

Geol. Paläont. Mitt. Innsbruck	ISSN 0378-6830	Bd. 13	15	S. 363-379	Ibk., Juli 1986
--------------------------------	----------------	--------	----	------------	-----------------

LERMOOSER TUNNEL (AUSSERFERN, TIROL)

Baugeologische Verhältnisse, Prognose und
tektonische Schlußfolgerungen

von M. KÖHLER ⁺⁾

mit 1 Abbildung und 2 Tafeln

Zusammenfassung

Der 3.168 m lange Lermooser Tunnel zwischen Lermoos und Biberwier durchörtert Plattenkalk, Kössener Schichten, Schattwald-Schichten, Allgäu-Schichten und mächtige Grundmoräne. Der Plattenkalk erwies sich als nur gering nachbrüchig. Kössener Schichten und Allgäu-Schichten sind durch mergelig-tonige Lagen wesentlich gebräucher und zum Teil quellfähig. Die sehr tonreichen Schattwald-Schichten waren sehr gebräuch und durchgehend quellfähig. Die Grundmoräne ist dicht gelagert und konnte mit einer Teilschnittmaschine erfolgreich aufgefahren werden. Das Südportal liegt in einer alten Bergzerreißung.

Die Bergwassermenge schwankt zwischen 17 und 45 l/s, beim Vortrieb betrug sie fallweise 60 l/s. Die geologische Prognose deckt sich mit den tatsächlich angetroffenen Verhältnissen, sodaß die Baukosten sehr genau ermittelt werden konnten.

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

Summary

The 3.168 m long Lermoos Tunnel from Lermoos to Biberwier is driven through Plattenkalk, Kössen Beds, Schattwald Beds, Allgäu Beds and a ground moraine. The Plattenkalk turned out to be only slightly brittle. Because of the marly and clayey layers Kössen Beds and Allgäu Beds are much more friable and partly swelling. The clayey Schattwald Beds turned out to be very friable and completely swelling. The ground moraine is compacted; it was driven through using a tunnel boring machine.

The southern portal is located in an old mountain splitting. The groundwater recharge varies between 17 and 45 l/s, during the advance of the tunnel it was occasionally 60 l/s. The geological prognosis is in accordance with the actual conditions so that the construction cost could be determined very accurately.

Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeines
 - 1.1 Trassenführung
 - 1.2 Technische Daten
 - 1.3 Baudurchführung
2. Baugeologische Verhältnisse beim Tunnelvortrieb
 - 2.1 Vorbemerkungen
 - 2.2 Gesteinsserien
 - 2.3 Schichtung
 - 2.4 Klüftung
 - 2.5 Störungszonen
 - 2.6 Bergwasserverhältnisse
 - 2.7 Überlagerungshöhe
 - 2.8 Felstemperatur
 - 2.9 Spannungsverhältnisse
 - 2.10 Wasserempfindlichkeit
3. Vergleich zwischen geologischer Prognose und tatsächlich angetroffenen Verhältnissen
 - 3.1 Vorbemerkungen
 - 3.2 Gebirgsbau
 - 3.3 Gesteinstypen
 - 3.4 Schichtung
 - 3.5 Klüftung
 - 3.6 Störungszonen
 - 3.7 Bergwasserverhältnisse
 - 3.8 Gebirgsgüteklassen
 - 3.9 Bewertung der Trassenführung
4. Tektonische Schlußfolgerungen
 - 4.1 Gebirgsbau und Störungen
 - 4.2. Auflockerung der Talflanken
5. Danksagung
Literatur

1. Allgemeines

1.1 Trassenführung

Zur Verbesserung der Verkehrsverhältnisse im Bereich Lermoos-Biberwier wurden seit 1972 mehrere Varianten untersucht. Die erste Variante verlief mitten durch das moorige Talbecken. Umweltschutz und baugeologische Überlegungen führten zu weiteren Trassenstudien, die alle westlich von Lermoos verschieden lange Tunnelstrecken vorsahen. Eingehende geologische Untersuchungen zeigten, daß hangnahe Tunnelvarianten im rutschgefährdeten, feuchten Lockermaterial liegen und daher schwieriger zu realisieren sind als jene Tunneltrasse, die schließlich ausgeführt wurde. Mit dieser Lösung wurde es möglich, das Lockermaterial rasch zu durchörtern und in der Felsstrecke die Tunnelröhre günstig zum Trennflächengefüge auszurichten (Abb. 1).

1.2 Technische Daten

Der 3.168 m lange Lermooser Tunnel weist einen Ausbruchsquerschnitt von 72 - 83 m² auf. Er fällt durchgehend mit 0,53 ‰ vom Süd- zum Nordportal. Er besitzt eine reversible Halbquerlüftung.

1.3 Baudurchführung

Mit dem Bau des Lermooser Tunnels wurde am 14.8.1981 begonnen. Der Tunnel wurde im Kalotten-, Strossenbetrieb nach der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NATM) errichtet. Der Vortrieb erfolgte im Fels konventionell, im Lockermaterial zum Großteil mit einer Westfalia-Teilschnittmaschine WAV 170.

Aus Umweltgründen wurde der Tunnel hauptsächlich vom Südportal aus fallend gegen Norden vorgetrieben. Der Durchschlag bei Stat. 1969 m ab Südportal erfolgte am 27.9.1982. Die Verkehrsfreigabe des Tunnels fand am 6.7.1984 statt.

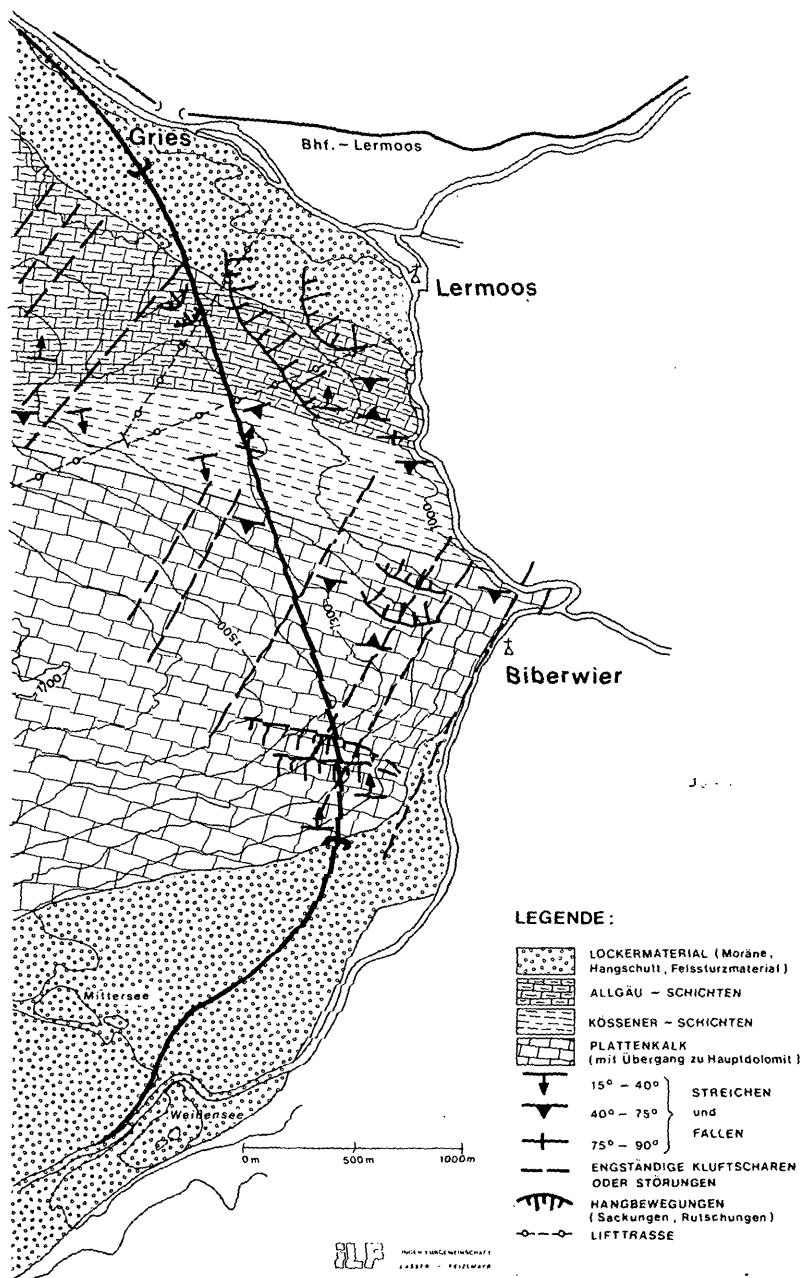


Abb. 1

2. Baugeologische Verhältnisse

2.1 Vorbemerkungen

Das Amt der Tiroler Landesregierung hatte die Ingenieurgemeinschaft Lässer - Feizlmayr (ILF) mit der gesamten Tunnelplanung beauftragt, wobei dem Verfasser die geologische Bearbeitung oblag. Während der Vortriebsarbeiten wurden die angetroffenen geologischen Verhältnisse von ILF laufend dokumentiert. Die vorliegende Beschreibung stellt einen Auszug dieser baugeologischen Dokumentation dar, die beim erwähnten Amt (Landesbaudirektion) eingesehen werden kann.

Die baugeologische Aufnahme aller freiliegenden Felsflächen im Tunnel erfolgte im Maßstab 1:100. Daraus wurde ein durchgehender Horizontal- und Längenschnitt im Maßstab 1:200 entwickelt. Das zusammengefaßte Ergebnis findet sich auf Tafel 1. Alle angegebenen Tunnelstationierungen beziehen sich, wenn nicht ausdrücklich anders vermerkt, auf das Südportal.

2.2 Gesteinsserien

Vom Südportal ausgehend, durchörtert der Tunnel zunächst auf 1512 m Länge Plattenkalk. Der Plattenkalk steht am Südportal im Übergang zu Hauptdolomit. Nördlich des Plattenkalks folgen mit 490 m Länge die Kössener Schichten. Am Kontakt zu den Allgäu-Schichten treten in den Kössener Schichten intensiv rot gefärbte Tonschiefer - Mergel auf. Diese Sonderentwicklung der obersten Kössener Schichten im Außerfern wird als Schattwald-Schichten bezeichnet. Sie erreichen im Tunnel eine Mächtigkeit von rund 50 m und wurden zwischen Station 1950 und 2000 m aufgeföhren. Sie sind tektonisch gestört und zeigten das schlechteste Gebirgsverhalten aller Gesteinsserien.

Nördlich der Kössener Schichten folgen von Station 2000 bis Station 2710 die Allgäu-Schichten. Sie werden bis zum Nordportal von quartärem Lockermaterial, hauptsächlich Grundmoräne, überlagert. Innerhalb dieser mächtigen eiszeitlichen Ablagerungen tauchen die Allgäu-Schichten noch einmal in Form eines kleinen Felsrückens auf.

Plattenkalk:

Er besteht aus deutlich gebankten Kalk- und Dolomitgesteinen, die lagenweise feine Mergelfugen aufweisen. Örtlich werden die Karbonatgesteine stärker mergelig. Dolomitgesteine treten nur im südlichsten Tunnelbereich etwas häufiger auf, wo sie zum Hauptdolomit überleiten. Großräumig betrachtet stellt sich der Plattenkalk als homogene Gesteinsserie dar, die sehr regelmäßig gebankt ist. Der Name "Plattenkalk" besteht daher auch aus baugeologischer Sicht zu Recht.

Die Schichtmächtigkeit schwankt von 10 - 50 cm, die häufigsten Werte finden sich zwischen 10 - 30 cm. Die Schichtflächen sind überwiegend eben und glatt, die Verzahnung ist

aber ständig vorhanden, sodaß die Standfestigkeit auch bei großen Querschnitten gegeben ist. Die Abschlagslängen beim Kalottenvortrieb betrugen meist 3 - 4 m, mit Ausnahme von stärker mergeligen oder geklüfteten Partien.

Kössener Schichten:

Sie bestehen aus einer raschen Wechselfolge von gebankten Kalkgesteinen, Tonschiefern und Mergeln. Die Tonschiefer erreichten eine größte Mächtigkeit von ca. 15 m. Der Übergang zum Plattenkalk vollzieht sich langsam und ist beim Tunnelvortrieb nicht störend.

Während sich die Kalkgesteine geotechnisch ähnlich wie der Plattenkalk verhalten, sind die Tonschiefer und Mergel deutlich schlechter. Die stark wasserempfindlichen Gesteine erweichen sich und verursachen umfangreiche Nachbrüche aus Brust und First. Die Abschlagslängen überschreiten daher nur mehr selten 2 m. Besondere Schwierigkeiten bereiten die Tonschiefer auch beim Schutterverkehr in der Sohle. Um einem Quelldruck zu begegnen, wurde in diesen Strecken ein Sohlgewölbe eingebaut.

Die Schattwald-Schichten zeigen ein noch ungünstigeres Verhalten. Durch das starke Vorherrschen von Tonschiefern ist das Gebirge weich bis mürb und sehr stark wasserempfindlich. Die Abschlagslängen verkürzten sich auf 1 - 2 m.

Allgäu-Schichten:

Sie werden im Außerfern sehr mächtig. Der Tunnel durchörtert die tiefere (= ältere) Serie der Allgäu-Schichten. Sie bestehen aus dünnbankigen, mergeligen Kalkgesteinen, die sehr häufig von dünnen Tonschiefer- oder Mergelfugen durchzogen werden. Die Bankungsmächtigkeit der Kalkgesteine beträgt 10 - 30 cm, die Schichtflächen sind wellig, häufig auch kleinräumig verfaltet und glatt. Die gesamte Gesteinsserie reagierte auf tektonische Belastung mit einer wellblech-artigen Verfaltung, die durch die feinen Tonschiefer- und Mergelfugen ermöglicht wurde. Die Wasserempfindlichkeit beschränkt sich auf die Schichtfugen. Die Abschlagslängen beim Kalottenvortrieb betrugen meist 3 m.

Lockermaterial:

Es besteht aus quartären, eiszeitlichen Moränenablagerungen. Im Bereich des Tieftales (Station 2700) tritt umgelagerter Hangschutt hinzu. Die Moränen bestehen aus stark schluffigen Kiesen mit Steinen. Die geringe Korngrößensortierung führte infolge einer alten, hohen Eisauflast zu einer außerordentlich guten Verdichtung und Kornbindung. Bereits beim Voreinschnitt des Nordportals konnten Bagger das Material nicht mehr lösen, sodaß Lockerungssprengungen notwendig wurden.

Beim bergmännischen Vortrieb erwies sich das Material im trockenen Zustand als gut standfest und ebenfalls als schwer lösbar. Auch die Ausrüstung des Stollenbaggers Broyt mit einem Reißzahn verbesserte nicht die Vortriebsleistung. Die ARGE entschloß sich daher zum Einsatz einer Teilschnitt-

maschine WAV 170, Westfalia - Lünen, der sehr erfolgreich verlief.

Die Standfestigkeit des Lockermaterials ist von der Wasserführung abhängig. Bereits eine kurze Durchnässung genügt, um die Kornbindung aufzulösen. Das Material geht dann in Schlamm über. Dieser Effekt erschwerte den Schutterverkehr in feuchten Gebirgszonen. Ungünstig war vor allem das Auftreten von sandig-schottrigen Zwischenschichten innerhalb der Moräne. Entlang dieser Schichten konnte leichtes Bergwasser zutreten und das Gebirge im Kalottenbereich durchfeuchten. Dadurch war das Moränenmaterial nicht mehr standfest, die Kalotte wurde unterteilt und mußte sofort gesichert werden. Diese Gebirgsverhältnisse blieben jedoch eine Ausnahme, sodaß die 470 m lange Eingangsstrecke in rund 6 Monaten vollständig ausgebrochen werden konnte.

2.3 Schichtung

Das durchörterte Gebirge weist vom Südportal zum Nordportal die normale stratigraphische Abfolge auf. Größere tektonische Komplikationen fehlen, sodaß die Schichtlagerung sehr homogen ist. Als Mittelwert über den ganzen Tunnel ergibt sich

$$ss = 97/80 \text{ S}$$

d.h. die Schichtflächen streichen fast genau Ost-West. In der Regel herrscht steiles bis mittelsteiles Einfallen gegen Süden, Nordfallen ist wesentlich seltener. Großräumig ergibt sich dadurch eine leicht überkippte Lagerung, sodaß ältere Schichtglieder auf jüngeren liegen. Das Nordfallen im Bereich des Südportals findet sich nur an der Geländeoberfläche. Es hängt daher mit der Hangtektonik zusammen, die unter 2.5 näher beschrieben wird. Die Abfolge Plattenkalk - Kössener Schichten - Allgäu-Schichten bildet den Südflügel einer weitgespannten Mulde. Die Muldenachse taucht sehr flach gegen E zum Lermooser Becken ab.

Die Schichtung ist in allen Gesteinsserien das vorherrschende Gefügeelement. Mechanisch ist sie vor allem in den Allgäu-Schichten wichtig, die einen lamellenartigen Aufbau von harten und weichen Gesteinstypen zeigen. Die Allgäu-Schichten reagieren daher bei tektonischer Belastung mit einer intensiven Verfaltung, die bis in den Meterbereich erfolgen kann. Dafür ist in dieser Serie die Klüftung weniger ausgeprägt.

Die Kössener Schichten besitzen zwar ebenfalls eine ausgeprägte Wechsellagerung, die einzelnen Gesteinstypen werden jedoch wesentlich mächtiger als in den Allgäu-Schichten. Die Verfaltbarkeit der Schichtfolge ist daher geringer. Im Plattenkalk sind die Schichtflächen ebenfalls sehr deutlich ausgebildet, die Teilbeweglichkeit in den Schichtfugen ist aber sehr gering, weil Mergel- oder Tonschieferlagen selten sind. Im Gebirge verhält sich der Plattenkalk

wesentlich starrer und spröder als die Allgäu- und Kössener Schichten. Er ist daher nicht verfaultet, dafür aber stark geklüftet.

2.4 Klüftung

Sie ist vor allem im Plattenkalk ausgebildet, wo sie die Standfestigkeit wesentlich mitbestimmt. Die Auswertung aller im Tunnel gemessenen Kluftflächen zeigt das starke Vorherrschen von ungefähr Nord-Süd verlaufenen Klüften. Die größte Häufung ergibt sich in der Richtung N 16° E. Das Fallen wechselt von 70° W bis 70° E. Diese Richtung entspricht einem Lineament, das die Fernpaßfurche vorzeichnet. Die Ost-West verlaufenden Klüfte sind wesentlich geringer.

Das Kluftgefüge paßt zum gewohnten tektonischen Bild der Kalkalpen, in denen die Ammer- und Loisachrichtung vorherrschen.

2.5 Störungszonen

Störungen mit großer tektonischer Wirksamkeit wurden vom Tunnel nicht durchörtert. Trotzdem treten vor allem im spröden Plattenkalk eine Reihe von Störungen auf, die gerade im Hinblick auf die Wasserführung bedeutend sind.

Die erste stark gestörte Zone verläuft zwischen Station 100 und 310. In diesem Bereich finden sich zahlreiche Störungsflächen oder Großklüfte. Sie sind meist mit mehreren Zentimetern Calcit dicht verheilt oder mit Lehm gefüllt. Bei Station 310 queren den Tunnel steilstehende, bis 10 cm klaffende Klüfte. Nördlich der klaffenden Störungen bei Station 310 verändert sich der Gebirgscharakter. Die Auflockerung ist deutlich geringer. Aufgrund der im Tunnel zu beobachtenden tektonischen Verhältnisse wird das Gebirge vom Südportal bis ca. Station 310 als stark aufgelockerte Bergflanke gedeutet, in der Bergzerreibungen auftragen. Diese schwerkraftbedingten Felsdeformationen haben in der Fernpaßtalung örtlich zu Felsstürzen geführt, die jünger als der große Felssturz vom Loreakopf sind. Im Bereich des Lermooser Tunnels haben die Bewegungen nur zu einer Auflockerung der obersten Felsschwarte geführt. Sie blieb im Inneren aber doch soweit intakt, daß sich kein Felssturz löste. Die zahlreichen offenen Spalten und Klüfte wurden nachträglich durch zirkulierendes Bergwasser wieder mit Calcit ausgefüllt. Die Trennflächen bei Station 310 werden als basale Bewegungszone dieser Hangzerreißung gedeutet. Auffallend ist, daß hier der Plattenkalk im Meterbereich verfaultet ist. Diese Erscheinung fehlte sonst im Plattenkalk vollkommen.

Die nächste gestörte Zone tritt zwischen Station 700 und 730 m auf. Das Gebirge ist hier engständig geklüftet und zerrüttet. Großklüfte und vereinzelte Störungen finden sich auch in weiterer Folge immer wieder. Bei Station 1100 quert eine 30 - 40 cm mächtige lehmgefüllte Störung den Tunnel.

Bei 1350 m ist die tektonische Beanspruchung ebenfalls stärker als üblich. Ab 1440 bis zum Kontakt zu den Kössener Schichten bei 1512 ist das Gebirge leicht gestört. Der stratigraphische Kontakt zwischen Kössener Schichten und Plattenkalk ist tektonisch überprägt und vermutlich die Folge des unterschiedlichen Gebirgsverhaltens. Die Kössener Schichten sind nur gering gestört. Sie reagierten auf Belastung mit plastischer Verformung. Kleine Störungen finden sich bei Station 1800 und 1820.

Ab 1920 m nimmt in den Kössener Schichten die Kleinverfäلتung zu, bei 1940 m werden sie durch schichtparallele Bewegungsflächen von den Schattwald-Schichten getrennt. Die Schattwald-Schichten stellen eine Art Pufferzone zwischen den Kössener Schichten und den Allgäu-Schichten dar. Es fehlt eine klar definierte Störungszone, da das Gebirge bis in den Kleinbereich durchbewegt wurde. In den Allgäu-Schichten fehlen größere Störungen überhaupt. Es scheint, daß durch die groß- und kleinräumige Verfaltung die tektonische Belastung abgefangen wurde, sodaß keine tiefgreifende rupturale Deformation stattfand.

2.6 Bergwasserverhältnisse

In Tafel 2 sind die Bergwasserverhältnisse dargestellt. Die gesamte Bergwassermenge des Tunnels schwankt jahreszeitlich zwischen 17 und 45 l/s. Beim Vortrieb betrug sie maximal 60 l/s. Die stärkste Bergwasserführung tritt im Frühjahr zur Zeit der Schneeschmelze auf, im Winter ist sie am geringsten. Mehr als 2/3 des Bergwassers fallen im Plattenkalk an. Die stärksten wasserführenden Zonen treten bei Station 1100 m und 1425 m auf. Das Maximum bei 1425 m liegt nahe an der Grenze zu den Kössener Schichten. Die Kössener Schichten sind zum Teil vollständig trocken, in Kalklagen trat hingegen Wasser zu. Die Schattwald-Schichten sind komplett trocken. In den Allgäu-Schichten ist die Bergwasserführung sehr gering. Nur an wenigen Stellen finden sich kleine Quellen, die aber 0,5 l/s nicht überschreiten.

Wasserzutritte im Plattenkalk wiesen bis maximal 1000 mg/l SO_4 auf. Die Sulfatgehalte in den Allgäu- und Kössener Schichten sind sehr gering. Dafür zeigen die Allgäu-Schichten Chloridgehalte bis zu 150 mg/l.

Schwefelwasserstoff (H_2S) war in allen Schichtserien vorhanden, am stärksten in den Allgäu-Schichten. H_2S macht sich neben seinem unangenehmen Geruch auch durch einen blaugrünen-schwarzen Niederschlag an der Austrittsstelle von Bergwasser bemerkbar. Im Laufe der Zeit bilden sich weiße, fadenförmige Ablagerungen, die Drainagen verlegen können.

2.7 Überlagerungshöhe

Die maximale Überlagerungshöhe beträgt 350 m. Am Südportal steigt die Überdeckung rasch an, sodaß hier keine besonderen Schwierigkeiten infolge Verwitterung auftraten. Das Nord-

portal und eine anschließend rund 450 m lange Tunnelstrecke liegen im Lockermaterial. Die Überlagerungshöhe beträgt hier maximal 50 m, sie verringert sich bei der Unterfahrung des Tieftales (Station 2700 m) auf 15 m. Die Verwitterung war hier stark und bewirkte gemeinsam mit einer starken Tropfwasserführung eine Verringerung der Standfestigkeit.

2.8 Felstemperatur

Die Messung der Felstemperatur erfolgte in 3 m tiefen Bohrlöchern unmittelbar im Vortriebsbereich. Die Meßgenauigkeit der verwendeten digitalen Anzeigegeräte betrug $0,1^{\circ}\text{C}$. Die Messungen wurden zwischen Station 604 und 1208 durchgeführt, das war jener Bereich, in dem voraussichtlich die stärksten Wasservutritte zu erwarten waren. Aus Kostengründen konnten die Messungen nicht über den gesamten Tunnel ausgedehnt werden. Die tiefste Felstemperatur beträgt $6,3^{\circ}\text{C}$ (Station 743), die höchste $9,4^{\circ}\text{C}$ (Station 985).

Die Felstemperatur ist im wasserführenden Kalkgebirge weitgehend unabhängig von der Überlagerungshöhe (geothermische Tiefenstufe). Sie wird fast ausschließlich von den Bergwasserverhältnissen beeinflusst. Bei einer genauen Auswertung sind die Temperaturschwankungen geologisch interpretierbar. Die tiefsten Temperaturen traten überall im wasserführenden Gebirge auf. Die geringen Temperaturschwankungen sind dadurch bedingt, daß die untersuchte Tunnelstrecke voll im Bergwasserspiegel liegt. Es ist daher kein Zufall, daß die Felstemperatur am Beginn der wasserführenden Strecke von $8,0^{\circ}\text{C}$ (Station 604) kontinuierlich bis auf $6,8^{\circ}\text{C}$ (Station 662) abnahm. Nach dem Eintauchen in den Bergwasserspiegel pendelte die Temperatur zwischen $6,5^{\circ}\text{C}$ und $7,4^{\circ}\text{C}$. In dieser Strecke weisen nur die Bereiche bei Station 985 m und 1083 m mit $9,4^{\circ}\text{C}$ bzw. $7,9^{\circ}\text{C}$ höhere Temperaturen auf. Es sind dies jene Tunnelstrecken, die weitgehend trocken waren.

2.9 Spannungsverhältnisse

Während des Tunnelvortriebes wurden keine besonderen Spannungsäußerungen verzeichnet. Bergschlag in spröden Gesteinen oder plastische Deformation in Tonschiefern oder ähnlich weichen Gesteinstypen trat wegen der relativ geringen Überlagerungshöhe nicht auf. Der Plattenkalk ist geomechanisch ein sprödes Gebirge, in dem Verfaltungen nahezu vollständig fehlen. Die Kössener Schichten und verstärkt die Allgäu-Schichten verhalten sich bei tektonischen Belastungen, die sehr langsam ablaufen, plastisch und reagieren mit intensiver Verfaltung.

Im Plattenkalk konnte wiederholt entlang von Störungen ein rascher Wechsel des Kluftgefüges beobachtet werden. Daraus ist indirekt auf eine Änderung der lokalen Spannungsverhältnisse zu schließen. Das Vorherrschen flacher Harnischstrieungen weist auf ehemals horizontale Spannungen hin. Direkte Spannungsmessungen wurden nicht durchgeführt.

2.10. Wasserempfindlichkeit

Die stärksten wasserempfindlichen Gesteinsserien sind die Kössener und Schattwald-Schichten. Die Befeuchtung verursacht nicht nur ein Auflösen der Kornbindungen, sondern auch richtigen Quelldruck. Beim Vortrieb wurden daher die Tonschiefer laufend auf ihr Quellverhalten von DDR. CZURDA (Geologisches Institut Innsbruck) untersucht. Es ergaben sich folgende Werte:

Station	Stratigr. Einheit	Max. Quell- erhebung	Max. Quelldruck
1541	Kössener Sch.	9 %	500 kN/m ²
1584	Kössener Sch.	10,3 %	800 kN/m ²
1727	Kössener Sch.	8 %	160 kN/m ²
1927	Kössener Sch.	3,5 %	90 kN/m ²
1944	Schattwald Sch.	?	50 kN/m ²
1985	Schattwald Sch.	10 %	800 kN/m ²
2633	Allgäu-Sch.	3,4 %	50 kN/m ²
2633	Allgäu-Sch.	1 %	50 kN/m ²
2605	Allgäu-Sch.	1 %	50 kN/m ²

Der maximale Quelldruck beträgt sowohl in den Kössener als auch in den Schattwald-Schichten 800 kN/m². Die Allgäu-Schichten und der Plattenkalk erwiesen sich als nicht quellfähig. Der Tunnel hat allerdings nur die tieferen, mergelarmen Allgäu-Schichten durchörtert.

Der Quelldruck ist richtungsabhängig und erreicht seinen größten Wert senkrecht zu den Schichtflächen. Die steile Lagerung der Schichtpakete im Tunnel erwies sich daher als sehr günstig. In den quellfähigen Schichten wurde sofort nach dem Ausbruch ein Sohlgewölbe eingebaut und sein Verhalten durch geotechnische Messungen kontrolliert. Sie zeigen, daß die eingebauten Stützmittel die Sohle ausreichend stabilisierten.

3. Vergleich zwischen geologischer Prognose und tatsächlich angetroffenen Verhältnissen

3.1. Vorbemerkungen

Die Prognose gliedert sich in eine Voraussage des geologischen Gebirgsbaus und in eine Beurteilung der zu erwartenden geotechnischen Gebirgseigenschaften. Eine richtige Prognose des Gebirgsbaus gibt daher noch keine Sicherheit für die richtige Einschätzung des Gebirgsverhaltens. Um eine objektive Beurteilung der Prognose zu ermöglichen, wurden im baugeologischen Längenschnitt, wie er der Beschreibung zugrundelag, die tatsächlichen Verhältnisse eingetragen (Tafel 1). Beschreibungen der Prognose sind wörtlich zitiert.

3.2 Gebirgsbau

Der großräumige Gebirgsbau ist relativ einfach und war bereits vor der Tunnelauffahrung weitgehend bekannt. In den vorhandenen geologischen Karten sind allerdings die Grenzen zwischen Plattenkalk, Kössener Schichten und Allgäu-Schichten wegen der Bedeckung mit Lockermaterial nur ungenau angegeben. Für eine Kostenschätzung und für eine richtige Beurteilung der zahlreichen Varianten am Beginn der Projektierungsarbeiten war eine geologische und geotechnische Neuaufnahme des Gebirges notwendig.

Von der Oberfläche her war die Einschätzung des Plattenkalkes ziemlich genau möglich, sodaß in diesem Gebirgsabschnitt keine Bohrungen ausgeführt wurden. Der Gesteinsbestand der Kössener Schichten konnte bruchstückhaft aus Einzelaufschlüssen rekonstruiert werden.

Die Allgäu-Schichten sind hingegen im Tunnelbereich fast überhaupt nicht aufgeschlossen und bildeten den größten Unsicherheitsfaktor in der Einschätzung des Gebirgsverhaltens. Deshalb wurden hier 6 Bohrungen niedergebracht, die neben dem Gesteinsbestand auch die Grenze von Fels zu Lockermaterial erkundeten.

Während der geologischen Geländeerhebungen ergab sich der Verdacht, daß im Übergang von Kössener Schichten zu Allgäu-Schichten eine petrographische Sonderentwicklung in Form der Schattwald-Schichten auftreten könnte. Wegen der mächtigen Lockermaterialbedeckung war eine direkte Beobachtung nicht möglich, sodaß 2 Suchschlitze ausgeführt wurden, die tatsächlich den Nachweis der Schattwald-Schichten erbrachten.

Der Tunnelvortrieb hat das geologische Konzept bestätigt. Die Grenze Plattenkalk/Kössener Schichten wurde auf 2 m genau prognostiziert, die Vortriebsstrecke in den Kössener Schichten hat sich gegenüber der Prognose um 70 m verkürzt, der Übergang von den Allgäu-Schichten zum quartären Lockermaterial erfolgte auf 2 m genau. Eine Änderung ergab sich in der nördlichsten Tunnelstrecke. Aufgrund der Bohrungen wurde hier durchgehend Lockermaterial erwartet. Tatsächlich hat der Tunnel aber zwischen der Bohrung 3 und 4 auf ca. 30 m nochmals einen kleinen Felsbuckel schleifend geschnitten.

3.3 Gesteinstypen

Die petrographische Gesteinsausbildung ergab gegenüber der Prognose keine Überraschungen. Die geotechnisch ungünstigste Gesteinsserie, die Schattwald-Schichten, wurde trotz der fehlenden Geländeaufschlüsse erkannt und als Gebirgsgüteklasse VI richtig bewertet. Für die bauausführende ARGE war das Auffahren des Lockermaterials mittels Teilschnittmaschine ein Kostenrisiko. Die Ergebnisse der Aufschlußbohrungen wurden geotechnisch richtig interpretiert. Die gute Standfestigkeit der quartären Grundmoräne, die durch

eine alte, hohe Eisauflast stark verdichtet ist, und die nur geringen Wasserzutritte erlaubten einen erfolgreichen maschinellen Vortrieb.

3.4 Schichtung

Die Orientierung und Intensität des Schichtflächengefüges im Berginneren hat sich gegenüber der Prognose nicht geändert.

3.5. Klüftung

Die Geländeaufnahme ergab ein Vorherrschen von N-S bis NNE-SSW streichenden Kluftscharen. Diese Tendenz wurde durch den Tunnelvortrieb bestätigt, ebenso das verschiedene mechanische Verhalten zwischen plastisch deformierten Allgäu-Schichten und rupturrell beanspruchtem Plattenkalk. Der stärker geklüftete Südabschnitt des Tunnels innerhalb einer alten Bergzerreißung wurde in der Prognose durch eine schlechte Gebirgsklassifizierung berücksichtigt.

3.6 Störungszonen

In der Prognose wurden vorwiegend NNE-streichende Störungen erwartet, die örtlich zu Zerrüttungen oder Zerreibungen führen, jedoch keine tektonisch bedeutenden Großstörungen. Die Gebirgsgüteklasse VI wurde daher nur für den Übergangsbereich Plattenkalk zu Kössener Schichten bzw. zu Allgäu-Schichten prognostiziert, weil hier zwischen mechanisch verschiedenen reagierenden Gebirgszonen Bewegungen erwartet wurden.

Beim Tunnelvortrieb erwies sich der Übergang von Plattenkalk zu Kössener Schichten problemlos, da er sich langsam vollzieht und keine klar definierbare Grenze darstellt. Im obersten Abschnitt der Kössener Schichten, den Schattwald-Schichten, trat hingegen eine deutliche Gebirgverschlechterung auf. Die Schattwald-Schichten bilden eine große, petrographisch bedingte Scherzone zwischen den nördlichen und südlichen Gebirgsabschnitten. Die östliche Fortsetzung dieser Bewegungszone liegt im Gaistal am Südfuß des Wettersteingebirges. Innerhalb des Plattenkalks bewirkten Störungen nur eine örtliche Zunahme der Gebirgszerlegung, die auf die Gebirgsgüteklasse keinen Einfluß hatte.

3.7 Bergwasserverhältnisse

Für den Tunnel wurden während des Vortriebes kurzzeitig 50 - 100 l/s prognostiziert, nach dem Durchschlag wurden weniger als 50 l/s erwartet. Rund 80 % des Bergwassers wurden dem Plattenkalk zugeordnet. Weiters wurde empfohlen, die Tunnelwässer ständig auf ihren Sulfatgehalt zu überprüfen. Die tatsächliche Wassermenge schwankt zwischen 17 und 45 l/s, beim Vortrieb fielen maximal ca. 60 l/s an. Mehr als 2/3 der Wasserführung entfällt auf den Plattenkalk.

Die Gesteine führen bis zu 1000 mg/l SO₄, sehr häufig ist auch Schwefelwasserstoff. Die Lage des Bergwasserspiegels stimmt mit der Prognose gut überein. Details können der Tafel 1 entnommen werden.

3.8 Gebirgsgüteklassen

Ein Vergleich der prognostizierten mit den tatsächlich aufgetretenen Gebirgsgüteklassen ermöglicht eine Beurteilung der geotechnischen Prognose. Klassifiziert wurden nur die Ausbruchsarbeiten bzw. der Bauablauf, die für die einzelnen Güteklassen angegebenen Stützmaßnahmen stellen nur Richtlinien dar, die kein Kriterium für die Festlegung der Güteklassen sind. Dieses Schema entspricht den bewährten Ausschreibungsgepflogenheiten der letzten großen Tunnelbauvorhaben.

Im baugelologischen Längenschnitt wurden die erwarteten Gebirgsgüteklassen dargestellt, wobei die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens mitberücksichtigt wurde. Bei der Klassifizierung wurden die Erfahrungen von vergleichbaren Tunnelbauten herangezogen, insbesondere vom Perjentunnel (KÖHLER, 1983).

Gebirgsgüteklasse	Prognose	Tatsache
I	0 %	0 %
II	17,5 %	0 %
III	27 %	35,0 %
	44,5 %	
IV	23,5 %	34,0 %
V	15 %	14,0 %
VI	2 %	2,0 %
Ü (Lockermaterial)	15 %	15,0 %
=====		

Beim Tunnelvortrieb wurden einzelne Parameter der Gebirgsgüteklassifizierung neu bewertet, sodaß sich gegenüber der Prognose in den Klassen II und III Verschiebungen ergaben. Werden die Klassen II und III zusammengefaßt, so stimmt die Prognose mit den tatsächlichen Verhältnissen sehr gut überein. Zwischen den Klassen III und IV ergab sich eine Verschiebung von 10 %, die Klassen I, V, VI und Ü wurden auf rund 1 % genau prognostiziert.

3.9 Bewertung der Trassenführung

Am Beginn der Projektierungsarbeiten standen mehrere

Trassenvarianten zur Diskussion. Ursprünglich war eine näher bei Lermoos verlaufende Trasse mit kurzen Tunneln vorgesehen. Sie hätten wegen ihrer Lehnenlage schlechte geologische Verhältnisse angetroffen, insbesondere wäre durchfeuchtetes, rutschgefährdetes Lockermaterial zu durchörteren gewesen, und außerdem wären die Tunnel ungünstig zum Trennflächengefüge verlaufen. Eine grundsätzliche Änderung der geologischen Gegebenheiten war nur durch eine großzügige Verschwenkung der Tunneltrasse zu erzielen. Bei einem Kostenvergleich erwies sich die nun ausgeführte Trasse als wirtschaftlichste Lösung. Diese Trassenfestlegung war zutreffend, da der Tunnelvortrieb die Prognose bestätigte.

4. Tektonische Schlußfolgerungen

4.1 Gebirgsbau und Störungen

Der Lermooser Tunnel liegt im steilstehenden Südschenkel einer großen Mulde, die einen einfachen Baustil zeigt. Tektonische Komplikationen entstehen nur durch Kluft- und Störungsflächen. Sie verlaufen im Plattenkalk vorherrschend NNE-SSW und entsprechen der sogenannten Loisachrichtung. Die Intensität des Kluftgefüges nimmt gegen die Fernpaßfurche deutlich zu und hängt mit der Annäherung an ein großes Lineament zusammen, das über den Fernpaß zum Ehrwalder Becken und nach Garmisch-Partenkirchen verläuft. Das Kluftgefüge ist tektonisch angelegt, erst nachträglich wurde es durch schwerkraftbedingte Hangtektonik überprägt. Die Trennflächen stehen steil und weisen vorwiegend horizontale Harnischstriemungen auf. Aus dem Kluftgefüge wurde der primäre Spannungszustand rekonstruiert. Die größte Druckspannungskomponente verlief dabei NNE-SSW, die kleinste WNW-ESE, beide waren annähernd horizontal. Dieser Spannungszustand bewirkte Blattverschiebungen.

Daneben gibt es aber durch Störungen isolierte Bereiche mit geändertem Spannungszustand. Diese Gebirgszonen zeigen auffallend flache Trennflächen. Die größte Druckspannungskomponente verläuft zwar ebenfalls horizontal in NNE-SSW-Richtung, die kleinste Druckspannung steht aber vertikal. Unter diesen Spannungsverhältnissen sind kleinräumige Über- oder Unterschiebungen möglich. Die Tunnelaufschlüsse zeigen somit, daß bei großräumig homogenen Druckverhältnissen (Einengung in NNE-SSW-Richtung) durchaus unterschiedliche Bruch- und Bewegungsbilder entstehen können. Diese Erscheinungen sind auch von theoretischen Überlegungen her zu erklären (BOCK, 1971; 1972).

4.2 Auflockerung der Talflanken

Die starke primäre Zerklüftung der Talflanken, die nicht nur im Tunnelbereich zu beobachten ist, begünstigt Hangbewegungen. Das größte Ereignis dieser Art ist der Fernpaßfelssturz (ABELE, 1964; ABELE & MAIER, 1975), der von weiteren, allerdings kleineren Felsstürzen begleitet wird.

Die Mechanik und Ursachen dieser Hangbewegungen zeigte der Lermooser Tunnel. Die Talflanken bestehen aus spröden Karbonatgesteinen, die intensiv geklüftet sind. Die eiszeitliche Talausformung hat die Stabilität der Hänge gestört, die sich dadurch talwärts verformen. Klüfte öffnen sich zu Spalten, die durch eindringendes Wasser verwittern und Gleitbahnen bilden können. In der vorbereiteten Phase eines Bergsturzes können in der basalen Gleitzone auch plastische Verformungen auftreten. Die allmähliche Bergzerreißung führt zu einem leichten Vorwölben der Felsflanke unter gleichzeitiger Rotation der Schichtflächen. Die Hänge nähern sich immer mehr einem Grenzgleichgewicht, bis es z.B. durch Erdbeben zum Niederbrechen der Felsmassen kommt.

Im Bereich des Lermooser Tunnels kamen die Felsdeformationen aber nicht über das Anfangsstadium hinaus. Das aufgelockerte Gebirge wurde durch Calcitmineralisationen infolge zirkulierenden Bergwassers verfestigt und stabilisiert.

5. Danksagung

Der Verfasser möchte allen danken, die am Zustandekommen der vorliegenden Arbeit direkt oder indirekt beteiligt waren. Der Dank gilt insbesondere dem Landesbaudirektor 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 - Umfahrung Lermoos-Biberwier, deren Bauleiter und Mineure die geologischen Arbeiten laufend unterstützten, sowie Dipl.-Ing. LÄSSER und Dipl.-Ing. FEIZLMAYR, die mich über den Rahmen der projektsbezogenen baugeologischen Tätigkeit hinaus bei der Beschäftigung mit weiterführenden und vertiefenden geologischen Fragen förderten.

Literaturverzeichnis

- ABELE, G.: Die Fernpaßtalung und ihre morphologischen Probleme (Tübinger Geographische Studien 12), Tübingen, 123 S, 1984.
- ABELE, G. & MAIER, J.: Fernpaß-Garmisch-Partenkirchen: aus Tirol - ein geograph. Exkursionsführer - Innsbrucker Geograph. Studien, Bd. 2, S 145-165, Innsbruck, 1975.
- AMPFERER, O.: Erläuterungen zur geologischen Spezialkarte der Republik Österreich. Blatt Lechtal - Geol.B.A., 55 S, 1924.
- BESLER, W.: Die Jura-Fleckenmergel des Tannheimer Tales (Außerfern, Tirol). - Jb. Geol.B.A., 102/3, S 407-460, 1959.
- BOCK, H.: Computer simulation of second order faults. Rock Mech. Bd. 3, No. 4, S 225-238, Wien, 1971.
- BOCK, H.: Vielfache Bruchstrukturen bei einfachen Beanspruchungen - Rechnerische Untersuchungen mit Hilfe der Finite-Element-Methode. - Geol. Rdsch., Bd. 61/3, S 824-849, Stuttgart, 1972.
- CZURDA, K. & NICKLAS, L.: Zur Mikrofazies und Mikrostratigraphie des Hauptdolomits und Plattenkalk-Niveaus der Klostertaler Alpen und des Rätikon (Nördliche Kalkalpen, Vorarlberg). - Festband Geol. Inst. 300-Jahr-Feier Univ. Innsbruck, S 165-253, 1971.
- FABRICUIS, F.H.: Beckensedimentation und Riffbildung an der Wende Trias/Jura in den Bayerischen-Tiroler Kalkalpen. - E.J. Brill, Leiden, 1966.
- JACOBESHAGEN, V.: Lias und Dogger im Westabschnitt der Nördlichen Kalkalpen. - Geol. Rom. III, S 303-318, Rom 1964.
- JACOBESHAGEN, V.: Die Allgäu-Schichten (Jura-Fleckenmergel) zwischen Wettersteingebirge und Rhein. - Jb. Geol.B.A. 108, S 1-114, 1965.
- KÖHLER, M.: Mikrofazielle, geochemische und paläographische Untersuchungen des Plattenkalks und der Kössener-Schichten der mittleren Gailtaler Alpen (Kärnten). - Veröff. Univ. Innsbruck, Bd. 86, Festschr. HEISSEL, S 129-180, 1973.
- KÖHLER, M.: Perjuntunnel (Landeck, Tirol): Baugeologische Verhältnisse, Prognose und tektonische Schlußfolgerungen. - Geol. Paläont. Mitt. Innsbruck, Bd. 12/12, S 249-267, 1983.
- MÜLLER-JUNGBLUTH, W.U.: Sedimentologische Untersuchungen des Hauptdolomits der östlichen Lechtaler Alpen, Tirol. - Festband Geol. Inst. 300-Jahr-Feier Univ. Innsbruck, S 255-308, 1972.

