

Geol. Paläont. Mitt. Innsbruck	ISSN 0378-6870	Bd. 12	12	S. 249-267	1. bk., März 1983
--------------------------------	----------------	--------	----	------------	-------------------

PERJENTUNNEL (LANDECK, TIROL): BAUGEOLOGISCHE VERHÄLTNISSE, PROGNOSE UND TEKTONISCHE SCHLUSSFOLGERUNGEN

von M. Köhler*)

mit 3 Abb. und 1 Taf.

Zusammenfassung

Der 2880 m lange Perjontunnel verbindet das Inntal mit dem Stanzertal nördlich von Landeck. Der Tunnel durchörtert auf rund 600 m Hauptdolomit der Nördlichen Kalkalpen und auf ca. 2200 m den Landecker Quarzphyllit. Beide tektonischen Einheiten werden durch eine 50 m breite Störungszone getrennt.

Die Gesteine der Nördlichen Kalkalpen sind intensiv geklüftet, teilweise auch zerrüttet. Der Landecker Quarzphyllit neigt durch eine starke Phyllonitisierung zu plastischer Verformung.

Die Bergwassermenge des gesamten Tunnels beträgt nur 3.5-4 l/s. Die Prognose wird den tatsächlichen Verhältnissen gegenübergestellt. Geomechanisch ist der Landecker Quarzphyllit eine große Pufferzone, in der Scherbewegungen zwischen Nördlichen Kalkalpen und Silvretta-Masse ablaufen.

*) Anschrift des Verfassers: Dr. Manfred Köhler, ILF Ingenieurgesellschaft Lässer-Feizlmayr, Framsweg 16, A-6020 Innsbruck.

Summary

The 2880 m long Perjen Tunnel joins the Inn Valley with the Stanzer Valley north of Landeck. The tunnel penetrates about 600 m of the Hauptdolomit formation of the Northern Calcareous Alps and about 2200 m of the Landeck Quarzphyllite. These two tectonic units are separated by a 80 m wide fault zone.

The rocks of the Northern Calcareous Alps are intensely fissured and in some places shattered. Due to severe phyllonitization the Landeck Quartz-phyllite formation has a tendency towards plastic deformation.

The flow of mountain water through the tunnel is only 3.5 to 4 l/s. The forecast is compared to the actual conditions. Geomechanically, the Landeck Quartzphyllit acts as a buffer zone in which the shear activity between the Northern Calcareous Alps and the Silvretta Group occurred.

Inhalt

1. Allgemeines
 - 1.1. Trassenführung
 - 1.2. Technische Daten
 - 1.3. Baudurchführung
2. Baugeologische Verhältnisse beim Tunnelvortrieb
 - 2.1. Vorbemerkungen
 - 2.2. Tektonische Einheiten
 - 2.3. Gesteinstypen
 - 2.4. Schichtung/Schieferung
 - 2.5. Klüftung
 - 2.6. Störungszonen
 - 2.7. Bergwasserverhältnisse
 - 2.8. Felstemperatur
3. Vergleich zwischen geologischer Prognose und tatsächlich angetroffenen Verhältnissen
 - 3.1. Vorbemerkungen
 - 3.2. Gebirgsbau
 - 3.3. Gesteinstypen
 - 3.4. Schichtung/Schieferung
 - 3.5. Klüftung
 - 3.6. Störungszonen
 - 3.7. Bergwasserverhältnisse
 - 3.8. Gebirgsgüteklassen
4. Tektonische Schlußfolgerungen
 - 4.1. Vermutliche Spannungsverhältnisse
 - 4.2. Tektonische Deutung des Landecker Quarzphyllits
 - 4.3. Geomechanische Bewegungsabläufe
5. Danksagung
- Literatur

1. ALLGEMEINES

1.1. Trassenführung

Im Talkessel von Landeck-Zams (Tirol) zweigt von der österreichischen Ost-West-Transversale eine wichtige Nord-Süd-Verbindung über den Reschenpaß nach Südtirol und dem oberitalienischen Industrieraum ab. Das Verkehrsaufkommen im Raum Landeck ist besonders in den Reiseumaten so stark, daß sich ständig Kolonnen bilden und längere Wartezeiten in Kauf genommen werden müssen.

Zur Entlastung dieses Verkehrsknotenpunktes wurde in der nördlichen Talflanke des Innals im Zuge der Inntalautobahn A 12 der Perjontunnel errichtet, mit dem der Ost-West-Verkehr an Landeck und Zams vorbeigeleitet wird. Diese Lösung hat sich nach zahlreichen Variantenuntersuchungen, bei welchen vor allem die Siedlungsverhältnisse, der Schutz der Bevölkerung vor Lärmbelästigung und die beengten topographischen Gegebenheiten zu berücksichtigen waren, als günstigste Trasse ergeben (siehe Abb. 1).

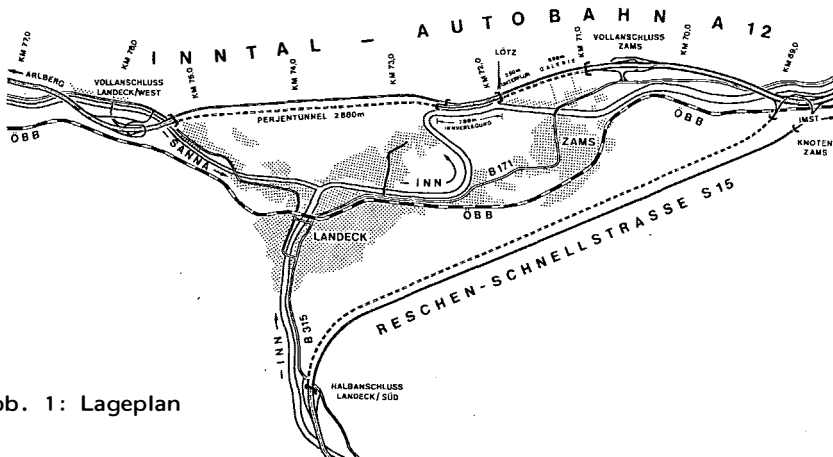


Abb. 1: Lageplan

1.2. Technische Daten

Der 2880 m lange Perjontunnel steigt durchgehend mit 1‰ vom Ostportal zum Westportal an. Er besitzt einen Ausbruchsquerschnitt von 80 m² in den Sohlgewölbestrecken und wird in der ersten Ausbaustufe im Gegenverkehr befahren. Die Frischluftzufuhr erfolgt in Form einer reversiblen Halbquerlüftung über einen 8.8 m² großen Zuluftkanal, der vom Fahrraum durch eine Zwischendecke getrennt ist.

1.3. Baudurchführung

Die Vortriebsarbeiten begannen am 11.4.1980. Vom Ostportal wurde der Tunnel im Kalotten-Strossenbetrieb ausgebrochen, während von der Westseite der Gegenvortrieb in Form eines Richtstollens durchgeführt wurde. Der Durchschlag der Kalotte erfolgte bereits am 13.1.1981 bei Stat. 1342 (Ost). Das Ausbruchsmaterial wurde gleislos ausgeschuttert. Die Verkehrsfreigabe des Tunnels fand am 29.1.1983 statt.

2. BAUGEOLOGISCHE VERHÄLTNISSE

2.1. Vorbemerkungen

Die Ingenieurgesellschaft Lässer-Feizlmayr (ILF) führte die gesamte Tunnelplanung durch, wobei dem Verfasser die geologische Vorbereitung und Prognose oblagen. Weiters wurden während der Vortriebsarbeiten die angebotenen geologischen Verhältnisse von ILF laufend dokumentiert, so daß sich eine einheitliche Ansprache der geologischen Probleme ergab. Die baugelogische Dokumentation, die vom Amt der Tiroler Landesregierung dankenswerterweise ermöglicht wurde, ist beim Perjontunnel in dreifacher Hinsicht bedeutend:

1. Die geotechnischen Erkenntnisse, die beim Bau der ersten Tunnelröhre gewonnen wurden, sollen gezielt für die Ausführung einer kommenden zweiten Röhre verwendet werden können.
2. Der Perjontunnel bietet die seltene Gelegenheit, die geologischen Verhältnisse im Grenzbereich von Nördlichen Kalkalpen zu Kristallin (Landecker Quarzphyllit) in einem durchgehenden Aufschluß beobachten zu können.
3. Die im Perjontunnel gewonnenen Erkenntnisse können für zukünftige Tunnelbauvorhaben im Raum Zams-Landeck wichtige geotechnische Grundlagen liefern. Dies betrifft z.B. eine diskutierte Tunneltrasse der ÖBB bei Zams oder die südöstliche Umfahrung von Landeck im Zuge des Neubaus der Reschenschneifelstraße. Beide Tunneltrassen würden ebenfalls die Grenze Nördliche Kalkalpen zu Landecker Quarzphyllit durchhören.

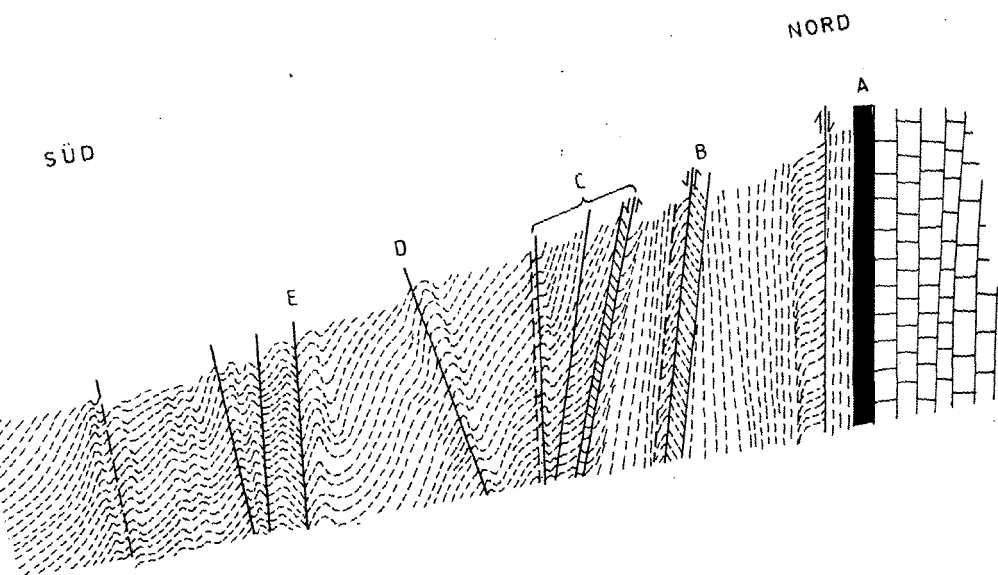
Die baugelogische Aufnahme der Ortsbrust sowie aller anderen freiliegenden Felsflächen im Tunnel erfolgte auf vorbereiteten Formblättern im Maßstab 1:100. Die angetroffenen geologischen Verhältnisse wurden auf Tafel 1 dargestellt.

2.2. Tektonische Einheiten

Von Planungsbeginn an war ersichtlich, daß ein Tunnel nördlich von Landeck sowohl die Nördlichen Kalkalpen als auch den Landecker Quarzphyllit berühren wird.

Das Durchhören dieser zwei sehr verschiedenen tektonischen Einheiten mit ihrer stark gestörten Grenzfläche war von der Linienführung her unvermeidlich.

Bei der ausgeführten Tunneltrasse wurde, vom Ostportal ausgehend, zunächst kalkalpiner Hangschutt auf 22 m Länge (bezogen auf Tunnelachse-First) durchhört. Anschließend folgte eine 590 m lange Strecke im Hauptdolomit der Nördlichen Kalkalpen. Ab Stat. 610 m kam der Tunnel im Landecker Quarzphyllit zu liegen, der auf 2205 m Länge bis 31 m vor dem Westportal aufgefahren wurde, wo wiederum Lockermaterial auftrat. Der tektonisch tiefere Landecker Quarzphyllit ist den Nördlichen Kalkalpen aufgeschoben worden. Dabei ist die Grenzfläche überkippt und fällt im Bereich des Tunnels mit ca. 80° nach Süden ein. Diese Überkippungserscheinungen sind relativ späte Bewegungen im Verlauf der Alpen Gebirgsbildung und hängen mit einem Vorschub des Kristallins nach Norden zusammen. Diese Verhältnisse wurden von OBERHAUSER (1970) auch aus dem westlichen Arlberggebiet beschrieben. Die Grenzfläche ist seismisch aktiv, im Raum Landeck-Zams traten wiederholt Epizentren kleinerer Erdbeben auf. In Abb. 2 wurde ein geologischer Nord-Süd-Schnitt durch beide tektonischen Einheiten dargestellt.



LEGENDE :

-  LANDECKER QUARZPHYLLIT
-  NÖRDLICHE KALKALPEN
-  STÖRUNG
-  MYLONITISCHE GRENZZONE
-  GROSSE BEWEGUNGSZONEN

Abb. 2: Geologischer Nord-Süd-Schnitt

2.3. Gesteinstypen

2.3.1. Nördliche Kalkalpen

Der vorherrschende Gesteinstyp der Nördlichen Kalkalpen ist ein Dolomitgestein (Hauptdolomit), das sehr viele Übergänge zu Kalkstein aufweist. Es sind dickbankige bis massige Karbonatgesteine, deren Schichtflächen undeutlich ausgebildet sind und daher nur in Ausnahmefällen Trennflächen darstellen. Dünnbankige Lagen finden sich nur vereinzelt, vor allem nahe der Grenzfläche zum Landecker Quarzphyllit. Die Gesteine besitzen gute Festigkeit, sie sind nicht zersetzt und nicht wasserempfindlich. Dolomit und Kalk unterscheiden sich baueologisch beim Sprengvortrieb nicht.

Etwas ungünstiger sind die Gesteinseigenschaften bei dünnbankiger Ausbildung, da hier die Schichtflächen tonige Beläge aufweisen. Die Gebirgsgüteklasse wird durch diese Schichten aber kaum beeinflusst.

Das Gebirge ist petrographisch homogen aufgebaut und zeigt Spröbruchverhalten. Die Standfestigkeit wird durch die Klüftung beeinflusst, die Schichtung ist mechanisch unwirksam. Die Klüftung ist intensiv, vereinzelt ist das Gebirge in schmalen Zügen zerrieben oder zerrüttet. Das Gebirge ist wasserdurchlässig. Feuchtstellen, Tropfwasser und kleine Quellen sind häufig zu beobachten, typische Verkarstungserscheinungen fehlen aber. Der Tunnel verläuft zum Großteil oberhalb des Bergwasserspiegels.

2.3.2. Landecker Quarzphyllit

Unter Phyllonitisation (meist unkorrekt als Phyllitisierung bezeichnet) versteht man einen Vorgang, bei dem die Gesteine durch starke tektonische Beanspruchung bis in den Kleinbereich deformiert wurden. Die Teilbewegungen des Gefüges im Kleinbereich lassen sich zu größeren Verformungen summieren. Auf diese Weise entstehen die tektonisch geprägten Phyllonite im Gegensatz zu den echten Phylliten, die durch einen bestimmten Metamorphosegrad gekennzeichnet sind. Die Bezeichnung "Landecker Quarzphyllit" ist daher petrographisch nicht korrekt, weil diese Einheit aus Phylloniten besteht. Diese Bezeichnung ist aber bereits so lange und allgemein in Gebrauch, daß sie auch hier, allerdings nur als Bezeichnung für eine tektonische Einheit, verwendet wird.

Aus baueologischen Überlegungen wurden drei Gesteinstypen im Landecker Quarzphyllit unterschieden.

Der Quarzphyllonit ist ein stark geschiefertes, tektonisch intensiv durchbewegtes Gestein, dessen Schieferungsflächen deutliche Trennflächen bilden.

Das Gestein spaltet leicht blättrig auf und zeigt eine hohe Teilbeweglichkeit parallel zu den Schieferungsflächen, die sehr häufig als Bewegungsflächen (Scherflächen) ausgebildet sind. Sie sind von feinen Serizithäuten überzogen. Quarz tritt meist in Form von Quarzfasern auf.

Das Gestein ist wasserempfindlich und leicht erweichbar. Klüfte weisen fallweise plastische Füllungen auf. Die Standfestigkeit ist gering und sehr wesentlich vom Durchfeuchtungsgrad abhängig.

Der Gneisphyllonit unterscheidet sich vom Quarzphyllonit durch einen etwas höheren Quarz- und Feldspatgehalt, so daß das Gestein größere Festigkeit besitzt. Der phyllonitische Charakter ist trotzdem noch durch Serizithäuten in den Schieferungsflächen erkennbar. Die Intensität der Schieferung nimmt leicht ab, wodurch das Gestein kompakter wird. Die Wasser-

empfindlichkeit ist dementsprechend geringer, die Standfestigkeit besser als beim Quarzphyllonit.

Der Schiefergneis ist durch eine starke Abnahme der Phyllonitisation gekennzeichnet. Er besteht hauptsächlich aus Quarz, Feldspat und etwas Glimmer, der aber nur selten zu phyllonitischen Häutchen ausgewalzt wurde. Das Gestein ist deutlich geschiefert aber nicht blättrig und daher ziemlich kompakt. Die Verbandsfestigkeit wird bei einer leichten Verfäلتelung erhöht. Die Standfestigkeit wird neben der Schieferung sehr wesentlich vom Zerklüftungsgrad bestimmt. Die Klüftung ist stark, der Schiefergneis wird gegenüber den Phylloniten häufig von Störungen begrenzt. In einzelnen Lagen ist die Abstammung des Schiefergneises von ehemaligen Muskovitgranitgneisen erkenntlich. Die Muskovite sind zersetzt und serizitisch, die Quarzlagen zerbrochen oder ausgewalzt. Das Gestein wird damit dünnplattig und weniger kompakt. Die Wasserempfindlichkeit ist gering. Das Auftreten dieser verschiedenen Gesteinstypen ist vom Grad der tektonischen Beanspruchung abhängig. In stark gestörten Gebirgszonen sind fast ausschließlich Quarzphyllonite ausgebildet, besonders deutlich ist dies im nördlichen Stirnbereich des Landecker Quarzphyllits zu beobachten. Hier erfolgt ein allmählicher Übergang von der Hauptmylonitzone zwischen Landecker Quarzphyllit und Nördlichen Kalkalpen zu Quarzphyllonit und schließlich Gneisphyllonit. Im wenig gestörten Gebirge treten vereinzelt Schiefergneislagen auf, die auf ein ehemals höher metamorphes Kristallingestein hinweisen.

2.3.3. Hangschutt am Ostportal

Am Fuß der Felswände befindet sich kalkalpiner Hangschutt, bestehend aus schluffig-sandigem Kies und Steinen, eingelagert sind Blöcke von Metergröße. Der große isolierte Felsblock des ehemaligen "Spitzensteins" wurde bis auf Tunnelsohle abgetragen.

Das Hangschuttmateriel war leicht verkittet und wies damit eine ausreichende Standfestigkeit auf, die einen bergmännischen Vortrieb erlaubte. Kurzzeitig waren Böschungen beschränkter Höhe im Hangschutt bis zu 60° möglich.

2.3.4. Lockermateriel am Westportal

Das Lockermateriel besteht hier aus Terrassenablagerungen, Moränen und etwas Hangschutt.

Die Kornverteilung liegt hauptsächlich im Schluff-Sandbereich, eingelagert sind kiesige Horizonte. Die Standfestigkeit ist gering und erforderte beim bergmännischen Vortrieb die Verwendung von Stahldielen. Entlang der Felsoberfläche waren kleine Wasserzutritte zu verzeichnen.

2.4. Schichtung/Schieferung

Die Schichtung in den Gesteinen der Nördlichen Kalkalpen ist über lange Strecken wenig ausgeprägt und daher geotechnisch nicht bedeutend. Deutliche geschichtete Lagen treten bei Annäherung an die Grenzfläche zum Landecker Quarzphyllit auf. Die Schichtung wird hier durch dünne Ton- und Mergellagen in den Schichtfugen abgebildet. Durch den stark gestörten Gebirgsbau sind die Schichtflächen wenig geregelt, die Streichrichtung schwankt zwischen 70-125°, das Einfallen variiert zwischen 40-90° gegen Süden. Die Schichtflächen gehören vermutlich zu einer Großfalte, deren

B-Achse ca. 79/48 W verläuft. Diese Richtung ist annähernd parallel zur Grenzfläche zwischen Nördlichen Kalkalpen und Landecker Quarzphyllit.

Im Landecker Quarzphyllit sind die Schieferungsflächen das dominierende Gefügeelement, welches das Gebirgsverhalten entscheidend beeinflusst. Der Abstand der Schieferungsflächen als Trennflächen beträgt oft nur wenige Zentimeter und bewirkt einen blättrigen, wenig kompakten Gefügeverband. In den Schieferungsflächen erfolgten zahlreiche kleine Deformationen, die aber in Summe große Gebirgsbewegungen ergaben. In einzelnen Gebirgsabschnitten wurden die Gesteine tektonisch entlang der Schieferungsflächen ausgewalzt und bis in den Kleinbereich mylonitisiert. Dies betrifft vor allem eine ca. 100 m breite Zone des Landecker Quarzphyllits am unmittelbaren Kontakt zu den Nördlichen Kalkalpen.

Die Schieferungsflächen streichen annähernd Ost-West und fallen mittelsteil nach Süden ein. Dabei zeichnen sich 2 Maxima ab:

s1 = 78/62 S

s2 = 105/85 S

Diese Richtungen stimmen mit dem Gefüge der Nördlichen Kalkalpen überein, so daß beide tektonischen Einheiten im gleichen Belastungsvorgang geprägt wurden. Die Hauptdeformationen des Landecker Quarzphyllits erfolgten daher während der Alpen Gebirgsbildung.

Es konnten nur wenige Messungen der B-Achse durchgeführt werden, wobei sich 3 bevorzugte Richtungen ergaben:

B1 = 63/10-50 W

B2 = 83/00

B3 = 105/10 E-20 W

B1 und B2 stimmen mit der Richtung der Faltenachse der Nördlichen Kalkalpen überein. Auffallend dabei ist das relativ steile W-Fallen der Achsen.

Die Richtung B3 hängt mit der Ausbildung von s2 im Landecker Quarzphyllit zusammen. Damit ergeben sich mindestens 2 Belastungsphasen, die einen etwas geänderten Spannungszustand aufweisen.

2.5. Klüftung

Die geotechnische Bedeutung der Klüftung ist im Tunnel unterschiedlich. Während sie in den Nördlichen Kalkalpen nahezu alleinbestimmend für das Gebirgsverhalten auftritt, ist ihr Einfluß im Landecker Quarzphyllit deutlich geringer und stärker wechselnd. Die tektonisch ausgewalzten Formen des Quarzphyllits können fast frei von Kluftflächen sein, die härteren und kompakteren Schieferungslagen sind hingegen engständig geklüftet. Daraus zeigt sich sehr deutlich der Einfluß des Materialverhaltens auf den Zerklüftungsgrad. Das Gebirge besteht aus spröden und bildsamen Materialien. Die spröden Gebirgsteile weisen bei tektonischer Belastung brechende Verformungen mit engständiger Zerklüftung auf, während sich die weichen, bildsamen Partien unter geologischen Bedingungen und Zeiträumen überwiegend plastisch verhalten und ein "tektonisches Fließen" ermöglichen. Bei solchen Verhältnissen wird die Zerklüftung zweitrangig. Die gemessenen Kluftflächen des Landecker Quarzphyllits lassen sich zu 7 Kluftsystemen mit folgenden Mittelwerten zusammenfassen:

K1 = 110/77 S

K2 = 84/83 S

K3 = 149/60 NE

K4 = 66/80 SE

K4' = 41/73 SE

K5 = 179/73 E

K6 = 19/74 E

Die Kluftsysteme wurden analog der Prognose numeriert, um Vergleiche zu ermöglichen. Die Untertageaufschlüsse ergeben das prinzipiell gleiche Bild wie die für die Prognose verwendeten Obertageaufschlüsse; es sind durch das größere Beobachtungsmaterial im Tunnel weitere Details zu erkennen. Die Übereinstimmung zwischen Geländeoberfläche und Gebirgsinnerem beweist, daß ursprünglich homogene Spannungsverhältnisse geherrscht haben, und die Herausbildung der heutigen Morphologie erst später durch die Erosion erfolgt ist.

Das Kluftgefüge wurde daher vor der Erosion angelegt, so daß der heute herrschende großräumige tektonische Spannungszustand nicht unbedingt mit den beobachteten Kluftsystemen zusammenhängen muß.

Das Kluftgefüge der Nördlichen Kalkalpen zeigt sehr ähnliche Kluftsysteme. Die Numerierung wurde auf den Landecker Quarzphyllit abgestimmt.

K2 = 88/63 S
K3 = 144/75 E
K4 = 70/74 S

K4' = 53/85 SE
K5 = 01/76 E
K5' = 163/72 E
K6 = 26/75 E

Die Ähnlichkeit des Kluftgefüges zwischen Nördlichen Kalkalpen und Landecker Quarzphyllit ist ein weiterer wichtiger Beweis für die Gleichzeitigkeit der tektonischen Verformung beider Einheiten.

2.6. Störungszonen

Die Ausbildung der Störungszonen ist in den Nördlichen Kalkalpen und im Landecker Quarzphyllit unterschiedlich. Die spröden Karbonatgesteine reagierten auf tektonische Überbeanspruchung meist mit Zerbrechen. Die Zerlegung und Zerreibung kann dabei so weit gehen, daß der ursprüngliche Gesteinscharakter vollständig verloren geht, und nur mehr eine karbonatische Kies-, Sand- oder Schlufffraktion übrigbleibt. Häufig bildet sich dabei eine lehmige Grundmasse aus, die durch Wasser plastisch erweicht wird. Bei einer tektonischen Breccie sind die lehmigen Anteile geringer, es überwiegen Gesteinsbruchstücke.

Im Landecker Quarzphyllit sind Störungen nicht so scharf gegen das Nachbargestein abgesetzt. Gegen das Zentrum einer Störungszone wird das Gestein immer stärker phyllonitisch und geht schließlich in tonige Mylonite über. Im folgenden werden die wichtigsten Störungen beschrieben.

In den Nördlichen Kalkalpen sind zahlreiche tunnelparallele Störungen aufgetreten. Dieser ungünstige Verschnitt mit der Tunnelachse bewirkte, daß das Gebirge nur auf kurze Abschnitte kompakt war. Beim Vortrieb wurde ständig auf eine mögliche Verbruchgefahr geachtet, so daß die Abschlagslängen selten 3 m (entsprechend Gebirgsgüteklasse IV) überschritten. Erstmals wurde bei Stat. 25 im Nordulm eine lehmgefüllte Zerrüttungszone angefahren. In weiterer Folge schnitt der Tunnel bei Stat. 80 eine Störungszone an, die aus 30 cm breiten Zerrüttungsstreifen besteht. Insgesamt ist diese Störung einige Meter breit.

Die nächste Störung trat ab Stat. 422 auf. Das Gebirge weist hier Zerrüttungsstreifen, Mylonite und lehmgefüllte Spalten auf, die zwischen 422-425 8 m hohe kaminartige Aufbrüche bilden. Da das Gebirge nur gering wasserführend war, kam es zu keinen Nachbrüchen. Auffallend an dieser Zone ist die intensive rote Färbung der Lehmlagen. Es besteht der Verdacht, daß dieser rote Lehm ein Aufarbeitungsprodukt von Alpinem Buntsandstein ist, eine diesbezügliche mineralogische Untersuchung brachte jedoch keine Klärung.

Die tektonische Zerlegung war bis zur Stat. 480 weiterhin sehr stark. Hier trat der Tunnel schließlich in eine komplett mylonitisierte Zone ein, die bis Stat. 500 aufgefahen wurde. Das Ausgangsgestein ist total zerrieben und liegt als tonig-schluffiger Mylonit mit Dolomitbruchstücken in Kiesgröße vor. Der Verlauf der Störung war nicht mit Sicherheit festzustellen. Zwischen 480 und 500 wurde das Gebirge mit dem Bagger abgebaut. Mineralogische Untersuchungen von Proben bei Stat. 438, 481, 482, 483 und 485 ergaben keine quellfähigen Tonminerale, so daß das Sohlgewölbe nicht auf Quelldruck dimensioniert werden mußte.

Ab 500 wird das Gebirge wieder etwas kompakter, es ist aber immer noch stark geklüftet.

Bei Stat. 500 erreicht die Hauptstörung den südlichen Tunnelum: die Grenze zwischen Nördlichen Kalkalpen und Landecker Quarzphyllit ist eine ca. 15 m mächtige Mylonitzone, die aus 2 Mylonittypen besteht:

- Grauer Lehm: Ton-Schluff mit Gesteinsbruchstücken, stark calcitisch
- Brauner Lehm: geringer tonig-schluffig, mehr Gesteinsbruchstücke, weniger calcitisch

Das Ausgangsgestein ist bei beiden Mylonittypen nicht mehr festzustellen. Die Mylonite sind im trockenen Zustand fest und zäh, durch Wasserezutritte aber leicht erweichbar und plastisch. Stellenweise war der Mylonit so hart, daß er angebohrt werden konnte. Die Mylonitzone streicht bei Stat. 60 im Nordum wieder aus, südlich davon tritt Landecker Quarzphyllit auf. Im unmittelbaren Kontaktbereich (1-2 m südlich der Grenze) weist der Quarzphyllit eingeschuppte Dolomitlinsen auf. Die Grenze zwischen Nördlichen Kalkalpen und Landecker Quarzphyllit ist eindeutig festzulegen.

Der anschließende Quarzphyllonit ist tektonisch außerordentlich beansprucht, er wurde ausgewalzt und bis in den Kleinbereich durchgeschert. Die hohe tektonische Belastung nimmt nur langsam ab. Ungefähr bei Stat. 740 wird der Tunnel von einer weiteren Störungszone mit mehreren bis 10 cm starken Mylonitlagen schleifend geschnitten. Diese und zahlreiche weitere Störungen im Landecker Quarzphyllit verlaufen ungefähr parallel zur Grenze Nördliche Kalkalpen/Landecker Quarzphyllit.

Eine stark ausgeprägte Störungszone mit bis zu 30 cm mächtigen Myloniten tritt bei Stat. 990 auf. Südlich davon verbesserten sich die Gebirgsverhältnisse erstmalig etwas nachhaltiger, so daß ab Stat. 1058 das Gebirge nach Güteklasse IV und ab Stat. 1078 die Schiefergneisanlagen nach Klasse III aufgefahen wurden. Die anschließende Strecke im Landecker Quarzphyllit wurde bis Stat. 1745 einheitlich nach Klasse IV aufgefahen. Die tektonische Beanspruchung beschränkte sich in dieser Strecke auf lokale Störungsbahnen, das Gestein ist dadurch weniger stark phyllonitisiert und damit kompakter. Störungen finden sich bei Stat. 1260, 1370, 1410 und 1570. Ab Stat. 1750 schneidet eine tektonisch sehr wirksame Störung die Tunnelröhre, südlich davon ist das Gebirge bis Stat. 1998 schlechter. Bei 1810 ist eine Störung eingelagert.

Bis 2311 erweist sich das Gebirge als relativ kompakt und wenig gestört. Die Verschlechterung des Gebirgsverhaltens bei ca. Stat. 2320 geht auf die Einlagerung einer lokalen Mylonitlinse zurück.

Störungen wurden in weiterer Folge bei Stat. 2355 und 2382 angefahren. Ab Stat. 2400 wird der Gebirgsbau zunehmend unruhiger. Einerseits wird die Schieferung verfälscht bei generell etwas flacherem Südfallen, andererseits nimmt der Zerklüftungsgrad zu. Der Tunnel befindet sich ab der Unterfahrung des Köterbachgrabens bis zum Westportal in einer Auflockerungszone, in der obertags Sackungen und Hangrutschungen ausgebildet sind. Großklüfte, die z.T. mylonitisiert sind, und zahlreiche kleine Störungen

prägen in diesem Tunnelabschnitt den wenig günstigen Gebirgscharakter. Dank der großen Erfahrung der ARGE ATO-Perjentunnel wurde der gesamte Tunnel trotz der schwierigen geologischen Verhältnisse zügig und vor allem unfallfrei aufgefahren, und die Anpassungsfähigkeit der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise wiederum bewiesen.

2.7. Bergwasserverhältnisse

Die Durchörterung der Grenzzone von Nördlichen Kalkalpen zu Landecker Quarzphyllit stellte wegen der Gefahr von Wassereintrüben ein nicht unerhebliches geologisches Risiko dar. Vor Baubeginn wurden daher umfangreiche hydrogeologische Untersuchungen durchgeführt, um die Lage des Bergwasserspiegels feststellen zu können. Wesentlich für die wirtschaftliche Durchführbarkeit der gewählten Tunneltrasse war eine Linienführung möglichst hoch über dem Bergwasserspiegel. Der Tunnelvortrieb hat diese Überlegungen bestätigt. Die gesamte Bergwasserführung des Tunnels beträgt 3,5–4 l/s mit leichten jahreszeitlichen Schwankungen. Quellen treten vor allem entlang der Grenzfläche von Nördlichen Kalkalpen zu Landecker Quarzphyllit auf, ergiebige Wasserzutritte blieben jedoch, wie erwartet, aus.

Die geringe Bergwassermenge ist jedoch nur örtlich durch die günstigen topographischen Gegebenheiten bedingt und darf keineswegs als repräsentativ für zukünftige Tunnelbauten im Raum Landeck angesehen werden. Trotz der geringen Wasserzuführung von ca. 3,5 l/s stellt sich in der Grenzzone technische Probleme ein. Das im Nordulm zutretende Bergwasser zwischen Stat. 615 und 626 führte von Beginn an phyllonitisches Material in Sand- und Kiesgröße mit sich. Durch diese ständige Materialausschwemmung bildeten sich hinter der Tunnellaibung Hohlräume. Kurz nach dem Betonieren des Innengewölbes baute sich trotz Einbaus von Drainagerohren nach einem kurzzeitigen Versiegen der Quellen ein derart hoher Wasserdruck auf, daß sowohl Außen- als auch Innengewölbe an zwei Stellen auf ca. 5 m² plötzlich eingedrückt wurden. Dadurch wurde ein rund 20 m³ großer Hohlraum sichtbar, der in der Folge abgesichert und ausgekleidet wurde. Die Fassung des Bergwassers wurde anschließend in diesen Bereich verlegt. Das Bergwasser ist nicht betonaggressiv.

Die Wasserführung des Landecker Quarzphyllits ist sehr gering und beschränkt sich auf lokales Tropfwasser. Quellen wurden nur an ganz wenigen Stellen angeschnitten, ihre Schüttung beträgt weniger als 0,5 l/s. Trotz der geringen Mengen hat das Bergwasser geotechnischen Einfluß. Es genügt bereits eine leichte Durchfeuchtung, um Kluftfüllungen oder Mylonite plastisch zu erweichen, so daß die Gebirgsbeweglichkeit erhöht wird.

2.8. Felstemperatur

Zwischen dem Ostportal und der Stat. 750 m wurde im Abstand von jeweils 100 m in 3 m tiefen Bohrlöchern die Felstemperatur gemessen. Die Ergebnisse sind in Abb. 3 dargestellt. Die niedrigste Temperatur wurde bei Stat. 50 mit 9,3°C registriert. Sie entspricht bereits annähernd der mittleren Jahrestemperatur von Landeck mit 7,4°C. Die Zunahme der Felstemperatur in das Berginnere erfolgt keineswegs gleichmäßig, wie bei einem ungestörten homogenen Gebirgsbau zu erwarten wäre. Trotz stetig steigender Überlagerung gibt es Bereiche, wo die Felstemperatur abnimmt. Der Temperaturverlauf wird dann deutbar, wenn die Bergwasserführung mitberücksichtigt wird. Wasserführende Zonen verlangsamen den Temperaturanstieg bzw. es kann sogar zu einer Temperatursenkung kommen. Dies deshalb, da es sich bei

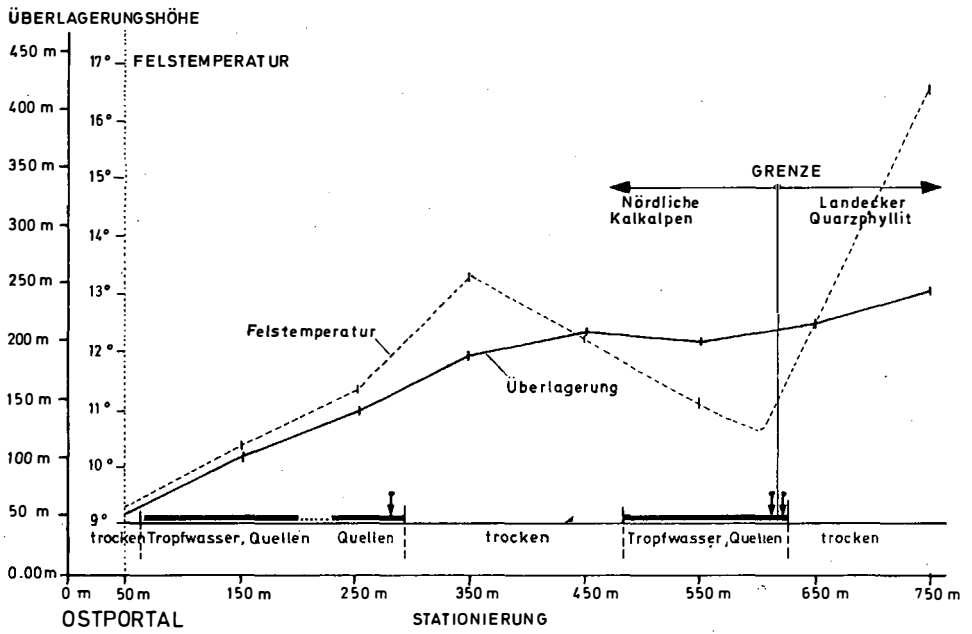


Abb. 3: Felstemperaturen

den noch relativ geringen Überlagerungshöhen um rasch zirkulierendes, kaltes Wasser von der Oberfläche handelt. Gleichzeitig macht sich auch der tektonische Bau indirekt bemerkbar. Stark klüftige Zonen oder Störungen begünstigen die Auskühlung des Gebirges durch ihre Wasserführung. Am aufschlußreichsten sind die Temperaturverhältnisse an der Grenze Nördliche Kalkalpen zu Landecker Quarzphyllit. Bei Annäherung an die Grenzfläche sinkt die Temperatur in den Nördlichen Kalkalpen von anfänglich 13.2°C auf mindestens 11.1°C ab, sie steigt dann im Landecker Quarzphyllit, der durch die starke Mylonitisierung zunächst vollständig trocken ist, sehr rasch auf 16.4°C an (letzte Messung bei Stat. 750). Die Bergwasserzutritte in der Grenzfläche weisen ebenfalls 11.5°C auf.

Dieser Temperaturverlauf wurde für die geologische Prognose der unmittelbar vor Ort zu erwartenden Gebirgsverhältnisse beim Tunnelvortrieb mitverwendet. Die Kombination von Bergwasser- und Felstemperatur gibt Einblicke in den geologischen und hydrogeologischen Gebirgsbau, die es bei günstigen Bedingungen erlauben, schwierige geoteknische Gebirgsabschnitte bereits frühzeitig zu erkennen. Vor allem kann das Risiko von Wassereinbrüchen besser abgeschätzt werden.

3. VERGLEICH ZWISCHEN GEOLOGISCHER PROGNOSE UND TATSÄCHLICH ANGETROFFENEN VERHÄLTNISSEN

3.1. Vorbemerkungen

Der Vergleich zwischen Prognose und tatsächlich angetroffenen Verhältnissen ist für die Weiterentwicklung des geotechnischen Wissens wertvoll, da auf diese Weise die Gültigkeit geologischer Hypothesen überprüft werden kann. Die Prognose gliedert sich in eine Voraussage des geologischen Gebirgsbaus und in eine Beurteilung der zu erwartenden geotechnischen Gebirgseigenschaften. Eine zutreffende Prognose des Gebirgsbaus gibt daher noch keine Sicherheit für die richtige Einschätzung des Gebirgsverhaltens. Um eine objektive Beurteilung der Prognose zu ermöglichen, wurden im bau-geologischen Längenschnitt, wie er der Ausschreibung zugrundelag, die tatsächlichen Verhältnisse eingetragen (Tafel 1). Beschreibungen der Prognose sind wörtlich zitiert.

3.2. Gebirgsbau

Der großräumige Gebirgsbau mit dem Auftreten zweier tektonischer Einheiten war vor der Tunnelauffahrung bekannt. Unsicher war allerdings die genaue Lage der Grenzfläche zwischen Kalkalpen und Quarzphyllit, sowie der Felsverlauf in den Portalbereichen. Diese Zonen wurden im Längenschnitt dargestellt. In den Portalen konnten mit wenigen Bohrungen die Unsicherheiten stark eingeschränkt werden. Ein Aufschluß der Grenzzone mittels Bohrungen hätte wegen der ungünstigen Geländeverhältnisse hohe Kosten verursacht. Die Prognose beschränkte sich daher auf die Geländekartierung und die großräumige Auswertung von geologischen Aufschlüssen zwischen Zams, Arlberg und Dalaas. Wichtig für den Gebirgsbau war die Auffassung, daß durch Überkipfung der tektonisch tiefere Quarzphyllit den Kalkalpen entlang einer steil südfallenden Grenzfläche aufliegt. Eine direkte Beobachtung war im Tunnelbereich wegen der starken Hangschuttbedeckung nicht möglich. Die Lage der Grenzfläche konnte wegen des schleifenden Verschnitts mit der

Tunnelachse nur auf ca. 100 m genau angegeben werden.
Der Tunnelvortrieb hat das tektonische Konzept bestätigt, die Grenzfläche fällt mit 70–80° gegen Süden ein, sie wurde gegenüber der Prognose um 40 m weiter westlich angefahren.

3.3. Gesteinstypen

Die petrographische Gesteinsausbildung ergab gegenüber der Prognose keine Überraschungen. Zwei Schiefergneisanlagen konnten von der Geländeoberfläche her sehr gut prognostiziert werden.

3.4. Schichtung/Schieferung

Hier ergaben sich sowohl der Intensität als auch der Lage nach keine wesentlichen Änderungen gegenüber der Prognose. Das obertags festzustellende Nordfallen der Schichten entlang von Störungen wurde auch im Tunnelbereich beobachtet. Diese Erscheinung konnte fallweise zur Prognose von Störungen beim Vortrieb verwendet werden. Das Nordfallen ist durch tektonische Bewegungen entstanden und kann nicht als Hakenwerfen erklärt werden.

3.5. Klüftung

Tafel 1 zeigt die Gegenüberstellung der obertags und untertags gemessenen Klufscharen. Erwartungsgemäß lassen sich durch die besseren Aufschlüsse beim Tunnelvortrieb mehr Details im Kluffgefüge erkennen. Die Klufscharen in den Nördlichen Kalkalpen hatten großen mechanischen Einfluß. Die tunnelparallel verlaufenden E-W-Klüfte treten obertags seltener als die N-S-Klüfte auf. Für das Gebirgsverhalten waren sie dennoch wesentlich bedeutender, da sie Ablösungen im Ulm und Kämpferbereich hervorriefen. Die relative Häufigkeit der Klufscharen wird durch geometrische Schnitteffekte verfälscht. An der Geländeoberfläche werden am Fuß der Felswände vorwiegend die N-S-streichenden Klüfte beobachtet, während die wandbildenden E-W-Klüfte stark zurücktreten. Beim Tunnelvortrieb waren, bedingt durch die Art der geologischen Dokumentation in Form einer Brustbildaufnahme, die Verhältnisse umgekehrt. Der tatsächliche Zerlegungsgrad des Gebirges stimmt mit der Prognose in großen Zügen überein. Stärker gelüftet als erwartet war das Gebirge in den Nördlichen Kalkalpen, dies hauptsächlich durch ein Vorherrschen der E-W-Klüfte, die bei der Geländeaufnahme zu wenig häufig angetroffen wurden. Die Prognose über die Streichrichtung des Hauptklufsystems zur Tunnelachse wurde durch den Tunnelvortrieb bestätigt.

3.6. Störungszonen

Die geotechnisch wirksamste Störung wurde für den Übergang von Nördlichen Kalkalpen zu Landecker Quarzphyllit in Form einer ca. 50 m breiten mylonitisierten Störungszone prognostiziert. Tatsächlich war sie 65 m breit mit einer 15 m mächtigen Mylonitzone.
Für die Nördlichen Kalkalpen wurden mehrere Zerrüttungszonen erwartet, in denen die Gesteine überbeansprucht, zerbrochen und zerrieben sein können. Mit tektonischen Breccien mußte daher auf kurzen Strecken gerechnet werden. Weiters wurde darauf hingewiesen, daß im Zusammenhang mit alten Verkar-

stungen Aufdomungen oder Hohlräume angefahren werden können, die unter Umständen verfüllt werden müssen. Eine Störung wurde stationsmäßig ange- geben. Beim Vortrieb wurden neben dieser Störung 4 weitere Zerrüttungs- zonen angefahren, wobei vor allem die Störung zwischen Stat. 480 und 500 durch komplette Mylonitisierung geotechnisch bemerkenswert war. In der Störung bei Stat. 422 traten 8 m hohe kaminartige Hohlräume auf. Im Landecker Quarzphyllit ergab die Geländeaufnahme ebenfalls mehrere Störungen. Neben deutlichen Mylonitbahnen waren auch zahlreiche dünne und rasch auskeilende mylonitische Zwischenlagen in den Schieferungsflächen ausgebildet, die plastische Deformationen begünstigen. Tafel 1 zeigt die tatsächlich angetroffenen Verhältnisse.

3.7. Bergwasserverhältnisse

Die Prognose über die allgemeine Wasserdurchlässigkeit des Gebirges stimmt mit den tatsächlichen Verhältnissen gut überein.

Eine bemerkenswerte Änderung ergab sich in der nördlichsten Zone des Landecker Quarzphyllits. Durch die starke tektonische Auswalzung war das Gebirge durch viele feine Mylonitlagen so stark abgedichtet, daß es komplett trocken war. Diese Abdichtung tritt aber nur in einem plastisch deformierten Gebirge auf, der spröde Hauptdolomit der Nördlichen Kalkalpen erwies sich wie erwartet als wasserdurchlässig und wasserführend.

Die Prognose der Bergwassermenge war für das Tunnelprojekt bedeutend. Obwohl der Tunnel die Grenzzone von Kalkalpen zu Kristallin durchörtert, wurden aufgrund der Geländeerhebungen nur geringe Wasserzutritte erwartet, da kein großräumiger Bergwasserkörper angefahren wird.

Für den Ostabschnitt der Nördlichen Kalkalpen wurden starkes Tropfwasser und kleine Quellen prognostiziert. Bei Annäherung an den Landecker Quarz- phyllit wurde eine Verstärkung der Wasserführung mit örtlichen Bergwasser- zutritten im Bereich der Grenzfläche von 5-10 l/s erwartet.

Die stärksten Bergwasserzutritte erfolgten beim Vortrieb tatsächlich am Übergang von den Nördlichen Kalkalpen zum Kristallin. Anfangs betrug hier die Schüttungsmenge ca. 10 l/s, sie nahm dann auf ungefähr 3 l/s ab.

Im Landecker Quarzphyllit war die Bergwasserführung sehr gering, nur an 2 Stellen traten Quellen auf, die unter 0.5 l/s Schüttung aufweisen. Die gesamte Bergwasserführung des Tunnels beträgt 3.5-4 l/s.

3.8. Gebirgsgüteklassen

Ein Vergleich der prognostizierten mit den tatsächlich aufgetretenen Gebirgs- güteklassen ermöglicht eine Beurteilung der geotechnischen Prognose.

Klassifiziert wurden nur die Ausbruchsarbeiten bzw. der Bauablauf, die für die einzelnen Güteklassen angegebenen Stützmaßnahmen stellen nur Richt- linien dar, die kein Kriterium für die Festlegung der Güteklassen sind.

Dieses Schema entspricht den bewährten Ausschreibungsgepflogenheiten der letzten großen Tunnelbauvorhaben.

Im baugeologischen Längenschnitt wurden die erwarteten Gebirgsgüteklassen dargestellt, wobei die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens mitberücksichtigt wurde.

Bei der Klassifizierung wurden die bereits gemachten Erfahrungen von ver- gleichbaren Tunnelbauten im Grenzbereich Kristallin/Kalkalpen herangezogen. Es sind dies Arlbergtunnel (WEISS, 1976), Dalaaser Tunnel (KAISER, 1981, KÖHLER, 1977), Flirscher Tunnel (KUNZ, 1981), Alfenz-Stollen (KÖHLER, 1977) und der Druckstollen des Kraftwerkes Prutz-Imst (SCHMIDEGG, 1959). Besonders die detaillierten Beschreibungen von SCHMIDEGG waren eine wert-

volle Hilfe bei der geotechnischen Bewertung des Gebirges am Übergang von Landecker Quarzphyllit zu Nördlichen Kalkalpen. Generell wurden die Nördlichen Kalkalpen etwas besser beurteilt als der Landecker Quarzphyllit. Dieser Trend ist beim Tunnelvortrieb bestätigt worden. Die Nördlichen Kalkalpen wurden aber in Summe etwas zu optimistisch klassifiziert. Dies hat mehrere Gründe:

- Durch das Anpassen des Vortriebskonzepts an die Gebirgsverhältnisse wurden einzelne Parameter der Gebirgsklassifizierung neu bewertet, was naturgemäß die Prognosegenauigkeit beeinflusst.
- Über längere Strecken wurden tunnelparallele Störungen angefahren. Durch den ungünstigen Verschnitt mußten aus Sicherheitsüberlegungen kurze Abschlüsse ausgeführt werden. Bei einer anderen geometrischen Anordnung wäre die Gebirgsgüteklasse um einen Grad besser gewesen. Auf den ersten 80 m trifft z.B. die Prognose auf die tatsächlichen Gebirgsverhältnisse sehr gut zu. Mit zunehmender Überlagerung und Abnahme der Auflockerung wurden die Gebirgsgüteklassen laufend besser und erreichten Klasse III. Bei Stat. 80 wurde erstmalig eine tunnelparallele Störung angefahren. Ab dieser Station wurde der Tunnelvortrieb ständig durch ungünstige Kluftverschnitte behindert.
- Die Verschlechterung der Gebirgsgüteklasse zwischen Stat. 420 und 520 geht auf eine große Mylonitzone zurück, die obertags unter Gehängeschutt verborgen ist und nicht prognostizierbar war.

Das Auftreten der Klasse VI am Übergang von Nördlichen Kalkalpen zu Landecker Quarzphyllit wurde auf den Meter genau prognostiziert. Die Gebirgsgüteklassen im Landecker Quarzphyllit stimmen mit der Prognose gut überein. Sie liegen großteils in der als "wahrscheinlich" erachteten Klasse.

4. TEKTONISCHE SCHLUSSFOLGERUNGEN

Neben den verschiedenen baueologischen Erkenntnissen hat der Perjettunnel aber auch in geologisch-tektonischer Hinsicht eine günstige Gelegenheit geboten, eine Schlüsselstelle des alpinen Gebirgsbaus zu beobachten.

4.1. Vermutliche Spannungsverhältnisse

Sowohl an der Geländeoberfläche als auch im Tunnelbereich wurde versucht, durch Auswertung des Kluftgefüges Hinweise auf den Spannungszustand des Gebirges zu erhalten. Die geologischen und felsmechanischen Grundlagen dazu werden vom Verfasser in einer gesonderten Beschreibung dargestellt, die sich in Vorbereitung befindet.

Mit Hilfe von konjugierten Kluftflächen (= Mohr'sche Flächen) kann bei günstigen Bedingungen der Spannungszustand zum Zeitpunkt der Kluftbildung ermittelt werden.

Für den Landecker Quarzphyllit ergab sich dabei:

	$\sigma_1 = N 9^\circ E / \pm$ horizontal
Nördliche Kalkalpen:	$\sigma_3 = N 99^\circ E / \pm$ horizontal
	$\sigma_1 = N 3^\circ E / 3^\circ S$
	$\sigma_3 = N 94^\circ E / 18^\circ W$

- σ_1 = größte Druckspannungskomponente
 σ_3 = kleinste Druckspannungskomponente

Die Übereinstimmung der beiden Spannungszustände ist ein weiterer Beweis für die gleichzeitige tektonische Prägung der Nördlichen Kalkalpen und des Landecker Quarzphyllits.

Dieser primäre Spannungszustand im Zuge der Gebirgsbildung dürfte heute nicht mehr überall zutreffen. In-situ-Messungen wurden nicht durchgeführt. Geänderte Spannungsverhältnisse waren mit Sicherheit im westlichsten Tunnelbereich zwischen dem Köterbach und dem Westportal vorhanden. Die starke Auflockerung mit Massenbewegungen an der Geländeoberfläche muß zu einer Umorientierung der Spannungen geführt haben. Die stärksten Druckerscheinungen waren in der Übergangszone zu den Nördlichen Kalkalpen zu verzeichnen. Die stark tektonisierten Gesteine im Stirnbereich des Landecker Quarzphyllits verursachten langsame, aber durch Monate andauernde Verformung der Tunnelröhre, die an einigen Stellen 20 cm Gesamtkonvergenz überschritten. Diese Bewegungsäußerungen können unter Umständen Anzeichen von tektonischen Kräften oder Restspannungen entlang der seismisch aktiven Grenze zwischen Nördlichen Kalkalpen und Landecker Quarzphyllit sein.

Während des Tunnelvortriebs ereignete sich an der Inntallinie ein Erdbeben. Eine Kontrolle der Konvergenzmessungen hatte keine eindeutigen Hinweise gebracht, daß durch die Erschütterungen oder Spannungen die Gebirgsdeformationen verändert wurden.

4.2. Tektonische Deutung des Landecker Quarzphyllits

Der Landecker Quarzphyllit ist aufgrund der Tunnelaufschlüsse als eine riesige Bewegungszone zwischen den Nördlichen Kalkalpen und der Silvretta-masse im Süden aufzufassen. Der Quarzphyllit ist eine Pufferzone, in der große Stauchungen in Nord-Süd-Richtung, aber auch bedeutende seitliche Verschiebungen in Ost-West-Richtung abliefen, und der dabei bis in den Kleinbereich tektonisiert wurde. Die Hauptbewegung erfolgte in den großen Mylonitzonen, die als hochteilbewegliche Gleitschichten zu verstehen sind, weniger auffallend aber mechanisch ebenfalls bedeutend sind die Deformationen des Kleinbereiches. Diese Beobachtungen stimmen mit der petrographischen Einstufung des Landecker Quarzphyllits als diaphthoritisches Altkristallin (HOERNES & PURTSCHALLER, 1970) überein. Das Konzentrieren von Bewegungen auf einzelne, örtlich begrenzte Linien, wie es in der Geologie häufig üblich ist, gibt jedenfalls kein richtiges Bild vom Charakter des Landecker Quarzphyllits.

4.3. Geomechanische Bewegungsabläufe

Zusammenfassend ergibt sich für den Grenzbereich Nördliche Kalkalpen zu Kristallin folgendes geomechanisches Bewegungsschema:

- Nach dem Eingleiten und der Platznahme der kalkalpinen Decken kommt es im Kontaktbereich von Kalkalpen zu Kristallin zu einer kräftigen horizontalen Einspannung in N-S-Richtung mit Ausbildung der größten Druckspannung vermutlich nach N 8° E.
- Infolge der starken Druckbeanspruchung wird der Landecker Quarzphyllit durch Teilbewegungen seines Gefüges allmählich phyllonitisiert und beginnt sich langsam plastisch in der E-W-Richtung zu deformieren. Bei dieser

Einspannung zwischen bewegten Druckplatten (= Scherung) bilden sich die großen E-W-streichenden Störungszonen, die als sekundäre Bruchflächen aufgefaßt werden können.

- Durch das Auseinanderweichen kommt es örtlich zu einer Druckentlastung in der N-S-Richtung, und damit zu einer Umkehrung des Spannungstensors. Die größte Hauptspannungsrichtung verläuft in dieser Phase nach N 98 E. Es ist dies eine B' senkrecht B-Verformung.

Die ursprünglich horizontalen Druckspannungen wurden durch Hebung des Alpenkörpers und Entspannungen zu den Talfürchen an der Oberfläche langsam abgebaut. Großräumig ist eine Entspannung aber noch nicht erfolgt, da die Grenze Kristallin/Kalkalpen seismisch sehr unruhig ist und auf Spannungsumlagerungen hinweist. Diese Vorgänge dürften hauptsächlich in tieferen Gebirgstteilen erfolgen.

5. DANKSAGUNG

Der Verfasser möchte allen danken, die am Zustandekommen der vorliegenden Arbeit direkt oder indirekt beteiligt waren. Der Dank gilt insbesondere Hofrat Dipl.-Ing. Otto STEINER und Oberrat Dipl.-Ing. Walter TEMML vom Amt der Tiroler Landesregierung, die durch ihre Aufgeschlossenheit eine baugeologische Dokumentation ermöglichten, weiters der bauausführenden ARGE ATO-Perjuntunnel, deren Bauleiter und Mineure die geologischen Arbeiten laufend unterstützten, sowie auch meinem Dienstgeber Dipl.-Ing. LÄSSER, der über den Rahmen der projektbezogenen baugeologischen Tätigkeit hinaus mich bei der Beschäftigung mit weiterführenden und vertiefenden geologischen Fragen förderte.

LITERATUR

- AMPFERER, O. (1930): Über den Südrand der Lechtaler Alpen zwischen Arlberg und Ötztal. - Jb. Geol. B.-A., Bd. 80, H. 3-4, S. 407-451, Wien.
- AMPFERER, O. (1932): Erläuterungen zu den geologischen Karten der Lechtaler Alpen, Im Maßstab 1:25 000. - Geol. B.-A., 125 S., Wien.
- DETLHOFFER, H. (1960): Die Stollenarbeiten für das Innkraftwerk Prutz-Imst der Tiroler Wasserkraftwerke AG. - Montan-Rundschau, Sonderheft Tunnel- und Stollenbau.
- DETLHOFFER, H. (1970): Erfahrungen bei der Sicherung von Stollenausbrüchen in gebräuchlichen und druckhaften Gebirgsstrecken. - Rock Mech., Suppl. I, S. 69-86, Wien.
- FELLERER, R. (1966): Zur Geologie des Südrandes der Nördlichen Kalkalpen zwischen Schnann und Arlberg (Lechtaler Alpen). - Z. Dtsch. Geol. Ges. 116, S. 832-858, Hannover.
- HAMMER, W. (1919): Die Phyllitzone von Landeck (Tirol). - Jb. Geol. R.-A. 68 (1918), S. 205-258, Wien.
- HAMMER, W. (1920): Die Erzführung des Verrucano in Westtirol. - Verh. Geol. St.-A. Nr. 4, S. 77-88, Wien.

- HEISSEL, W. (1972): Verrucano in Westösterreich. - Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud., Bd. 20, S. 79-81, Wien.
- HOERNES, S. & F. PURTSCHELLER (1970): Petrographische Neueinstufung des Landecker Quarzphyllits. - Ber. Nat.-Med. Ver., 58, S. 483-488, Innsbruck.
- HUCKRIEDE, R. (1959): Die Eisenspitze am Kalkalpensüdrand. - Z. Dtsch. Geol. Ges., 111, S. 410-433, hannover.
- OBERHAUSER, R. (1970): Die Überkippungserscheinungen des Kalkalpen-Südrandes im Rätikon und im Arlberg-Gebiet. - Verh. Geol. B.-A., H. 3, S. 477-485, Wien.
- KAISER, J. (1981): Die Geologie der Westrampe von Danöfen bis Dalaas/ West mit dem Dalaaser Tunnel. - Der Arlberg-Straßentunnel und die Zufahrtsrampen-Baudokumentation, Hrsg. ASTAG, S. 297-308, Innsbruck.
- KÖHLER, M. (1977): Baugeologische Untersuchungen im Raume Dalaas (Klostertal, Vorarlberg). 1. Teil: Regionalgeologische Ergebnisse. - Geol. Paläont. Mitt. Innsbruck, Bd. 6, H. 9, S. 1-26, Innsbruck.
- KUNZ, F. (1981): Die Geologie der Rampenstrecke von Flirsch/Ost bis St. Anton am Arlberg. - Der Arlberg-Straßentunnel und die Zufahrtsrampen-Baudokumentation, Hrsg. ASTAG, S. 255-262, Innsbruck.
- SCHMIDEGG, O. (1959): Geologische Ergebnisse beim Bau des Wasserkraftwerkes Prutz-Imst der TIWAG (Tirol). - Jb. Geol. B.-A., 102, H. 3, S. 353-406, Wien.
- WEISS, E.H. (1976): Die baugeologische Prognose für den Schnellstraßentunnel durch den Arlberg, Tirol-Vorarlberg. - Rock Mech., Suppl. 5, Wien.

