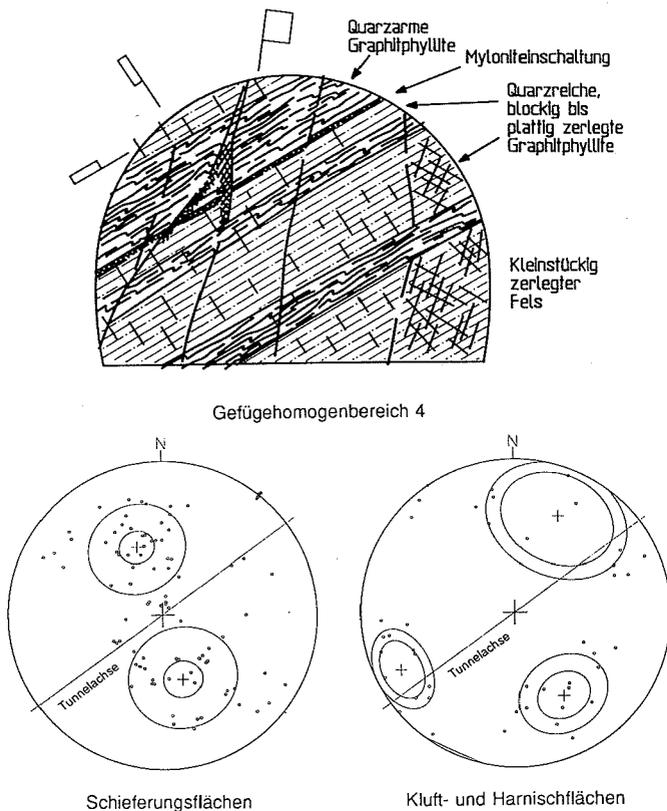


Bild 3 Prognostizierte Gebirgsverhältnisse für den untersuchten Bereich (aus (12)).

der in der Planungsphase erstellt und während der Ausführung präzisierten Gebirgsmodelle erfolgen (Bild 2).

Beispiel

Zur Veranschaulichung der von uns diskutierten Vorgangsweise wird ein 50 m langer Abschnitt des derzeit im Bau befindlichen Galgenbergtunnels der ÖBB herangezogen.

Das verwendete Gebirgsmodell wurde dem baugelogeischen Gutachten, das der Ausschreibung zugrunde lag, entnommen (12). Die Überlagerung im betreffenden Tunnelabschnitt beträgt 30 bis 50 m.

Die geologische Prognose stützte sich auf die Geländekartierung im Maßstab 1:5 000 und eine 35 m tiefe, in der Nähe des betrachteten Abschnittes abgeteufte vertikale Kernbohrung.

Es wurde ein Vortrieb in einer Graphitphyllitfolge mit vereinzelt vorkommenden geringmächtigen Kalkmarmor- bzw. Karbonatschiefereneinschaltungen prognostiziert.

Die Graphitphyllitfolge besteht vorwiegend aus quarzarmen, hoch teilbeweglichen, dünnstiefrigen Graphitphylliten mit untergeordnet auftretenden quarzreichen, plattigen Graphitphylliten.

Als maßgebend für das Verformungsverhalten wurden parallel bis spitzwinkelig zur Tunnelachse streichende, in Vortriebsrichtung einfallende Schieferungsflächen sowie steilstehende, die Tunnelachse spitzwinklig schneidende, schmale Störungszonen (Dezimeter- bis Zentimeterbereich) bzw. Harnischflächen prognostiziert (Bild 3).

Basierend auf diesem Prognosemodell und unter Verwendung von während der Erkundung aus Labor- und In-situ-Versuchen ermittelten mechanischen Kennwerten wurden von uns Verhaltenstypen entwickelt (Bilder 4 bis 6).

Zur Untermauerung der erwarteten Verformungsphänomene und zur quantitativen Abschätzung der Verformungsgrößen und der Auswirkungen der Stützmittel auf das Verhalten wurde eine Berechnung mit einem zweidimensionalen DE-Programm (UDEK) durchgeführt (Bilder 7 bis 11).

Die Ergebnisse zeigen, daß das Beanspruchungs- und Verformungsbild deutlich abhängig ist von der Lage der Störung im betrachteten Querschnitt. Bei Annäherung des Hohlraumes an die Störung, wobei sich der Querschnitt zunächst im Liegenden der Störung befindet, zeigen sich erwartungsgemäß stärkere Verformungen an der störungsnahen Ulme, welche wesentlich höher sind als jene des restlichen Querschnittes.

Schneidet die Störung den Ausbruchsquerschnitt, nimmt der singuläre Störungseinfluß deutlich ab und es ergibt sich ein weitgehend symmetrisches Verformungsbild.

Liegt der Tunnelquerschnitt im Hangenden der Störungen, so ergibt sich wieder ein unsymmetrisches, jedoch vom Querschnitt im Liegenden verschiedenes Verformungsbild.

Aus dem Beanspruchungsbild und dem Versagenspotential läßt sich der Stützmitteleinsatz optimieren. Während zur Stabilisierung des Abschnittes im Liegenden der Störung eine konzentrierte Ankerung des Ulm- und Kämperbereiches nötig ist, kann im Tunnelabschnitt, der sich im Hangenden der Störung befindet, der Stützmitteleinsatz reduziert werden, da die geometrische Situation zu einer geringeren hohlraumnahen Spannungskonzentration führt.

Die Auswertung der während des Vortriebes dokumentierten Brustbilder und erhobenen Gefügedaten zeigt eine weitgehende Übereinstimmung mit der Prognose.

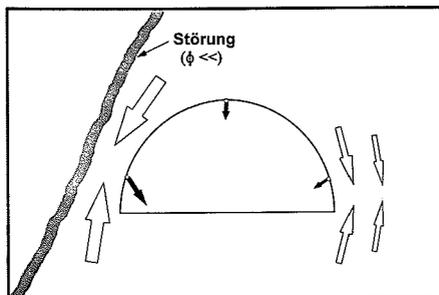


Bild 4 Erwartetes Verhalten bei Tunnel im Liegenden einer Störung.

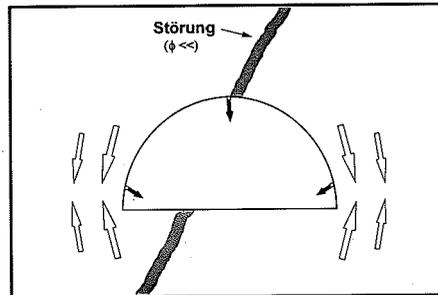


Bild 5 Erwartetes Verhalten bei mittlerer Lage einer Störung.

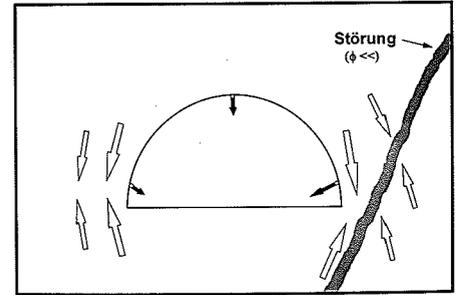


Bild 6 Erwartetes Verhalten, wenn sich der Hohlraum im Hangenden einer Störung befindet.

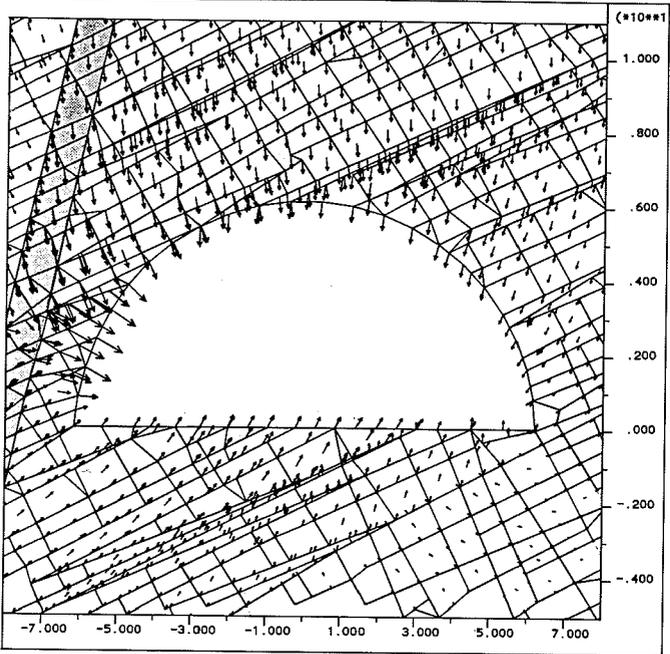


Bild 7 Berechnungsergebnis bei Tunnel im Liegenden einer Störung (Störung schattiert).

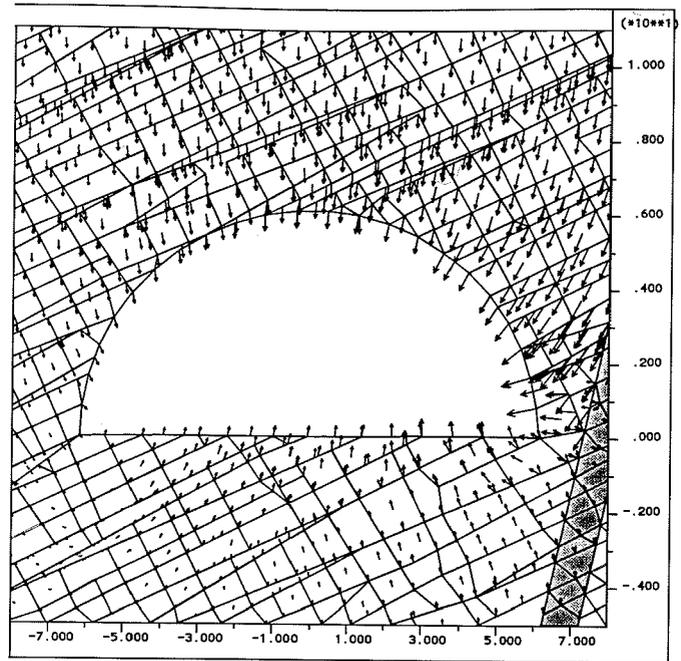


Bild 9 Berechnungsergebnis Hohlraum im Handenden einer Störung (Störung schattiert).

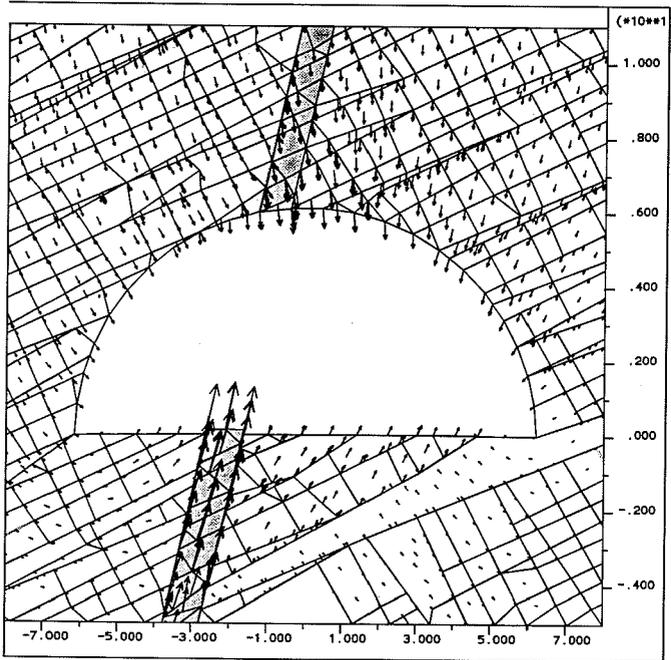


Bild 8 Berechnungsergebnis bei Störung in mittlerer Lage.

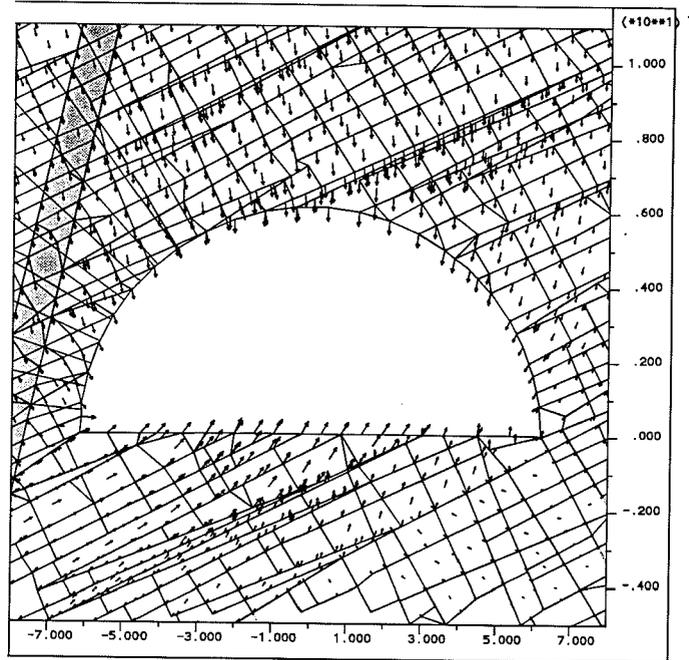


Bild 10 Berechnungsergebnis Tunnel im Liegenden; starke Ankerung des störungsnahen Ulms.

Die Ergebnisse der geotechnischen Messungen stimmen mit den in den Berechnungen dargestellten Phänomenen gut überein (Bilder 12, 13).

Dieses Beispiel demonstriert sehr deutlich, daß eine alleinige Beurteilung der Ortsbrust zu einer völligen Fehleinschätzung des Gebirgsverhaltens führen kann.

Schlußfolgerung

Eine Beurteilung der Gebirgsverhältnisse nach den gebräuchlichen Klassifizierungsmethoden und Zuordnung in Gebirgstypen erscheint uns nur in einem frühen Projektstadium (Variantenvergleiche, UVP, Behördenverfahren etc.) sinnvoll. Bei zunehmender Informationsdichte, wel-

che für eine Detail- und Ausschreibungsplanung erforderlich ist, sollte anstelle der schematischen Einteilung in Klassen, bzw. nicht näher differenzierte Gebirgstypen eine ins Detail gehende, auch Singularitäten erfassende Gebirgs- und projektspezifische Ermittlung von Verhaltenstypen erfolgen. Dies erfordert eine sehr enge Zusammenarbeit von Geologen, Geotechnikern und Planern. Sämtliche erhobenen Daten, von den Ergebnissen der geologischen Geländeuntersuchungen bis zu den bei Versuchen gewonnenen Kennwerten werden zu realitätsnahen geomechanischen Modellen zusammengefügt.

Damit erscheint uns eine bessere Nachvollziehbarkeit von Annahmen, die der Planung zugrunde liegen, gegeben

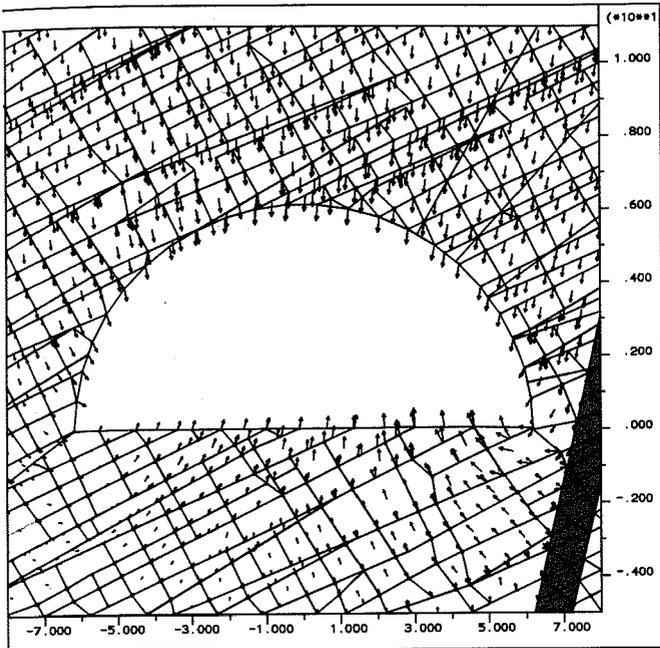


Bild 11 Berechnungsergebnis Tunnel im Hangenden einer Störung; Ankerung der rechten Ulme mit halber Dichte.

zu sein. Nur auf diese Weise wird die optimale Umsetzung aller Erkundungsergebnisse und die technische sowie wirtschaftliche Optimierung eines Projektes gewährleistet.

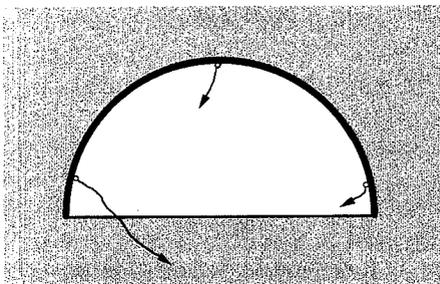


Bild 12 Ergebnisse von Verformungsmessungen bei Tunnel im Liegenden einer Störung (Kalotte).

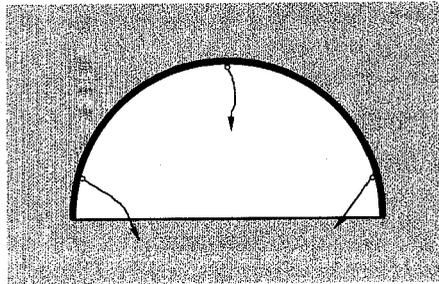


Bild 13 Ergebnisse von Verformungsmessungen bei Störung in mittlerer Lage (Kalotte).

Diese Vorgangsweise setzt voraus, daß für ein Tunnelprojekt sowohl in der Planungsphase wie auch während des Vortriebs eine umfassende geologische und geomechanische Datenermittlung und -auswertung durchgeführt wird. Es ist offensichtlich, daß derartige, während der Planung entwickelte Verhaltenstypen für die detaillierte Festlegung der Stützmittel durch die Verantwortlichen vor Ort zu einer wichtigen Entscheidungshilfe werden.

Wir sind der Meinung, daß der Tunnelbau auf diese Weise effizienter und sicherer gestaltet werden kann.

Quellennachweis

1. Terzaghi, K.v.: *Geological Introduction to Tunneling with Steel Supports*. Proctor & White; The Commercial Stamping and Shearing Company, Ohio, 1946.
2. Stini, J.: *Tunnelbaugeologie*. Springer Verlag, Wien 1950.
3. Lauffer, H.: Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau. In: *Geologie und Bauwesen* 74 (1958).
4. Wickham, G.E.; Tiedemann, H.R.; Skinner, E.H.: *Support Determination based on Geological Predictions*. Proc. Rapid Excavation Tunneling Conf., AIME, New York, 1972.
5. Deere, D.U., et al.: *Design of Surface and Near Surface Construction in Rock*. Proc. 8th U.S. Symposium Rock Mech., AIME, New York, 1967.
6. Bieniawski, Z. T.: *Engineering Classification of Jointed Rock Masses*. Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng. 15, 1973.
7. Bieniawski, Z. T.: *The Geomechanics Classification (RMR System) in Design Applications to Underground Excavations*. Proc. Int. Symp. Eng. Geol. Underground Constr., Balkema, Rotterdam, 1983.
8. Barton, N.; Lien, R.; Lunde, J.: *Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support*. In: *Rock Mechanics* 6 (1974).
9. Barton, N.: *Physical and Discrete Element Models of Excavation and Failure in Jointed Rock*. Proc. Int. Symp. on Assessm. and Prev. of Fail. Phenom. in Rock Eng., Balkema 1993.
10. Pacher, F., Rabcewicz, L. v., Golser, J.: *Zum derzeitigen Stand der Gebirgsklassifizierung im Stollen- und Tunnelbau*. Schriftenreihe Staßenforschung. Bundesministerium für Bauten und Technik, Heft 18, Wien 1974.
11. ÖNORM B2203: *Untertagebauarbeiten, Werkvertragsnorm*. Bürstenabzug. Österreichisches Normungsinstitut, Wien 1994.
12. Riedmüller, G.: *Baugeologischer Bericht Galgenbergtunnel*. ÖBB, 1992.

Für Sie gelesen

Ed. by Agnostopoulos, A.; Schlosser, F.; Kalteziotis, N. and Frank, R.: **Geotechnical Engineering of Hard Soils and Soft Rocks**. Proceedings of an International Symposium under the Auspices of the international Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering (ISSMFE), the International Association of Engineering Geology (IAEG) and the International Society for Rock Mechanics (IAEG) in Athens (GR) Sept. 1993. (2 Vols. 1 700 S. m. zahlr. Abb. u. Tab.) 25 cm x 17 cm, Rotterdam: Balkema, 1993, hardback 350 Hfl.

Dieses Interantionale Symposium wurde von der Hellenic Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering und dem French Committee for Soil Mechanics and Foundation Engineering or-

ganisiert. Mit dem Begriff „hard rocks and soft soils“ sollte der Grenzbereich zwischen Lockerböden und Fels erfaßt werden, der spezielle Probleme aufwerfen kann, die zwischen den traditionellen Betrachtungsweisen von Boden- und Felsmechanik liegen. Schon bei der vorigen Konferenz (Leeds 1990) war festgestellt worden, daß z. B. die übliche Klassifizierung an Hand der Druckfestigkeit für die Beschreibung dieser Materialien nicht genügt. Vielmehr können z. B. Untersuchungen zur Erfassung des physikalischen und chemischen Einflusses von Wasser oder seismischer Einflüsse von besonderer Bedeutung sein.

Die etwa 230 Beiträge wurden 7 Themen zugeordnet: Geologische Gesichtspunkte, Erkundung und Klassifizierung;

mechanische Eigenschaften und mechanisches Verhalten; Aushub, Gründungen und Stützkonstruktionen; Böschungssicherheit und Böschungsschutz; Auffüllungen und Schüttungen; Tunnel- und Hohlraumbau; weicher Fels im Erdöl-Ingenieurwesen.

In den vorwiegend praxisorientierten Beiträgen wurden die unterschiedlichsten Untersuchungs- und deren Auswertungsverfahren an Hand von ausgeführten Anlagen erläutert, ebenso wie die Planung und Ausführung der verschiedensten Tiefbauten. In diesen beiden Bänden (denen ein dritter mit den Generalbereichen und Diskussionen folgen soll), ist eine Fülle von Erfahrungen gesammelt, die sie zu einer wertvollen Unterstützung für jene machen, die sich mit vergleichbaren Problemen befassen müssen.

Dr. techn. Richard Widmann, Salzburg