

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ
GEOTECHNISCHE SERIE

herausgegeben von der

Schweizerischen Geotechnischen Kommission

(Organ der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft)

MATERIALI PER LA GEOLOGIA DELLA SVIZZERA
SERIE GEOTECNICA

pubblicati della

Commissione Geotecnica Svizzera

(Organo della Società Elvetica di Scienze Naturali)

Lieferung 70

Bundesamt für Strassenbau
Bern

Cantone Ticino
Dipartimento delle Pubbliche
Costruzioni

Geologischer Schlussbericht Gotthard-Strassentunnel

Zusammenfassung

F. Keller, H. Wanner, T. R. Schneider

1987

In Kommission bei Kummerly & Frey AG, Geographischer Verlag, Bern

VORWORT DER SCHWEIZERISCHEN GEOTECHNISCHEN KOMMISSION

Die Kommission erklärte sich an ihrer Sitzung vom 30. Januar 1985 bereit, den Schlussbericht über den Gotthard-Strasstunnel in die Geotechnische Serie der Beiträge zur Geologie der Schweiz aufzunehmen. Das Manuskript wurde uns von den Autoren F. Keller, T.R. Schneider und H. Wanner im Herbst 1986 zugestellt. Es entspricht der Zusammenfassung zahlreicher, unpublizierter Detailberichte, welche zuhanden des Bundesamtes für Strassenbau sowie für die Kantone Tessin und Uri verfasst worden sind.

Es wird vorerst eine kurze generelle Übersicht über die Geologie gegeben, dann wendet sich der Bericht den geotechnischen Problemen zu, welche sich bei der Durchfahrung der einzelnen Gesteinsserien ergaben. Besonders wertvoll dürfte die Beschreibung sowie die sorgfältige graphische Darstellung der Detailstrukturen und Grundwasserverhältnisse im Gebirge sein. Das bautechnische Verhalten wird besprochen und mit

den Prognosen verglichen, welche sich ihrerseits teilweise auf die Erfahrungen beim Bau des Bahntunnels abstützen konnten. Diese stammen allerdings aus einer Zeit, als der Einsatz von Maschinen beim Tunnelbau noch in den Anfängen stand.

Die Kommission dankt den Autobahnbüros der Kantone Tessin und Uri für die Finanzierung des Drucks dieser wertvollen Arbeit sowie dem Bundesamt für Strassenbau für seine konstruktive Mithilfe.

Für den Inhalt von Text und Figuren sind die Autoren allein verantwortlich.

Zürich, Februar 1987 Der Präsident der Schweizerischen Geotechnischen Kommission

C. Schindler

INHALT	
1	EINLEITUNG
1.1	Übersicht über den geologischen Schlussbericht
1.2	Geologische Aufgaben, Bedeutung
1.3	Wissenschaftliche Untersuchungen
1.4	Dankagung
2	ÜBERSICHT ÜBER DIE GEOLOGIE UND DAS SAUWERK
2.1	Allgemeine geologische Übersicht
2.1.1	Geologische Vorgeschichte
2.1.2	Der glaziale Kolk von Andermatt
2.2	Geologische und geotechnische Vorkommnisse
2.3	Profil und Lithoführung
2.4	Geologische Vermutungen und Sonderfragen
2.4.1	Geologische Sonderfragen vor dem Bau
2.4.2	Geologische Sonderfragen während dem Bau
2.5	Tunnelstrukturierung

2.5.1	Profil-Übersichten
2.5.2	Rundschicht-Übersichten
2.5.3	Querschnitt-Übersichten
2.5.4	Profil-Serie
2.5.5	Querschnitt-Serie
2.5.6	Mineralogische / Petrographische Serien
3	Geotechnische Untersuchungen
3.1	Klassifizierung
3.2	Struktur und Durchdringung des Gebirges
3.2.1	Systematische Durchdringung
3.2.2	Recherchierung und zugehörige Prognosen
4	PROGNOSTIK UND BEWERTUNG
4.1	Übersicht
4.2	Abweichungen der Prognose von der Erfahrung
5	GEOTECHNIK
5.1	Einleitung
5.1.1	Übersicht
5.1.2	Geologische Hintergrunddaten
5.2	Geotechnische Verfahren
5.2.1	Neue Geräte
5.2.2	Statische Charakteristika des Bauwerks

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT DER SCHWEIZERISCHEN GEOTECHNISCHEN KOMMISSION	III	3.	GEOLOGISCHE VERHÄLTNISSE IM TUNNEL	7
INHALTSVERZEICHNIS	V	3.1	Übersicht	7
VERZEICHNIS DER TEXTFIGUREN	VII	3.2	Durchhörte Gesteinsserien	7
VERZEICHNIS DER TABELLEN	VIII	3.2.1	Lockergesteine Nordportal	7
VERZEICHNIS DER ANHÄNGE	IX	3.2.2	Aare-Granit	9
KURZFASSUNG	XI	3.2.3	Südliche Gneiszone des Aar-Massivs	10
RIASSUNTO	XIII	3.2.4	Mesozoikum der Urseren-Zone	12
RÉSUMÉ	XVI	3.2.5	Permokarbon	13
SUMMARY	XIX	3.2.6	Nördliche Paragneiszone des Gotthard-Massivs	14
		3.2.7	Gamsboden-Granitgneis	15
		3.2.8	Guspis-Zone	16
		3.2.9	Fibbia-Granitgneis	16
		3.2.10	Rotondo-Granit	16
		3.2.11	Sorescia-Gneis	16
		3.2.12	Prato-Serie	17
		3.2.13	Tremola-Serie	17
		3.2.14	Mesozoikum (Trias) der Nufenen-Zone	19
1. EINLEITUNG	Seite 1	3.3	Tonmineralogische Untersuchungen	19
1.1 Übersicht über den geologischen Schlussbericht	1	3.4	Kluftmineralien	20
1.2 Geologische Aufnahme, Handstück- sammlung	2	3.5	Strukturen und Durchtrennung des Gebirgskörpers	20
1.3 Wissenschaftliche Untersuchungen	2	3.5.1	Systematische Durchtrennung	21
1.4 Danksagung	2	3.5.2	Ruschelzonen und junge Störungen	25
2. ÜBERSICHT ÜBER DIE GEOLOGIE UND DAS BAUWERK	3	4.	PROGNOSE UND BEFUND	27
2.1 Allgemeine geologische Übersicht	3	4.1	Übersicht	27
2.1.1 Geologische Vorgeschichte	3	4.2	Abweichungen des Befundes von der Prognose	27
2.1.2 Der glaziale Kolk von Andermatt	5	5.	GEOTECHNIK	30
2.2 Geologische und geotechnische Vorkenntnisse	5	5.1	Einleitung	30
2.3 Projekt und Linienführung	5	5.1.1	Übersicht	30
2.4 Geologische Vorstudien und Sondierungen	6	5.1.2	Geologische Einflussfaktoren	30
2.4.1 Geologische Sondierungen vor dem Bau	6	5.2	Geotechnische Verhältnisse in den einzelnen Gesteinsserien	31
2.4.2 Geologische Sondierungen während dem Bau	6	5.2.1	Aare-Granit	31
2.5 Tunnelmetrierung	6	5.2.2	Südliche Gneiszone des Aar-Massivs	32

5.2.3	Mesozoikum	33	6.	BERGWASSER	57
5.2.4	Permokarbon	33			
5.2.5	Nördliche Paragneiszone des Gotthard-Massivs	34	6.1	Hydrogeologische Übersicht	57
5.2.6	Gamsboden-Granitgneis	34	6.2	Der Wasseranfall im Tunnel	57
5.2.7	Guspis-Zone	34			
5.2.8	Fibbia-Granitgneis und Rotondo-Granit	35	6.3	Einfluss des Tunnels auf Oberflächen- quellen und Grundwasser	59
5.2.9	Sorescia-Gneis	35			
5.2.10	Tremola-Serie	35	6.4	Chemismus des Bergwassers	59
5.2.11	Triasstrecke Südportal	36			
5.3	Spezielle technische Probleme und Vorkommnisse	36			
5.3.1	Lockergesteinsstrecke Nordportal	36	7.	FELSTEMPERATUREN	61
5.3.2	Unterfahrung des Bahntunnels	37			
5.3.3	Hydrothermal zersetzter Granit	37	7.1	Einleitung, Messmethode	61
5.3.4	"Mesozoikums-Strecke"	38			
5.3.5	Bergschlagartige Abschalungen	43	7.2	Resultate, Temperaturverlauf	61
5.3.6	Zwischenangriff Los Süd (Guspis-Zone)	44	7.3	Vergleiche mit der Prognose und den Wassertemperaturen	61
5.3.7	Portalzone Südportal	44			
5.3.8	Schächte und Zentralen	45			
5.4	Felsmechanische Versuche, geotechnische Kennziffern	46	8.	GESTEINSRADIOAKTIVITÄT	63
5.4.1	Übersicht	46			
5.4.2	Festigkeitsbestimmungen	47	8.1	Einleitung, durchgeführte Untersuchungen	63
5.4.3	Quellversuche	47			
5.5	Ausbruchsklassenverteilung	50	8.2	Resultate	63
5.5.1	Übersicht	50			
5.5.2	Allgemeine Tendenzen	51			
5.5.3	Einbaustrecken	51			
5.5.4	Ausbruchsklassen im Aare-Granit (Vollausbruch/Teilausbruch)	53		LITERATURVERZEICHNIS	64
5.5.5	Ausbruchsklassenverteilung im Tunnel	53			
5.6	Vergleich Prognose — Befund	56		DEFINITION DER AUSBRUCHSKLASSEN	67

VERZEICHNIS DER TEXTFIGUREN

Figur 1:	Seite 4	Figur 10:	Seite 39
Geologisch-tektonische Übersicht 1 : 200'000		Geologisch-geotechnische Verhältnisse im Bereich der sogenannten Druckstrecke des Bahntunnels	
Figur 2:	Seite 8	Figur 11:	Seite 40
Detailprofil durch die nördliche Portalzone		Schwere Profile der zweiten Rekonstruktion in der Druckstrecke des Bahntunnels	
Figur 3:	Seite 8	Figur 12:	Seite 42
Typische Querschnitte im Bereich der Lockergesteinsstrecke beim Nordportal		Ausbruchsphasen und Betonierungsetappen im Bereich der Mesozoikums-Strecke	
Figur 4:	Seite 13	Figur 13:	Seite 43
Geröll aus einem Muskovit-Turmalin-Gneis in feinkörnigem Serizitschiefer		Arbeiten und Vortriebe im Bereich der "Mesozoikums-Strecke"	
Figur 5:	Seite 20	Figur 14:	Seite 43
Entstehung mineralführender Zerrklüfte		Lage der bergschlagartigen Abschalungen im Aare-Granit	
Figur 6:	Seite 24	Figur 15:	Seite 60
Durchtrennung des Aare-Granites		Häufigkeitsverteilung der Bergwasser-Sulfatgehalte in den verschiedenen Gesteinsserien der Nordseite	
Figur 7:	Seite 26	Figur 16:	Seite 62
Knickartige Verstellung der Schieferungsflächen im Permo-karbon des Sicherheitsstollens		Vergleich von Fels- und Quelltemperatur im Sicherheitsstollen der Tunnelnordseite	
Figur 8:	Seite 31		
Lage der Lamprophyre bezüglich der Tunnelaxe			
Figur 9:	Seite 37		
Lage der Trennflächensysteme im Bereich der Unterfahrung des Bahntunnels			

VERZEICHNIS DER TABELLEN

Tabelle 1: Petrographische Gliederung des Aare-Granites	Seite 9	Tabelle 13: Druck- und Zugfestigkeiten, Elastizitäts- und Verformungsmodul	Seite 49
Tabelle 2: Gesteinsfolge im Südteil der südlichen Gneiszone	Seite 12	Tabelle 14: Quelldrucke bei verhinderter Deformation	Seite 50
Tabelle 3: Schichtfolge im Mesozoikum der Urseren-Zone	Seite 12	Tabelle 15: Relative Quellung bei verschiedenen Belastungen	Seite 50
Tabelle 4: Mineralgehalt der Gesteine in der Prato-Serie	Seite 17	Tabelle 16: Einbaustrecken	Seite 52
Tabelle 5: Anteil der verschiedenen Gesteinstypen an der Tremola-Serie	Seite 17	Tabelle 17: Ausbruchsklassenverteilung im Aare-Granit beim Tunnel	Seite 54
Tabelle 6: Modalgehalte der wichtigsten Gesteinstypen der Tremola-Serie	Seite 18	Tabelle 18: Ausbruchsklassenverteilung	Seite 55
Tabelle 7: Lage der Mittelwerte von Trennflächensystemen in Gefügediagrammen	Seite 22	Tabelle 19: Prognose und Befund im Mesozoikum bezüglich Einbausklassen	Seite 56
Tabelle 8: Vorherrschende systematische Durchtrennung des Felskörpers	Seite 23	Tabelle 20: Gegenüberstellung von Prognose und Befund Ausbruchsklassen	Seite 56
Tabelle 9: Vergleich Prognose — Befund bezüglich der Gesteinsserien	Seite 28	Tabelle 21: Bergwasserführung in den verschiedenen Gesteinsserien	Seite 58
Tabelle 10: Geotechnische Homogenbereiche im Aare-Granit	Seite 31	Tabelle 22: Betonschädigende Faktoren im Bergwasser	Seite 59
Tabelle 11: Injektionsarbeiten bei Tm N 4205	Seite 41	Tabelle 23: Mittlere Gesteinsradioaktivität	Seite 63
Tabelle 12: Scherfestigkeiten	Seite 48		

VERZEICHNIS DER ANHÄNGE

Anhang 1:
Literaturverzeichnis

Anhang 2:
Definition der Ausbruchsklassen

Anhang 3:
Geologisches Befundprofil durch den Strassentunnel,
1 : 20'000

Anhang 4a:
Geologisch-geotechnischer Horizontalschnitt, 1 : 10'000
Nordseite

Anhang 4b:
Geologisch-geotechnischer Horizontalschnitt, 1 : 10'000
Südseite

Anhang 5:
"Spezialvortrieb Mesozoikum" Tm 4135–4439
Geologischer Horizontalschnitt durch die Sohle der oberen
Widerlagerstollen, 1 : 400

Anhang 6:
Zona di Guspis, attacco intermedio
Rilevamenti geologico-geotecnici dal m 4950 al m 5300

Anhang 7:
Bergwasser (Wasserführung und Chemismus) Längsprofil,
1 : 20'000

Anhang 8:
Felstemperaturen, Längsprofil, 1 : 20'000

Anhang 9:
Gesteinsradioaktivität, Längsprofil, 1 : 20'000

Die vorliegende Veröffentlichung ist eine Zusammenfassung der ausführlichen Schlussberichte über die Teilgebiete Geologie, Geotechnik, Bergwasser, Felstemperaturen und Gesteinsradioaktivität. Diese liegen für den Nordteil in Deutsch und für den Südteil in Italienisch vor und sind beim Bundesamt für Strassenbau, bei den Nationalstrassenbüros Uri und Tessin, bei der ETH Zürich, der Schweiz. Geologischen Dokumentationsstelle und an anderen Orten deponiert und einsichtbar. Zehn Handstücksammlungen mit insgesamt über 1600 Belegstücken sind bei den geologischen Hochschulinstituten deponiert.

Geologie des Bauwerks

Der Strassentunnel quert von Norden nach Süden das Aar-Massiv, die Urseren-Zone und das Gotthard-Massiv. Um der sehr tiefreichenden Mulde von Andermatt auszuweichen, verläuft das Trasse in einem weiten Bogen Richtung Westen fast unter dem Gotthardpass. Als Folge der hier geringeren Überlagerung wurden dadurch auch die Lüftungsschächte kürzer. Im mittleren Teil beträgt die Entfernung zum Eisenbahntunnel mehr als 2 km. Der Strassentunnel durchquert dadurch mehr von den bautechnisch günstigeren Orthogneisen. Die nicht standfeste Übergangszone vom Mesozoikum zum Permokarbon, in welcher der Bahntunnel auf grosse Schwierigkeiten stiess, war auch vom Strassentunnel nur mit Hilfe spezieller Baumethoden zu durchfahren.

Der Strassentunnel durchörtert von N nach S die folgenden Gesteinsserien:

- im Aaremassiv: Lockergesteine (alte Deponie Eisenbahntunnel) – Aare-Granit – Südliche Gneiszone des Aar-Massivs
- im Gotthardmassiv: Mesozoikum der Urserenzone – Permokarbon – Nördliche Paragneiszone – Gamsboden-Granitgneis – Guspiszone (Paragneis) – Fibbia-Granitgneis – Rotondo-Granit – Sorescia-Gneis – (Prato-Serie) – Tremola-Serie – Trias der Nufenenzone

Obwohl keine Sondierbohrungen von der Oberfläche her ausgeführt worden waren, entspricht die Prognose weitgehend den angetroffenen Verhältnissen. Die Guspis-Zone erwies sich auf Tunnelniveau als wesentlich mächtiger als angenommen.

Geotechnik

Der Strassentunnel durchfuhr vorwiegend feste Gesteine. Ihr geotechnisches Verhalten wurde weitgehend von der Durchtrennung des Gebirgskörpers und der Lage der Trennflächen bezüglich des Tunnels bestimmt. Daneben wirkten sich auch noch postmetamorphe Störungen, verschiefterte Lamprophyre sowie Quarzlinen negativ auf die Standfestigkeit aus. Das unterschiedliche Gebirgsverhalten im kleinen Sicherheitsstollen und im grossen Tunnelprofil führte zu unterschiedlichen Anforderungen an die Gebirgssicherung. Es wurden die folgenden geotechnischen Verhältnisse angetroffen:

Bei der Durchörterung der *Deponie* des Eisenbahntunnels wurde z. T. rolliges Material angetroffen. Stellenweise war ein Brustverzug nötig, besonders da auch erhebliche Wasserzutritte während der Schneeschmelze erschwerend wirkten.

Der *Aare-Granit* war auf den ersten 1200 m ab Nordportal weitgehend standfest. Anschliessend folgte eine rund 1000 m mächtige Zone mit Lamprophyren, die Kaminbildungen und Niederbrüche zur Folge hatten. Während im Sicherheitsstollen die Lamprophyrstrecke mit wenig Gunit und Ankern gemeistert werden konnte, mussten im Strassentunnel nach einem Unfall die Lamprophyrstrecken aus Sicherheitsgründen mit Einbaubögen abgestützt werden. Nach einem weiteren Unfall in einer Zone mit hydrothermal zersetztem Granit bei Tm N 2309 wurde auf Teilausbruch umgestellt und im ganzen verbleibenden Nordlos zunächst die Kalotte ausgebrochen und gesichert und erst später die Strosse abgebaut.

In der *Südlichen Gneiszone* des Aar-Massivs wirkten sich die z. T. intensive alpine Verschieferung, wenig feste Gesteine wie Glimmerschiefer sowie zahlreiche Ruschelzonen negativ auf die geotechnischen Verhältnisse aus. Aufgrund der im Sicherheitsstollen angetroffenen Verhältnisse konnte im Haupttunnel jeweils rechtzeitig eine Profilerweiterung und entsprechende Felssicherungen angeordnet werden.

Die tektonische Grenze zwischen Aar-Massiv und Urseren-Zone besteht aus einer verlehnten Störzone, die die Tunnelachse unter einem Winkel von 45 Grad schneidet. In den südlich anschliessenden, plattigen Kalken genügte in der Regel armer Spritzbeton als Felssicherung. Die nachfolgende Strecke mit weichen Tonschiefern (Jura), Gips und Dolomit (Trias) und dem Übergang zum Permokarbon wurde unter dem Namen "*Mesozoikums-Strecke*" in Deutscher Bauweise ausgeführt. Entsprechend der "Druckstrecke" im Bahntunnel war auch hier – wie erwartet – die Gesteinsfestigkeit abschnittsweise sehr gering. Im Sicherheitsstollen musste nach einem Kamineinbruch in Tonschiefern bei Tm N 4148 mit ei-

nem Brustverzug weitergefahren werden, teilweise durch druckhaftes Gebirge. Bis Tm N 4421 folgten mehrere Abschnitte, die mit Marciavanti und Brustverzug bewältigt werden mussten. Zwischen Tm N 4205 und 4235 erfolgten Injektionen, die nicht die erhoffte Wirkung zeigten. Im kalkigen und wasserdurchlässigen Mesozoikum traten die Schwierigkeiten in der Regel während des Vortriebs auf, im verlehmtten und schlecht durchlässigen Permokarbon dagegen infolge der Deformationen erst nach dem Vortrieb.

Nachdem in der Achse des Strassentunnels ab Tm N 3990 ein Sondierstollen von Norden und ein Gegenangriff vom Schacht Hospental ausgeführt waren, wurde die "Mesozoikums-Strecke" im Tunnel von N und S angegangen. Zunächst wurden nach Deutscher Bauweise Paramentstollen erstellt und nach unten ausgeweitet. Der Kalottenausbruch erfolgte nachträglich, und zuletzt wurde der verbleibende Kern abgebaut.

Im anschliessenden *Permokarbon* war die Standfestigkeit des Gebirges deutlich günstiger, doch verursachten Quarzlin sen, Schiefer- bzw. Phyllit zwischenlagen und verlehmt e Störungs zonen einige Schwierigkeiten. Die *Nördliche Paragneiszone* des Gotthard-Massivs verhielt sich weitgehend standfest mit Ausnahme einiger Niederbrüche an schieferungsparallelen Störungen.

Der *Gamsboden-Granitgneis*, an sich eine standfeste Gesteinsserie, war stellenweise grobklüftig und führte vor allem im Südteil sehr viel Wasser. Dank einer gut angepassten Baustelleninstallation des Loses Süd mit Sliding Floor und beweglicher Arbeitsbühne (gleichzeitig Schutzdach) konnte dieses Gestein ohne grosse Probleme im Vollausbuch auf gefahren werden.

Die südlich anschliessende *Guspis-Zone* (auf der Baustelle des Südloses als "Paragneiszone" bezeichnet), war sehr schwierig zu bewältigen. Nachdem sich im Sicherheitsstollen druckhafte Stellen zeigten, entschloss man sich auch hier zu einem Sondierstollen (ab Tm S 4800) und aufgrund der schlechten Verhältnisse zu einem Zwischenangriff von Süden und von Norden. Ähnlich wie im Nordlos wurde auch hier die Deutsche Bauweise gewählt, wobei sich in den Paramenten erhebliche Verformungen einstellten. Noch vor dem Kernabbau wurden daher die Paramente durch eine massive Ankerung (Kabelanker) zurückgebunden. Gleichwohl traten Verformungen von mehr als 0.5 m ein, sodass die Paramente später segmentweise saniert werden mussten. Auch die druckhaften Partien des Sicherheitsstollens wurden nach erheblichen Konvergenzen saniert durch Ausweitung zu einem Kreisprofil mit schwerem Stahlringleinbau.

Die südlich anschliessende Zone des *Fibbia-Granitgneis* und des *Rotondo-Granites* verhielt sich — abgesehen von einzelnen grobklüftigen Strecken — weitgehend standfest bei geringer Wasserführung. In massigen Partien trat Bergschlag auf.

Im *Sorescia-Gneis* musste in Einzelfällen bei Störungszonen auf Teilausbuch umgestellt werden. Die *Tremola-Serie* (incl. deren Nordteil als Prato-Serie) wies häufig Ruschelzonen und Mylonite auf, sodass ein Teil dieser Strecke im Teilausbuch auf gefahren werden musste. Weitere Schwierigkeiten ergaben sich durch Aufblättern der Ortsbrust in schiefrigen Partien sowie durch einige grosse Wassereinbrüche.

Am Südportal wurde eine kurze *Triasstrecke* angetroffen und im Sicherheitsstollen mittels Bernold-Bleichen ausgekleidet. Im Strassentunnel erfolgte hier ein Voreinschnitt, indem die seitlichen Böschungen durch Bohrpfähle gesichert wurden.

Sonderbauwerke, Felsmechanik

Die *Vertikalschächte Hospental und Guspisbach* wurden konventionell von oben nach unten ausgesprengt. Die Gebirgsstandfestigkeit war so günstig, dass erst nach jeweils 10 – 20 m Absenkung der Verkleidungsbeton eingebracht werden musste. Im Schacht Guspisbach erschwerte ein starker Wasserzudrang gelegentlich die Arbeiten.

Die *Schrägschächte Bözberg und Motto di Dentro* wurden mechanisch auf gefahren, und zwar als Pilotstollen mit 3 m Durchmesser von unten nach oben und anschliessend mit einer Aufweitungsmaschine mit 6.6 m Durchmesser von oben nach unten. Der im Schrägschacht Bözberg durch gefahrene Aare-Granit war weitgehend standfest. Im Schrägschacht Motto di Dentro blättern die Tremolaschiefer stark auf und führten zu erheblichen Konvergenzen. Zudem wurde der Vortrieb durch eine 30 m lange Störungszone für längere Zeit blockiert. Beim Ausbruch der Lüftungskaverne am Schachtfuss Motto di Dentro wurde eine Zerrklüft angefahren, die mehrere Kubikmeter Kalzitkristalle und etwas Nadelquarz enthielt.

In beiden Baulosen erfolgten ausgedehnte *felsmechanische Versuche*, insbesondere Direktscherversuche im Labor, ferner Verformungsmessungen vom Sicherheitsstollen aus, Messungen des natürlichen Spannungszustandes, Konvergenzmessungen, Quelldruckmessungen etc.

Bergwasser, Temperaturen, Radioaktivität

Die *Wasserführung* der einzelnen Gesteinsserien war sehr wechselhaft. Besonders die portalnahen Zonen der Lockergesteinsstrecke (Los Nord) und der Tremola-Serie (Los Süd) waren stärker wasserführend. Zwischen dem Südportal und Tm S 930 erfolgten mehrere grosse Wassereinbrüche, ebenso bei Tm S 4820 in der Guspis-Zone, die sonst weitgehend trocken war. Im Gamsboden-Granitgneis waren die meisten Klüfte stark wasserführend, was den Vortrieb behinderte. Der Sicherheitsstollen hatte hier eine deutliche Drainagewirkung. Die Unterquerung der Reuss und das benachbarte Becken von Andermatt führten nicht zu erhöhtem Wasserzudrang. Im Mesozoikum und Permokarbon war das Bergwasser stark sulfataltig und daher betonaggressiv. Auch im Aare-Granit und in der südlichen Gneiszone traten erhöhte Sulfatgehalte auf.

Die *Felstemperatur* widerspiegelt den Verlauf der Topografie und erreichte im Maximum 32 Grad. Der geländekorrigierte Temperaturgradient betrug im Nordteil 25.6 Grad/km, im Mittelteil 22.8 Grad/km und im Südteil 28.5 Grad/km.

Durch Szintillometermessungen und durch Spektrometerproben wurde die *Gesteins-Radioaktivität* untersucht. Sie war in den granitischen Gesteinen drei- bis fünfmal so hoch wie in den Parametamorphiten und im Mesozoikum und entspricht den Erfahrungswerten an vergleichbaren Gesteinen. Ein Spitzenwert wurde gemessen im Bereich einer wasserführenden Störung mit zersetztem Gamsboden-Granit.

Questa pubblicazione è il riassunto dei diversi rapporti conclusivi che trattano dettagliatamente delle condizioni geologiche, geotecniche, idrogeologiche e della temperatura e radioattività delle rocce nella galleria stradale del San Gottardo. Questi rapporti sono stati compilati in lingua tedesca per il lotto Nord ed italiana per quello Sud. Essi sono depositati presso il Dipartimento Federale delle Costruzioni Stradali, gli Uffici Strade Nazionali dei Cantoni Uri e Ticino, i Politecnici Federali di Zurigo, l'Archivio Geologico Svizzero ed in altri luoghi, dove sono pure consultabili. Presso gli Istituti di Geologia delle Scuole Superiori sono state depositate le dieci collezioni di rocce per un totale di più di 1600 campioni.

Geologia

La galleria stradale attraversa da Nord verso Sud il Massiccio dell'Aar, la Zona d'Orsera ed il Massiccio del Gottardo. Per evitare la profonda conca glaciale di Andermatt, il tracciato della galleria descrive un ampio arco verso Ovest, passando quasi al di sotto del Passo del Gottardo. Essendo così la profondità del tracciato, rispetto alla superficie, minima, i pozzi di ventilazione risultano più corti. Nella parte centrale, la distanza tra la galleria stradale e quella ferroviaria è superiore ai 2 km il che permette di attraversare per un tratto maggiore gli ortogneiss, più favorevoli dal punto di vista geotecnico. La problematica zona di transizione tra il Mesozoico ed il Permocarbone, dove già la galleria ferroviaria incontrò grosse difficoltà, fu attraversata con l'aiuto di speciali metodi di avanzamento.

Le serie rocciose attraversate sono da Nord a Sud:

- nel Massiccio dell'Aar: rocce incoerenti (vecchia deponia della galleria ferroviaria) — Granito dell'Aar — Zona gneissica meridionale del Massiccio dell'Aar
- nel Massiccio del Gottardo: Mesozoico della Zona d'Orsera — Permocarbone — Gneiss granitico del Gamsboden — Zona di Guspis (paragneiss) — Gneiss granitico della Fibbia — Granito di Rotonondo — Gneiss di Sorescia - (Serie di Prato) — Serie della Tremola — Trias della Zona della Novena.

Anche senza aver effettuato alcuna perforazione geognostica dalla superficie, le condizioni geologiche incontrate corrispon-

dono largamente a quelle previste: solo la Zona di Guspis si mostrò, all' altezza della galleria, essenzialmente più potente del prognosticato.

Geotecnica

La galleria stradale attraversa soprattutto rocce coerenti, il cui comportamento geotecnico fu determinato per mezzo delle strutture e delle superfici di distacco del corpo roccioso e della loro orientazione rispetto al tunnel. Zone di dislocazione post-metamorfiche, lamprofiri scistosi e lenti quarzose hanno avuto un effetto negativo sulla integrità, fermezza delle rocce. Le diverse condizioni geotecniche, tra il piccolo cunicolo di sicurezza e la più grande galleria stradale, esigettero misure precauzionali differenti.

Da Nord a Sud si riscontrarono le seguenti condizioni geotecniche:

Al portale Nord, durante l'attraversamento del *materiale di deponia* della galleria ferroviaria, fu incontrato un terreno sciolto in parte scorrevole. In alcuni tratti fu necessario rivestire provvisoriamente il fronte di scavo, soprattutto a causa di rilevanti venute d'acqua durante il periodo di scioglimento delle nevi.

Il *Granito dell'Aar* fu per i primi 1200 m dal portale Nord in larga misura integro, ma la presenza di lamprofiri nei seguenti 1000 m causò la formazione di camini e fratture. Queste difficoltà furono superate nel cunicolo di sicurezza per mezzo di bullonaggi e poca gunite. Nella galleria stradale, dopo essersi verificato un incidente, si effettuò la posa di cinte metalliche, aumentando così le misure di sicurezza nel tratto ricco in lamprofiri. Dopo un ulteriore incidente nella zona caratterizzata da granito disgregato da fenomeni idrotermali, il metodo di avanzamento fu cambiato a partire dal Tm N 2309. Per tutto il resto del lotto Nord si effettuò dapprima l'avanzamento ed il rivestimento di sicurezza in calotta, per poi procedere con lo scavo dello strozzo.

Nella *Zona gneissica meridionale* del Massiccio dell'Aar la scistosità alpina, a tratti molto intensa, numerose zone fratturate, sconnesse e l'occorrenza di micascisti hanno avuto un effetto naturalmente negativo sulla fermezza delle rocce. Grazie alle condizioni geotecniche preventivamente incontrate nel cunicolo di sicurezza, fu possibile disporre per tempo l'ampliamento della sagoma nella galleria principale e le corrispondenti strutture di sostegno.

Il contatto tettonico tra Massiccio dell'Aar e Zona d'Orsera è caratterizzato da una zona di dislocazione con limo, che taglia l'asse del tunnel con un angolo di 45 gradi. Negli adiacenti calcari a stratificazione sottile fu sufficiente effettuare un rivestimento di spruzzatura di calcestruzzo armato. Nel tratto seguente di argilloscisti (Giurassico), gessi e dolomie (Trias) e nella transizione al Permocarbonifero si dovette procedere con il metodo tedesco; questo tratto prese il nome di "tratto Mesozoico" ("Mesozoikums-Strecke"). Come previsto anche nel corrispondente tratto della galleria ferroviaria ("Druckstrecke") la integrità, fermezza delle rocce fu in alcuni settori molto bassa. Nel cunicolo di sicurezza, dopo la formazione di un camino negli argilloscisti, si dovette armare provvisoriamente il fronte di scavo a partire dal Tm N 4148 in settori con terreni molto spingenti. Fino al Tm N 4421 diversi settori furono effettuati con il marciavanti e rivestendo provvisoriamente il fronte di scavo. Le iniezioni di intasamento tra il Tm N 4205 e 4235 non diedero gli effetti desiderati. Nei calcari mesozoici, permeabili, le difficoltà sorsero già durante lo scavo, mentre nelle rocce permocarbonifere con limo e poco permeabili la deformazione avvenne dopo l'avanzamento.

A partire dal Tm N 3990 fu costruito un cunicolo di esplorazione nell'asse della galleria in direzione Sud ed uno corrispondente a partire dal pozzo di Hospental in direzione Nord. Fu così possibile attraversare completamente il "tratto Mesozoico" e programmarne il metodo di scavo. Secondo il metodo tedesco si eseguirono dapprima i piedritti a partire da cunicoli laterali che vennero ampliati verso il basso. Seguì poi lo scavo della calotta ed infine l'allargamento a tutta la sezione.

Il Permocarbonifero del tratto seguente fu geotecnicamente meno impegnativo, anche se alcuni problemi vennero causati da lenti quarzose, orizzonti scistosi e fillitici, e zone di dislocazione con limo.

La Zona a paragneiss settentrionale del Massiccio del Gottardo mostrò in larga misura rocce ferme, integre ad eccezione di un abbassamento della calotta causato da una frattura parallela alla scistosità.

Gli Gneiss granitici del Gamsboden, rocce di per sé ben salde, mostrarono tratti intensamente fratturati e conseguentemente caratterizzati da importanti venute d'acqua, soprattutto nella parte meridionale. Queste difficoltà furono superate grazie ad una adeguata installazione nell'area di lavoro del lotto Sud. Con "sliding floor" ed una piattaforma mobile di lavoro coperta da un tetto di protezione, fu possibile eseguire lo scavo a sezione piena senza particolari difficoltà.

La Zona di Guspis (denominata "Zona a paragneiss" nel lotto Sud), fu molto difficile da superare. Dopo aver riscontrato nel cunicolo di sicurezza terreni a tratti molto spingenti, si decise anche qui per un cunicolo esplorativo (a partire dal Tm S 4800) e, date le pessime condizioni, ad un attacco sia da Nord che da Sud. Come per il lotto Nord si preferì adottare anche qui il metodo tedesco, benché si riscontrarono deformazioni notevoli lungo i piedritti. Prima ancora di effettuare lo scavo del nucleo della galleria si procedette ad un massiccio ancoraggio con tiranti dei piedritti. Nonostante ciò si assistette ad una ulteriore deformazione di più di 0.5 m cosicché fu necessario risa-

nare ulteriormente i piedritti per segmenti. Anche i tratti molto spingenti del cunicolo di sicurezza, che causarono una notevole convergenza delle pareti, furono risanati grazie ad un ampliamento e ad una modifica della sagoma nella forma circolare ed alla posa di centine metalliche.

Gli Gneiss granitici della Fibbia ed il Granito di Rotondo si mostrarono nel complesso terreni fermi e competenti eccetto che per qualche zona intensamente fratturata. Autoclasi di scaglie ("Bergschlag") si riscontrarono nelle rocce massicce.

Gli Gneiss di Sorescia, in casi isolati caratterizzati da zone di dislocazione, dovettero essere affrontati con lo scavo in più fasi.

La Serie della Tremola (che include anche la parte settentrionale della Serie di Prato) mostrò numerose zone cachiritiche e miloniti, cosicché fu necessario frazionare lo scavo per attraversarne una parte. Ulteriori difficoltà furono dovute alla sfaldatura del fronte di scavo nelle zone più scistose e ad una importante irruzione d'acqua.

Il breve tratto nelle rocce triassiche del portale Sud fu rivestito nel cunicolo di sicurezza con delle lamiere die Bernold, mentre nella galleria principale si procedette allo scavo di una trincea di approccio ed al fissaggio dei pendii laterali con un reticolo di pali-radice.

Altre costruzioni; proprietà meccaniche delle rocce

I pozzi verticali di Hospental e Guspisbach furono scavati nella maniera convenzionale dall'alto verso il basso. Le condizioni geotecniche furono così favorevoli che si poté ricoprire con calcestruzzo le pareti dei pozzi 10 – 20 m dopo il fronte di avanzamento. I lavori nel pozzo di Guspisbach furono occasionalmente resi difficili da forti infiltrazioni d'acqua.

I pozzi obliqui di Bätzberg e Motto di Dentro furono effettuati meccanicamente, e cioè con un cunicolo pilota di 3 m di diametro dal basso verso l'alto. In seguito si effettuò, ancora meccanicamente, l'ampliamento a 6.6 m di diametro, ma dall'alto verso il basso. Il pozzo di Bätzberg attraversa le rocce molto solide del Granito dell'Aar. La sfaldatura degli scisti della Serie della Tremola causò una considerevole convergenza delle pareti del pozzo Motto di Dentro. Inoltre gli scavi di avanzamento attraverso una zona di dislocazione lunga 30 m furono sospesi per molto tempo. Durante lo scavo della caverna di ventilazione ai piedi del pozzo Motto di Dentro fu incontrata una frattura da estensione riempita con diversi metri cubi di cristalli di calcite e, in minore quantità, di quarzo.

Numerose prove per accertare le proprietà meccaniche delle rocce furono effettuate per i due lotti, ed in particolar modo prove di taglio puro in laboratorio. Inoltre furono misurate la deformazione del cunicolo di sicurezza, il campo tensionale naturale, la convergenza, la pressione delle sorgenti, ecc...

Idrogeologia, temperature, radioattività

L'entità delle portate d'acqua per ogni serie rocciosa fu molto variabile. In particolare forti afflussi idrici furono riscontrati

sia nelle rocce sciolte del portale Nord che nella Serie della Tremola presso al portale Sud. Tra quest'ultimo punto ed il Tm S 930 si succedettero diverse grosse venute d'acqua. Il tratto nella Zona di Guspis si mostrò essenzialmente asciutto, tranne che al Tm S 4820 caratterizzato da una forte venuta d'acqua. L'avanzamento negli gneiss granitici del Gamsboden fu reso difficoltoso dalle forti venute d'acqua provenienti dalla maggior parte delle fratture. Il cunicolo di sicurezza ebbe un chiaro effetto drenante. I tratti al di sotto sia della Reuss che del confinante bacino di Andermatt non mostrarono alcun incremento nelle portate d'acqua. L'acqua, con alto contenuto in solfati, proveniente dalle rocce mesozoiche e permocarbonifere, è da considerarsi aggressiva sul calcestruzzo. Anche nel granito dell'Aar e nella Zona gneissica meridionale si riscontrò un elevato tenore in solfato.

L'andamento della *temperatura delle rocce* lungo la galleria rispecchia quello topografico e raggiunge il valore massimo di 32 gradi. Il gradiente geotermico, corretto con la morfologia esterna, è di 25.6 gradi/km nella parte Nord, 22.8 gradi/km in quella centrale e 28.5 gradi/km in quella meridionale.

La *radioattività delle rocce* fu misurata direttamente con lo scintillografo e con lo spettrografo per i campioni raccolti. I valori nelle rocce granitiche furono da tre a cinque volte superiori a quelli misurati nelle rocce metamorfiche di origine sedimentaria e nel Mesozoico, il che corrisponde ai valori già conosciuti per rocce comparabili. Il valore più alto fu misurato in corrispondenza di una zona di dislocazione portante acqua nel granito di Gamsboden disgregato.

La présente publication est un résumé des chapitres géologie, géotechnique, eau souterraine, température et radioactivité des roches, du rapport final. Ces chapitres, rédigés en allemand pour la partie nord du tunnel et en italien pour la partie sud, sont déposés: à l'Office Fédéral des Routes, aux Offices des Routes Nationales des cantons d'Uri et du Tessin, aux EPF de Zürich, au Centre de Documentation Géologique Suisse ainsi qu'à d'autres endroits où ils peuvent être consultés. Dix collections d'échantillons comportant au total 1600 pièces, sont déposées dans les Instituts de Géologie des Hautes Ecoles.

Géologie

Le tunnel routier traverse, du Nord au Sud, le massif de l'Aar, la zone d'Urseren et le massif du Gotthard. Le tracé du tunnel est incurvé vers l'Ouest, presque jusqu'à l'aplomb du col, afin d'éviter la très profonde cuvette d'Andermatt; ce tracé offre en outre grâce à une épaisseur de couverture réduite, des puits d'aération plus courts. Dans sa partie médiane le tunnel routier est éloigné de plus de deux kilomètres du tunnel ferroviaire et traverse de ce fait, sur une distance plus longue les orthogneiss dont les caractéristiques géotechniques sont particulièrement avantageuses. La zone de transition peu stable entre le Mésozoïque et le Permo-Carbonifère qui occasionna de grosses difficultés lors du percement du tunnel ferroviaire exigea également la mise en œuvre de méthodes spéciales de construction lors du percement du tunnel routier.

Du Nord au Sud, le tunnel routier traverse les formations rocheuses suivantes:

- Dans le massif de l'Aar:
Des roches meubles (anciens déblais de tunnel ferroviaire)
— le granite de l'Aar — la zone de gneiss méridionale du massif de l'Aar
- Dans le massif du Gotthard:
Le Mésozoïque de la zone d'Urseren — le Permo-Carbonifère — la zone septentrionale des paragneiss — les granitogneiss de Gamsboden — la zone de Guspis (paragneiss) — les granito-gneiss de Fibbia — le granite de Rotondo — les gneiss de Sorescia — (la série de Prato) — la série de la Tremola — le Trias de la zone du Nufenen.

Bien qu'aucun sondage de reconnaissance n'aie été effectué, les conditions géologiques rencontrées ont confirmé les pronostics. Seule, la zone de Guspis s'avéra plus épaisse que prévue, au niveau du tunnel.

Géotechnique

Le tunnel routier traverse principalement des roches compactes. Leur comportement géotechnique est principalement déterminé par la fracturation du massif rocheux et par l'orientation des discontinuités et assurées par rapport au tunnel. Des discontinuités post-métamorphiques, des lamprophyres schistifiés et des lentilles de quartz diminuent la stabilité de la roche. Les comportements variables de la roche, tant dans la galerie de sécurité que dans le tunnel principal conduisirent à des exigences variables pour la stabilisation des roches. Les conditions géotechniques suivantes furent rencontrées:

Lors du creusement *des déblais* du tunnel ferroviaire, des roches meubles sans cohésion furent rencontrées et un blindage du front d'attaque s'avéra localement nécessaire, particulièrement là où des venues d'eau importantes auraient pu compliquer les travaux, à la fonte des neiges.

Le *granite de l'Aar* se révéla très compact sur les 1200 premiers mètres du tunnel; le long des 1000 m suivants, des cheminées d'effondrement et des affaissements apparurent dans des zones de lamprophyres. Dans la galerie de sécurité, ces tronçons à lamprophyres furent stabilisés par un gunitage et des ancrages. Dans le tunnel principal, ces mêmes zones durent, suite à un accident, être consolidées par des cintres encastres. Suite à un autre accident survenu dans une zone de granite à altération hydrothermale (Tm N 2309) l'excavation à pleine section fut remplacée par une excavation par étapes pour toute la longueur restant à creuser dans le lot nord, soit: abatage et consolidation de la calotte suivi, dans un deuxième temps seulement, par le déblayage du stross.

Dans la zone de *gneiss méridionale du massif de l'Aar*, une schistosité alpine marquée, des roches peu compactes comme les schistes micacés et les nombreuses zones cataclasées diminuent la stabilité géotechnique. Grâce aux conditions rencontrées dans la galerie de sécurité, une extrapolation des profils a permis de prendre à temps les mesures adéquates de stabilisation du rocher dans le tunnel principal.

La limite tectonique entre le massif de l'Aar et la zone d'Urseren consiste en une zone faillée et cataclasée qui recoupe le tunnel sous un angle de 45°. Dans les calcaires plaquetés, attendant au sud de cette zone, une consolidation du rocher par du béton projeté et armé s'avéra en général suffisante. Le tronçon suivant dénommé "Tronçon mésozoïque", à schistes argileux plastiques (Jurassique), gypses et dolomite (Trias) et le passage au Permo-Carbonifère fut réalisé grâce au système d'excavation allemand. Conformément aux prévisions et aux observations faites lors du percement du tunnel ferroviaire, des

zones de pression furent rencontrées dans le tunnel routier où la stabilité du rocher s'avéra très basse. Dans la galerie de sécurité et après la formation d'une cheminée d'effondrement dans les schistes argileux (Tm N 4148) l'excavation se poursuivait avec un blindage du front d'attaque, localement à travers des zones où des pressions se manifestèrent. Jusqu'au Tm N 4421, plusieurs secteurs durent être percés grâce au système Marcia-vanti et avec un blindage du front d'attaque. Entre Tm N 4205 et 4235 on procéda à des injections qui n'eurent pas l'effet escompté. Dans le Mésozoïque calcaire et perméable, les difficultés furent rencontrées à l'avancement, dans les segments en pression et peu perméables du Permo-Carbonifère, les déformations survinrent au contraire après le percement.

Le percement du tronçon mésozoïque fut entrepris simultanément, en direction du Sud, à partir de Tm N 3990 grâce à une galerie de sondage et à partir du puits d'Hospental, par une attaque du rocher en direction du Nord. En premier lieu, et selon le système d'excavation allemand, des galeries latérales (cu-lées) furent creusées et élargies vers le bas; l'abattage de la calotte fut réalisé dans un deuxième temps et le noyau central abattu en dernier lieu.

Dans le *Permo-Carbonifère* adjacent, la stabilité des roches se révéla beaucoup meilleure mais des lentilles de quartz, des intercalations de schistes et phyllites et des zones de failles créèrent quelques difficultés. La *zone septentrionale des paragneiss* du massif du Gotthard se révéla stable à l'exception de quelques petits éboulements le long de cassures parallèles à la schistosité.

Le *granito-gneiss de Gamsboden*, série de roches compactes, se révéla localement très fracturé et, particulièrement dans sa partie sud, riche en venues d'eau importantes. Grâce à une installation de chantier très adéquate du los sud, à un sliding floor et à une plate-forme de travail mobile (avec plafond de protection) ces roches purent être traversées sans problème majeur par une excavation à pleine section.

La *zone de Guspis* (décrite comme zone de paragneiss sur le chantier sud) s'avéra d'un percement très difficile. Une galerie de reconnaissance fut construite (dès le Tm S 4800) suite à la découverte, dans la galerie de sécurité, de *zones de pressions* et une attaque simultanée de ce tronçon, depuis le Nord et depuis le Sud fut décidée. De manière identique à ce qui avait été réalisé sur le chantier nord, le système d'excavation allemand fut choisi. Des déformations considérables se sont manifestées dans les parements. A cause de cela les parements ont été retenus par des ancrages précontraints avant l'excavation du noyau. Malgré ces précautions des déformations dépassant 0,5 m se sont manifestées. Ainsi les parements ont été assainis-plustard segment par segment. Les parties sous fortes pression de la galerie latérale ont été aussi assainies après des déformations considérables. Elles ont été élargie à une section circulaire avec des cintres lourdes.

Les zones des *granito-gneiss de Fibbia* et du *granite de Roton-dose* révélèrent — à l'exception de secteurs très fracturés — stables et compactes, à faibles venues d'eau. Dans les parties massives quelques effondrements se produisirent.

Dans les *gneiss de Sorescia*, il fallut avoir recours à un front d'attaque réduit, dans les zones de discontinuités tectoniques. La *série de la Tremola* (avec dans sa partie nord la série de Prato) contient des zones cataclasées et des mylonites qui obligèrent ici également à percer certains segments avec un front d'attaque partiel. L'exfoliation locale du front de taille dans les zones schistifiées et quelques venues d'eau importantes créèrent également quelques difficultés.

Au portail sud on découvrit un court tronçon de *Trias* qui fut revêtu dans la galerie de sécurité, par des tôles Bernold. Dans le tunnel routier, une pré-tranchée fut excavée et ses flancs furent stabilisés grâce à des pieux forés.

Constructions spéciales, mécanique des roches

Les *puits verticaux d'Hospental et du Guspisbach* furent creusés de manière conventionnelle, de haut en bas, à l'explosif. La très bonne tenue de la roche permit de procéder au revêtement en béton après des excavations de 10 à 20 m. Dans le puits du Guspisbach, une forte venue d'eau compliqua momentanément les travaux.

Les *puits obliques de Bätzberg et de Motto di Dentro* furent creusés mécaniquement; une galerie pilote de 3 m de diamètre réalisée de bas en haut fut élargie à 6,6 m, de haut en bas, grâce à une machine à aléser. Le granite de l'Aar rencontré dans le puits de Bätzberg, s'avéra généralement très compact. Dans le puits de Motto di Dentro, une importante exfoliation des schistes de la Tremola provoqua une convergence accentuée. L'avancement fut ensuite longuement bloqué par une zone de faille de 30 m. Lors de l'excavation de la caverne d'aération on découvrit dans une fissure corrodée, des cristaux de calcite de plusieurs mètres-cubes et des quartz en aiguilles.

On procéda sur les deux chantiers, à des *essais de mécanique des roches*. Des essais de cisaillement direct en laboratoire, des mesures de la déformation de la galerie de sécurité, des mesures de l'état des contraintes naturelles, de la convergence, de la pression de gonflement furent effectués.

Eau souterraine, températures et radioactivité

Les *venues d'eau* des différentes séries de roches s'avèrent très variables. Les zones proches du portail nord dans les roches meubles et la série de la Tremola (los sud) étaient très aquifères. Entre le portail sud et le Tm S 930 et près du Tm S 4820 dans la zone par ailleurs sèche de Guspis, plusieurs grosses venues d'eau furent observées. Dans le granito-gneiss de Gamsboden, la plupart des fissures aquifères gênèrent l'avancement. La galerie de sécurité fonctionna dans cette zone comme un véritable drainage. Le creusement du tunnel sous le lit de la Reuss et sous la cuvette voisine d'Andermatt ne provoqua aucune augmentation des venues d'eau. Dans le Mésozoïque et dans le Permo-Carbonifère l'eau s'avéra très

sulfatée et donc agressive pour le béton. De telles teneurs élevées en sulfates apparurent également dans le granite de l'Aar et dans la zone méridionale des gneiss. La *température des roches* reflète la topographie et atteint au maximum 32° C. Le gradient thermique corrigé d'après la configuration du terrain atteint dans la partie nord 25,6°/km, dans la partie centrale 22,8°/km et dans la partie sud 28,5°/km.

La *radioactivité des roches* fut mesurée au scintillomètre et par spectrométrie. Elle se révéla trois à cinq fois supérieure, dans les roches granitiques, à celle des roches paramétamorphiques et du Mésozoïque, ce qui correspond aux valeurs connues des roches de ce type. Une valeur extrême de la radioactivité fut mesurée aux abords d'une fissure aquifère du granite altéré de Gamsboden.

The present publication is a summary of the comprehensive final reports on geology, geotechnics, groundwater, rock temperature and rock radioactivity. These reports are available in German for the northern section and in Italian for the southern section. They are deposited with the Swiss Federal Administration for Roads at the National Road Offices of Cantons Uri and Tessin, at the Swiss Federal Institute of Technology in Zurich, at the Swiss Office of Geological Documentation and at various other offices and may be consulted there. Ten collections of rock samples are deposited with different geological institutes and comprise about 1600 pieces.

Geology

The road tunnel crosses the Aare Massif, the Urseren Zone and the Gotthard Massif from north to south. The line of the tunnel shows an extended curvature to the west to avoid the deep depression in the rock surface below Andermatt and therefore follows approximately the depression of the Gotthard pass. As a result of this, the ventilation shafts are shorter due to reduced overburden. In the central section, the distance to the railway tunnel is more than 2 km. The road tunnel therefore crosses more of the geotechnically favourable igneous gneiss. When passing through the low support transition zone between the Mesozoic and the Permocarbon, special construction methods had to be used in the road tunnel; this zone had already caused enormous difficulties in the old railway tunnel.

From N to S, the road tunnel crosses the following series:

- Aare Massif: Soils (discharged from the railway tunnel) — Aare granite — southern gneisses of the Aare Massif
- Gotthard Massif: Mesozoic of the Urseren Zone — Permocarbon — northern zone of paragneiss — Gamsboden granitic gneiss — Guspis Zone (paragneiss) — Fibbia granitic gneiss — Rotondo granite — Sorescia gneiss — (Prato Series) — Tremola Series — Trias of the Nufenen Zone.

The prognoses correspond quite well with the conditions encountered. In spite of the fact that no drillings had been carried out from the surface, only the Guspis Zone was much thicker than expected at tunnel level.

Geotechnics

The road tunnel crossed predominantly solid rocks. Their geotechnical behaviour is governed to a large extent by the fracture system in the rock and the position of the fractures in relation to the tunnel excavation. In addition, postmetamorphic faults, schistous lamprophyres and quartz lenses had a negative influence on stability. The difference in rock behaviour in the small safety gallery and in the road tunnel called for different rock support requirements. The following geotechnical conditions were encountered:

Loose, non-cohesive material had to be crossed in the old *discharge* from the railway-tunnel. In some places, face support proved necessary, particularly under aggravated conditions caused by heavy water inflow from snow-melt.

The *Aare granite* was stable in the first 1200 m from the northern portal. There followed a lamprophyre zone of about 1000 m, leading to the formation of chimneys and rockfalls. In the safety gallery, the lamprophyre section could be crossed using gunite and rock bolts while, as a result of an accident, the lamprophyres in the road tunnel had to be supported by steel ribs for safety reasons. The original full face excavation method was changed to heading and bench after another accident in a zone of hydrothermally decomposed granite at Tm N 2309. This excavation method was adhered to for the remainder of the northern allotment.

In the *southern gneisses of the Aare Massif*, the occasionally strong alpine schistosity, low strength rocks such as mica-schists and small faults had a negative effect on the geotechnical conditions. Based on the conditions encountered in the safety gallery, sites of necessary enlargements of the profile and the corresponding support could be located.

The tectonic boundary between the Aare Massif and the Urseren Zone consists of a clayey fault which intersects the tunnel at an angle of 45°. Reinforced shotcrete provided adequate support in the slabby limestones south of the fault. The next section was excavated using the German tunnelling method and was named the "*Mesozoikums-Strecke*". It consisted of soft schists (Jura), gypsum and dolomite (Trias) and the Permocarbon transition. As in the corresponding "*Druckstrecke*" of the railway tunnel, the rock strength was, as expected, very low in some areas. In the safety gallery, face support proved necessary to allow continuation after a chimney collapse in the schists at Tm N 4148 and also for rock which is subjected to heavy pressure. Up to Tm 4421, there followed a sequence of sections which had to be excavated with Marciavanti or face support. Grouting was carried out between Tm N 4205

to 4235 but did not have the expected effect. Difficulties appeared during excavation work in the calcareous and water-bearing series of the Mesozoic and also in the clayey low-permeability series of the Permocarbon as a result of deformations mainly occurring after the heading work.

The "Mesozoikums-Strecke" in the road tunnel was started from north and south after excavation of an exploratory adit from Tm N 3990 and a counterheading from the Hospental ventilation shaft. In an initial stage using the German excavation method, two lateral galleries were driven into the future tunnel walls and enlarged downward. This was followed by excavation of the calotte and, finally, the remaining core was mined out.

The stability of the following *Permocarbon* was much better but quartz lenses, intercalations of schists and phyllites and clayey fault zones caused some difficulties. The *northern paragneiss zone* of the Gotthard Massif was, for the main part, stable, except for breakdowns along accidents parallel to the schistosity.

The *Gamsboden granitic gneiss* was mainly stable but was roughly jointed in some places and, particularly in the southern part, strongly waterbearing. With appropriate installation of a sliding floor and moveable working platform (also forming a protective roof) in the southern allotment, it was possible to excavate this rock with full-face heading.

The *Guspis Zone*, the next series to the south (called the "paragneiss zone" on site), was very difficult to excavate. In the safety gallery, locations subjected to heavy pressure were recognised. It was therefore decided to drive an exploratory gallery (from Tm S 4800) and, following the discovery of unfavourable conditions, to proceed with intermediate headings from north and south. The German excavation method was selected, as at the northern allotment. Considerable deformations were detected in the walls which were therefore restrained with strong cables even before the core was mined out. In spite of these precautions, deformations of more than 0.5 m occurred and the walls had to be restored later, segment by segment. The sections of the safety gallery subjected to heavy pressure were also restored (after considerable convergence) by enlargement to a circular section and support with heavy steel ribs.

The *Fibbia granitic gneiss* and the *Rotondo granite* further to the south were predominantly stable with reduced water-bearing characteristics, except for some places with roughly jointed rock.

Faults in the *Sorescia gneiss* called in some places for a change to excavation in stages. The *Tremola series* (including the northern part known as the Prato series) showed frequent small fault zones and mylonites and these rocks had to be excavated in stages. The exfoliation of the face in schistous rocks and strong water inflow caused additional problems.

At the southern portal, *Triassic rocks* were found. In the safety gallery, the excavation was lined with Bernold steel liners. The

road tunnel was excavated using the cut and cover method and the lateral walls were supported by bored piles.

Special constructions, rock mechanics

The *Hospental and Guspisbach vertical shafts* were excavated conventionally from the surface downwards. The rock stability proved so favourable that shaft lining followed only after 10 – 20 m of excavation. In the Guspisbach shaft, strong water inflow sometimes rendered excavation more difficult.

The *Bäzberg and Motto di Dentro inclined shafts* were mechanically driven. A pilot boring of diameter 3 m was driven from the tunnel upwards and a downwards-driving enlarging machine reamed the excavation to its final diameter of 6.6 m. The Aare granite in the Bözberg shaft was almost completely stable. In the Motto di Dentro shaft, the Tremola schists exfoliated strongly and showed considerable convergence. In addition, the heading work was blocked by a 30 m long fault zone. A tension joint was touched during excavation of the ventilation cavern at the bottom of the Motto di Dentro shaft and contained several cubic metres of calcite crystals and some needle quartz.

Extensive rock mechanics tests were carried out in both allotments, particularly direct shear tests in the laboratory, deformation measurements from the safety gallery, measurements of primary stresses, convergence measurements, swelling pressures etc.

Groundwater, Temperatures, Radioactivity

The *water-bearing capacity* varied considerably in the different rock series. Strong water inflows were recognised mainly in the portal areas, consisting of soils in the north and Tremola schists in the south. Strong water infiltration also occurred between the south portal and Tm S 930 as well as at Tm S 4820 in the Guspis zone which was, in general, mainly dry. In the Gamsboden granitic gneiss, almost all of the joints were strongly water-bearing, which hindered the heading work considerably. The safety gallery showed a distinct drainage effect. The crossing under the Reuss and the basin-like depression of Andermatt did not, as expected, lead to higher water inflow. In the Mesozoic and the Permocarbon, the groundwater had a higher sulphate content and was therefore aggressive to concrete. Higher sulphate contents also appeared in the Aare granite and the southern gneisses of the Aare Massif.

The *temperatures* in the rock followed the topography and reached 32°C. The temperature gradient corrected for the topography reached 25.6°/km in the north, 22.8°/km in the centre and 28.5°/km in the south.

The *radioactivity* in the rocks was measured by scintillometers and spectrometer probes. It was three to five times higher in the granitic rocks than in parametamorphic or Mesozoic rocks, and corresponds to reported values in similar rocks. A peak value was detected in a water-bearing fault with decomposed Gamsboden granitic gneiss.

1. EINLEITUNG

1.1 Übersicht über den geologischen Schlussbericht

Mit der geologischen Beratung während der Projektierung und dem Bau des Gotthard-Strassentunnels beauftragten die Kantone Uri und Tessin als Bauherren auf der Nordseite das Büro Dr. R.U. Winterhalter und Dr. T.R. Schneider, resp. ab 1.5.70 den letzteren als Rechtsnachfolger dieses Büros, auf der Südseite Herrn Prof. Dr. E. Dal Vesco. Nach dessen Tode im Jahre 1980 führte sein damaliger Assistent, Herr Dr. H. Wanner, die Arbeiten weiter.

Die Abgrenzung der geologischen Aufnahmen zwischen Süd- und Nordteil deckt sich nicht mit der vertraglichen Losgrenze. Ein Teil des Südloses wurde aus terminlichen Gründen von Norden her in Angriff genommen (sogenannte Baustelle Hospental des Loses Süd). Dieser Abschnitt unterstand jedoch der Bauleitung des Loses Nord in Göschenen, die geologischen Aufnahmen wurden dementsprechend dem Geologen des Nordloses zugeordnet. Im Tunnel erfolgte zudem der Durchschlag der Kalotte bei Tm 8182,4 ab Nordportal, während die Strosse vom Süden aus bis Tm 7736 ab Nordportal abgebaut wurde. Die Aufnahmegrenzen wurden zwischen den Geologen wie folgt abgesprochen:

- Sicherheitsstollen: Tm N 8009 = Durchschlagstelle
- Tunnel: Tm N 8283 = Beginn Zentrale Guspisbach

Die geologischen Aufnahmen wurden unter der Leitung der oben erwähnten Experten im Norden von den Herren Dres. Frapolli und Keller und im Süden im ersten halben Jahr von Herrn Dr. Simonetti, der ganze übrige Teil von Herrn Dr. Wanner durchgeführt.

Für die Ausarbeitung des geologischen Schlussberichtes wurde die Aufteilung in einen Nordteil und einen Südteil beibehalten.

Der Schlussbericht umfasst insgesamt sechs Teilberichte:

- I Zusammenfassung
- II Geologie
- III Geotechnik
- IV Bergwasser
- V Felstemperaturen
- VI Gesteinsradioaktivität

Die Teile II – IV verfassten die beauftragten Geologen getrennt in Deutsch für den Nordteil, resp. Italienisch für den Südteil. Die Teile V und VI wurden von den Herren W. Rellstab und Prof. Dr. L. Rybach vom Institut für Geophysik der

ETH Zürich, Forschungsgruppe Geothermik und Radiometrie, zusammengestellt, da dieses Institut die entsprechenden Untersuchungen durchführte und auswertete.

Die vorliegende *Zusammenfassung* wurde von den beauftragten Geologen gemeinsam je in einer gleichwertigen deutschen und italienischen Version abgefasst. Alle wichtigen, d.h. beide Lose betreffenden Anhänge wurden dementsprechend zweisprachig gestaltet. Gemäss dem Auftrag des technischen Ausschusses der Baukommission soll die Zusammenfassung für am Baugeschehen nicht direkt Beteiligte ebenfalls verständlich sein. Aus diesem Grunde werden einleitend die Vorgeschichte und das Bauwerk kurz geschildert. Ferner wird eine möglichst vollständige in sich geschlossene Berichterstattung angestrebt. Auf die Wiedergabe von Einzelheiten und die Beigabe der sehr umfangreichen Detailpläne und Datenlisten wird jedoch verzichtet. Diese sind in den entsprechenden Teilberichten II – VI enthalten, so insbesondere:

- Die detaillierten geologisch-geotechnischen Aufzeichnungen des Sicherheitsstollens und der Tunnelröhre im Massstab 1:200 im Teil II.
- Die petrographischen Detailbeschreibungen und Dünnschliffphotos im Teil II.
- Eine Zusammenstellung aller eigenen und fremden Berichte und Gutachten, die die Geologie und Geotechnik (inklusive felsmechanische Versuche) betreffen, in den Teilen II und III.
- Die Resultate aller durchgeführten Laborversuche und Analysen
 - Tonmineralogische Untersuchungen: Teil II
 - Festigkeitsbestimmungen: Teil III
 - Bergwasseranalysen: Teil IV.
- Die Tabellen mit den Resultaten sämtlicher Felstemperaturmessungen: Teil V, resp. aller Radioaktivitätsmessungen: Teil VI.

Die massgebenden Daten sind jedoch in Form von zusammenfassenden Darstellungen in den Anhängen 3 – 9 des vorliegenden Berichtes enthalten.

Für Detailangaben und -fragen sei demnach auf die Teile II – VI des vollständigen Schlussberichtes verwiesen, der in sehr beschränkter Zahl an folgende Stellen ausgeliefert wurde:

- Bundesamt für Strassenbau
- Kantonales Bauamt Uri
- Ufficio strade nazionali Ticino
- Schweizerische Geologische Dokumentationsstelle, Bern
- ETH, Zürich

1.2 Geologische Aufnahme, Handstücksammlung

Die Geologie des Sicherheitsstollens und des Tunnels wurde im Massstab 1:200 detailliert aufgenommen und aufgezeichnet. Die Aufzeichnungen enthalten, neben bautechnischen Orientierungshilfen, Angaben über die Petrographie, die Trennflächenverhältnisse, das Bergwasser und die Felstemperaturen. Während die Aufzeichnungen des Sicherheitsstollens auf diese rein geologischen Daten beschränkt sind, wurden in die geologisch-geotechnischen Aufzeichnungen des Tunnels auf Wunsch der Bauleitungen auch felsmechanische Daten wie Reibungswinkel und Druckfestigkeiten entsprechend der SIA-Empfehlung Nr. 199 eingetragen.

Der Vortrieb des Sicherheitsstollens eilte schon bald nach Baubeginn jenem des Tunnels weit voraus. Er erfüllte daher in einem gewissen Sinne die Funktion eines Sondierstollens. Aus diesem Grunde wünschten die Bauorgane möglichst rasch Informationen über die angetroffenen Verhältnisse und damit über die beim Tunnelvortrieb zu erwartenden Probleme, so insbesondere die zu erwartenden Trennflächen und Störungen, den Wasseranfall und die generelle Standfestigkeit. Der Sicherheitsstollen wurde entsprechend detailliert aufgenommen und die Aufzeichnungen laufend in einer ersten provisorischen Fassung dem Bauherrn zugestellt.

Aufgrund des Pflichtenheftes der Tunnelgeologen hatten diese eine systematische Handstücksammlung anzulegen. Dabei sollte im Prinzip alle 10 m ein Handstück geschlagen werden. Diese vollständige Belegsammlung wurde wie folgt deponiert:

- Nordseite: Kantonaes Bauamt Uri, Werkhof Göschenen
- Südseite: ETH Zürich, Geologisches Institut

Daneben wurden insgesamt 10 Museen und Universitätsinstitute nach folgendem Schema mit Handstücken aus dem Sicherheitsstollen beliefert:

<i>Empfänger</i>	<i>Entnahmestellen</i>
Inst. für Krist. + Petr., ETH Zürich	100, 200, 300 etc. m
Min. Petr. Inst. Universität Basel	110, 210, 310 etc. m
Naturhistorisches Museum, Bern	120, 220, 320 etc. m
Inst. de Min. Université Lausanne	130, 230, 330 etc. m
Inst. für Min. + Petr. Univ. Frib.	140, 240, 340 etc. m
Musée d'Hist. nat., Genève	150, 250, 350 etc. m
Naturhistorisches Museum, Basel	160, 260, 360 etc. m
Min. Inst. Universität Bern	170, 270, 370 etc. m
Museo cant. di Scienze nat., Lugano	180, 280, 380 etc. m
Gletschergarten Luzern	190, 290, 390 etc. m

Zusätzlich erhielt jeder Empfänger der allgemeinen Sammlung Proben spezieller Vorkommen (z.B. Lamprophyre, Gips der Trias usw.).

1.3 Wissenschaftliche Untersuchungen

Beim damaligen Eidgenössischen Amt für Strassen- und Flussbau (heute Bundesamt für Strassenbau (ASB)) meldeten mehrere Hochschulinstitute ihr Interesse an wissenschaftlichen Untersuchungen an. Von den zahlreichen vorgeschlage-

nen Projekten gelangten die folgenden effektiv zur Ausführung:

Radioaktivitätsmessungen

Die Untersuchungen an Gesteinen im Tunnel und an Gesteinsproben im Labor erfolgten durch Herrn Prof. Dr. L. Rybach und seine Mitarbeiter. Die Resultate dieser Untersuchungen sind im Teil VI des Schlussberichtes zusammengestellt. Sie wurden zudem von LABHART (1976) und LABHART & RYBACH (1980)* publiziert.

Felstemperaturen

Die Felstemperaturen mass die örtliche Bauleitung unter Anleitung von Herrn Dr. Berset. Die Resultate der Temperaturmessungen sind im Teil V des Schlussberichtes enthalten.

Kluftmineralien

Die *mineralführenden Klüfte* wurden auf der Nordseite von Herrn L. Lussmann, Mineralienaufseher des Kantons Uri, aufgenommen und ausgebeutet. Herr Prof. Dr. Stalder, Naturhistorisches Museum, Bern, stand ihm als wissenschaftlicher Berater zur Verfügung. Auf der Südseite wurde Herr Dr. Simonetti zum Mineralienaufseher ernannt.

Über die Mineralfunde im Gotthard-Strassentunnel sind Publikationen von LUSSMANN (1980), STALDER (1980) und STALDER & SCHENKER (1980) erschienen.

Feldspatuntersuchungen

Da im Strassentunnel die Möglichkeit bestand, in einem durchgehenden Profil frisches unverwittertes Gesteinsmaterial zu sammeln, waren mehrere Wissenschaftler deutscher Universitäten an entsprechendem Probenmaterial interessiert. Folgende Publikationen sind aus diesen Feldspatuntersuchungen hervorgegangen: BAMBAUER & BERNOTAT (1982), BERNOTAT & BAMBAUER (1980, 1982) HAFNER & LOIDA (1980), LOIDA (1979), VOLL (1976).

1.4 Danksagung

Die Autoren möchten sich an dieser Stelle bei den zuständigen Behördenvertretern den HH Dir. K. Suter und Sektionschef F. Ruckstuhl vom Bundesamt für Strassenbau, Kantonsingenieur P. Püntener und H. Bargähr, Kantonaes Bauamt Uri, R. Colombi, G. Nolli, E. Censi, Ufficio strade nazionali Ticino, für die Bewilligung der Publikationen und deren Finanzierung bestens bedanken.

* Literaturverzeichnis siehe Anhang 1

2. ÜBERSICHT ÜBER DIE GEOLOGIE UND DAS BAUWERK

2.1 Allgemeine Geologische Übersicht

Zum besseren Verständnis der geologischen Einzelheiten im Tunnel sollen vorerst die allgemeinen regionalen Verhältnisse kurz erläutert werden. Für ein intensiveres Studium der regionalen Geologie des Aar- und Gotthard-Massivs sei in erster Linie auf den geologischen Führer von LABHART (1977) verwiesen.

2.1.1 Geologische Vorgeschichte

Der Strassentunnel quert von Norden nach Süden drei grosse tektonische Einheiten (Figur 1, Seite 4)

- Aar-Massiv
- Urseren-Zone
- Gotthard-Massiv.

Die beiden Massive werden aus Gesteinen aufgebaut, die bereits nach der herzynischen, im Oberkarbon abgeschlossenen, Gebirgsbildung kristallin waren. Dieses Kristallin lässt sich grob unterteilen in ein herzynisch metamorphes Altkristallin und spätherzynische granitische Gesteine. Letztere, wie z.B. der Aare-Granit oder der Rotondo-Granit, lagen nach Abschluss der herzynischen Gebirgsbildung als massige Gesteine vor. Ihr Isotopenalter beträgt 260 bis 300 Millionen Jahre. Im Altkristallin ergaben Altersbestimmungen, dass in die herzynische Gebirgsbildung auch Gesteine einbezogen wurden, die bereits vor rund 400 Millionen Jahren die kaledonische Orogenese durchlaufen hatten. Die akzessorisch vorkommenden Zirkone sind z.T. sogar noch wesentlich älter (GRÜNDENFELDER et al. 1964).

In der auf die herzynische Gebirgsbildung folgenden Zeit, d. h. im *Permokarbon*, wurde das Gebirge teilweise wieder abgetragen und die Abtragungsprodukte in nahe gelegenen Becken sedimentiert. Da das der Erosion unterworfenen Rückland hauptsächlich aus Gneisen und Graniten bestand, setzten sich die permokarbonischen Sedimente petrographisch sehr ähnlich zusammen wie das Muttergestein. Sie enthielten demnach vor allem detritischen Quarz und Feldspat sowie einen wechselnden Tonanteil.

Im *Perm* setzte zudem eine vulkanische Tätigkeit ein, deren Produkte aus basischen und sauren Ergussgesteinen, Porphyren und Tuffen bestanden.

Die Periode des Permokarbons wurde mit einer leichten Verfaltung und erneuter Erosion abgeschlossen. Das Gebiet der heutigen Alpen war gegen das Ende des Perm Festland, dessen Oberfläche der Verwitterung ausgesetzt war. Es ent-

stand die sogenannte permische Verwitterungsschicht der damals exponierten Kristallinserien.

In der *Trias* begann diskordant über den älteren Einheiten ein neuer Sedimentationszyklus. Im Gebiet der Massive entstanden über einem in der Regel vorhandenen Basisquarzit vor allem Gips, Rauhwacke, Dolomite und gegen oben quarzitische Schiefer. Es sind dies vorwiegend Sedimente, die in untiefen, marinen, z.T. geschlossenen Becken unter warmen Klimabedingungen abgelagert wurden.

Im *Jura* setzte sich die Sedimentation mit Unterbrüchen fort. In marinem Milieu bildeten sich kalkige und tonige Schichten.

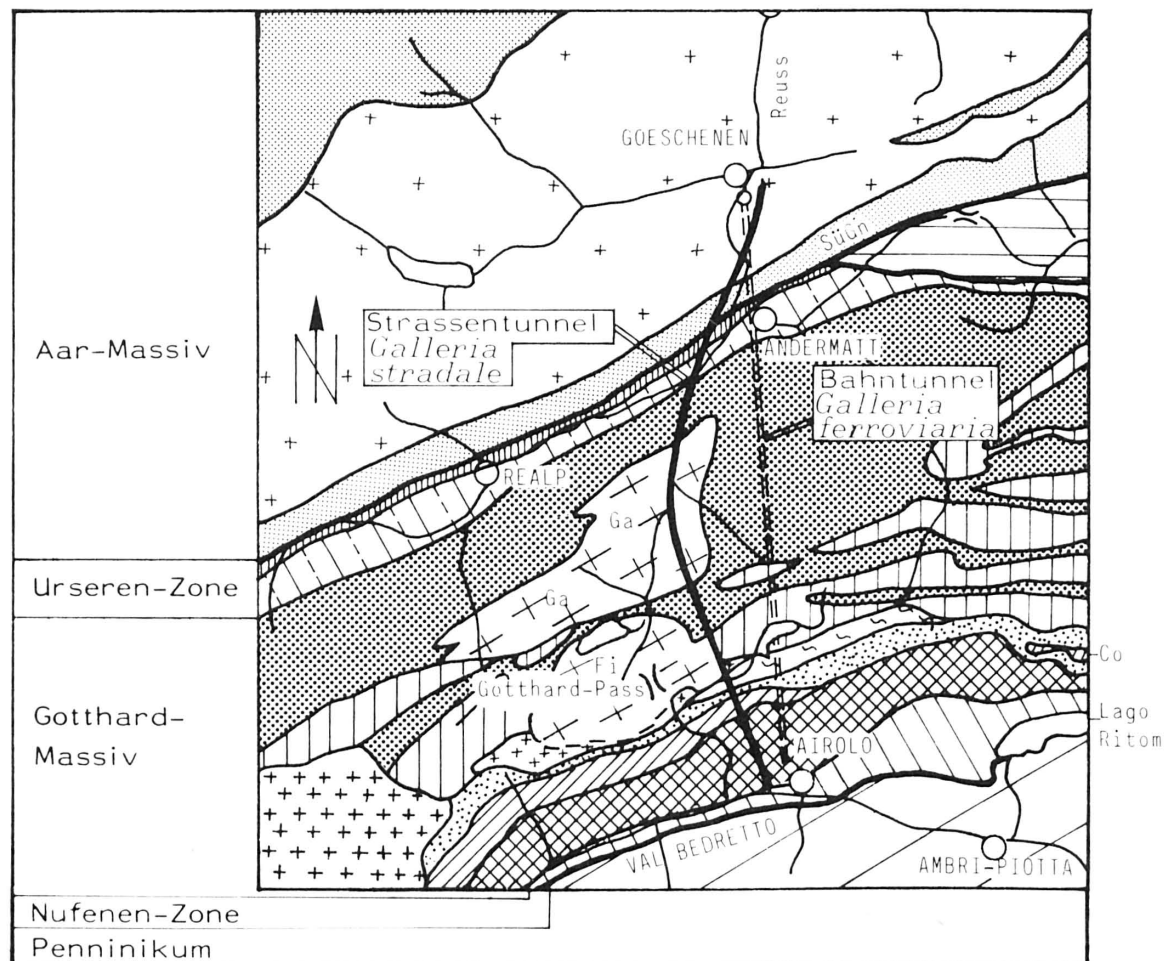
Im *Tertiär* wurden im Laufe der alpinen Gebirgsbildung die Massive und die sie überlagernden Sedimente zusammengeschoben. Die sedimentäre Urseren-Zone wurde steilgestellt und zwischen Aar- und Gotthard-Massiv eingeklemmt, so dass die heutige Abfolge der tektonischen Einheiten entstand (siehe Figur 1). Die verschiedenen Gesteinsserien wurden je nach ihren mechanischen Eigenschaften in unterschiedlichem Ausmass verschiefert und teilweise verfaltet. Gleichzeitig wurde das Gebirge erwärmt was zur *alpinen Metamorphose* führte. Ein Teil des Korngefüges rekristallisierte. Teilweise entstanden auch Mineralneubildungen. Die alpine Metamorphose überdauerte die Bewegungsphase (syn- bis postkinematische Metamorphose). Aus diesem Grunde zeigen die Mineralneubildungen normalerweise keine Spuren von mechanischen Beanspruchungen.

Der Herd der alpinen Metamorphose befand sich im südlichen Sopraceneri (Meso- und Katametamorphose). Im Gebiet des Strassentunnels war die Metamorphose nur noch schwach (Epimetamorphose). Sie reichte im Aar-Massiv und im nördlichen Teil des Gotthard-Massivs jedoch zur Neubildung von Mineralien, die die dekorativen Gesteine der Tremolaserie bekannt machten: Granat, Staurolith, Disthen, Aktinolith.

Die vom Gotthard-Strassentunnel durchfahrenen Gesteine unterscheiden sich somit durch die unterschiedliche Zahl durchlaufener Metamorphosen. Die Sedimente der Urseren-Zone wurden nur der alpinen Metamorphose unterworfen, d. h. sie sind monometamorph und enthalten demnach höchstens detritische Relikte. Die Gneise und Granite der Massive lagen dagegen bereits vor der alpinen Metamorphose als Kristallin vor. Sie enthalten neben den Mineralneubildungen noch herzynisch entstandene Mineralkörner. Diese Relikte überwiegen bei den granitischen Gesteinen sogar bei weitem. Neubildungen entstanden vor allem in Gesteinen resp. Gesteinszonen, die tektonisch beansprucht, d. h. durchbewegt und verschiefert wurden. Das Altkristallin ist somit polymeta-

morph. Die spätherzynischen Granite der Massive sind dagegen erst nach der herzynischen Metamorphose in einer Spätphase der herzynischen Gebirgsbildung eingedrungen, d.h. sie sind wie die postherzynischen Sedimente nur alpin überprägt und somit monometamorph.




Nach der alpinen Metamorphose bestand das Gebirge zwischen Göschenen und Airolo im wesentlichen aus einer Serie von monometamorphen und polymetamorphen kristallinen Gesteinen, in die der schmale steilstehende nur schwach metamorphe Sedimentzug der Urseren-Zone eingeschaltet ist.






Altkristallin

-  Aar-Massiv (SüGn = Südliche Gneiszone)
-  Tavetscher Zwischenmassiv
-  Paragneise des Gotthard-Massivs
-  Orthogneise s.l. (Streifengneise)
-  Giubine-Serie
-  Sorescia-Gneis
-  Prato-Serie (Co = Corandoni-Zone)
-  Tremola-Serie

Herzynische-Granite

-  Aare-Granit
-  Rotondo-Granit (Monte Prosa-Granit)
-  Gamsboden Granitgneis (Ga)
Fibbia-Granitgneis (Fi)

Postherzynische Sedimente

-  Mesozoikum der Urseren-Zone
-  Permokarbon der Urseren-Zone
-  Mesozoikum der Nufenen-Zone

Penninikum

-  Bündnerschiefer + Kristallin

Fig. 1: Geologisch-tektonische Übersichtsskizze (nach T.P. LABHART 1977), 1:200'000

Abgeschlossen wurde die Gebirgsbildung durch späte Hebungen und Verstellungen. Auf diese geotechnisch wichtigen Erscheinungen wird im Kapitel 3.5.2, Seite 25, über die Störungen speziell eingegangen.

2.1.2 Der glaziale Kolk von Andermatt

Im Urserental dehnt sich zwischen Altkirch im Osten und der Gegend von Tennlen-Reussenbiel im Westen eine Alluvialebene aus. Diese wird gegen Norden durch die Felsschwelle beim Urnerloch abgeschlossen. Früher wurde aufgrund der erwähnten Felsschwelle angenommen, dass die Felsoberfläche untief unter den Alluvionen des Talbodens durchziehe. Erst anlässlich der Studien für das Urseren-Kraftwerk (Grossakkumulierwerk Andermatt) in den 40er Jahren wurde der Verlauf der Felsoberfläche genauer abgeklärt.

Zuerst wurden seismische Untersuchungen durchgeführt. Sie ergaben einen unerwartet tiefen Kolk, der bis in die Nähe des Bahntunnels reicht. Aufgrund der seismischen Resultate wurde im Jahre 1943 die Felsoberfläche von einer Seitennische bei km 2,8 des Bahntunnels mit vier Sondierbohrungen abgetastet. Die eine fuhr das Lockergestein nur 30 m (!) oberhalb des Tunnelfirstes an (Schwellenhöhe 1121,7 m ü.M.).

Die damaligen Abklärungen zeigten, dass das glaziale Becken seine grösste, mehr als 300 m betragende Tiefe, in unmittelbarer Nähe des Bahntunnels erreicht. Gegen Westen steigt die Felsoberfläche an. Bei Tennlen östlich von Hospental tritt der Fels erstmals wieder an die Oberfläche.

2.2 Geologische und geotechnische Vorkenntnisse

Der Gotthard-Strassentunnel quert einen Abschnitt der Zentralalpen, der bereits im letzten Jahrhundert grosses geologisches Interesse fand. Mit ein Grund für die früheren Untersuchungen war der Bau des zwischen 1872 und 1880 ausgebrochenen Gotthard-Bahntunnels. Der Firststollen dieses nach der belgischen Methode aufgefahrenen Bauwerkes wurde vom damaligen Tunnelgeologen Dr. F.M. Stapff sehr detailliert im Massstab 1 : 200 aufgenommen und als Beilage zu den offiziellen gedruckten Berichten des Schweizerischen Bundesrates über den Gang der Arbeiten am St. Gotthard (STAPFF 1882) publiziert. Diese Monatsberichte enthalten zahlreiche Bemerkungen über Geologie, Wasserführung und Felstemperaturen sowie geotechnische Angaben wie z.B. Einbauten beim Vortrieb des Firststollens. Am meisten Publizität erreichte die sogenannte "nördliche Druckstrecke" in der Übergangszone vom Mesozoikum ins Permokarbon, in der eine zweimalige Rekonstruktion der Tunnelauskleidung notwendig wurde (BRIDEL ?, DOLEZALEK 1882).

Spätere, im wesentlichen wissenschaftlich orientierte Arbeiten, befassen sich mit der Petrographie einzelner Gebiete. Im Bereich des Strassentunnels sind zu erwähnen: AMBÜHL (1929), FEHR (1922, 1926), HUBER (1948), LIECHTI (1933) sowie NIGGLI & STAUB (1914).

Neue geologisch-geotechnische Erkenntnisse brachten die Untersuchungen des Studiensyndikates Urseren-Kraftwerke sowie zahlreiche Kraftwerkstollen (KW Wassen, KW Göschenen, KW Lucendro, KW Ritom). Alle diese Unterlagen wurden von der "Studiengruppe für eine wintersichere Verbindung durch den Gotthard" zusammengestellt, ausgewertet und der resultierende Schlussbericht 1963 durch das Eidgenössische Departement des Innern publiziert.

Erst nach Abschluss der Vorarbeiten sind drei Arbeiten erschienen, die sich mit der Petrographie des Gotthard-Massivs befassen: HAFNER (1958), HOFMÄNNER (1964) und STEIGER (1962). Sogar erst nach Baubeginn wurde das Blatt 1251 "Val Bedretto", 1 : 25'000, des geologischen Atlas der Schweiz (1975) der Schweizerischen Geologischen Kommission herausgegeben. Diese Arbeiten wurden jedoch bei der Abfassung des vorliegenden Schlussberichtes, insbesondere beim Entwurf der Beilagen, berücksichtigt.

2.3 Projekt und Linienführung

Nachdem der grundsätzliche Entscheid bezüglich einer wintersicheren Verbindung durch den Gotthard zu Gunsten eines Strassentunnels Göschenen-Airolo gefallen war, genehmigte der Bundesrat das generelle Projekt mit zwei Varianten:

- Variante mit 2 Schächten und einem Seitenstollen als Lüftungsstollen
- Variante mit 4 Schächten ohne seitlichen Stollen.

Beide Varianten wurden ausgeschrieben. Gewählt wurde schliesslich die Variante mit 4 Schächten. Bereits während der Submission wurde jedoch von den Promotoren der Variante mit 2 Schächten der in ihrem Projekt enthaltene ebenfalls der Lüftung dienende Seitenstollen mit dem Argument der zusätzlichen Sicherheit (unabhängiger Zugang, Fluchtstollen) in die Waagschale geworfen. Der Bundesrat beschloss aufgrund dieser Diskussion der Variante mit 4 Schächten den Bau eines Sicherheitsstollens hinzuzufügen. Dieser verläuft in der seinerzeit angenommenen Achse einer künftigen zweiten Tunnelröhre. Parallel zum Tunnel mit einem Querschnitt von 69–96 m² ist daher mit einem Achsabstand von 30 m der Sicherheitsstollen mit 7–10 m² Querschnitt angeordnet.

RUCKLI (1970) und DIETHELM et al. (1980) haben das definitive Tunnelprojekt beschrieben.

Die Linienführung des gewählten Projektes entspricht ziemlich genau der seinerzeit von der "Studiengruppe Gotthardtunnel" vorgeschlagenen Variante 3: Strassentunnel Göschenen – Airolo. Mit dem Ausbiegen gegen Westen folgt der Strassentunnel angenähert der Talfurche des Gotthardpasses. Damit konnten die Lüftungsschächte kurz gehalten werden. Die Zahl von 4 Schächten ergab sich aus einer Lüftungsoptimierung. Im Raume Hospental knickt der Tunnel jedoch deutlich stärker gegen Westen aus, als dies allein aufgrund der Lüftungsschächte erforderlich wäre. Die Linienführung wurde hier so gewählt, dass der Tunnel den tiefen lockergesteinsgefüllten Kolk von Andermatt mit

Sicherheit mit einer genügenden Felsüberdeckung westlich umfährt.

Die Trassierung im mittleren Tunnelabschnitt führte in geologisch-petrographischer Hinsicht zum einzigen erheblichen Unterschied zum Bahntunnel. In letzterem hatte der ständige Wechsel von glimmerreichen Paragneisen mit hellen feldspatreichen granitischen Gneisen zu gewissen Vortriebschwierigkeiten geführt. Im Strassentunnel konnte dagegen aufgrund der Oberflächengeologie damit gerechnet werden, dass auf eine Länge von mehreren Kilometern einheitliche bautechnisch relativ günstige Granitgneise zu durchfahren sind.

Mit dem Strassentunnel waren im Übergang vom Mesozoikum ins Permokarbon die gleichen Schichten zu durchörtern, in denen der Bahntunnelbau auf grosse Schwierigkeiten stiess. In dieser Zone musste streckenweise mit einem Ausbruch in der schwierigsten, zeitraubenden Ausbruchsklasse (VI) gerechnet werden. Eine weitere schwierige und zeitraubende Strecke war beim Nordportal mit kohäsionslosen Lockergesteinen zu erwarten. Auf der Südseite wurden die Lockergesteine und die bautechnisch schwierige Trias vorgängig mit einem offenen Voreinschnitt bewältigt. Aus diesen Gründen wurde bei der Ausschreibung der Anteil des Loses Nord an der gesamten Tunnelänge mit 6,806 km um 2,709 kürzer gewählt als derjenige des Loses Süd mit 9,515 km.

2.4 Geologische Vorstudien und Sondierungen

2.4.1 Geologische Sondierungen vor dem Bau

Die regionale Geologie und der grundsätzliche Gebirgsaufbau sowie das generelle geotechnische Verhalten der zu erwartenden Gesteine war aufgrund der oben erwähnten Arbeiten, speziell jener der "Studiengruppe für eine wintersichere Verbindung durch den Gotthard" für das geplante Bauvorhaben hinreichend bekannt. Günstig im Hinblick auf die voraussichtliche Genauigkeit der geologischen Prognose wirkte sich zudem der subvertikale Verlauf der Hauptgesteinsgrenzen aus. Insbesondere gilt dies für die geotechnisch schwierige Urseren-Zone. Die Untersuchungen und Vorstudien für den Strassentunnel konnten aus diesen Gründen auf *Sondierbohrungen* zur Erkundung der Felsoberfläche unter den Lockergesteinen im Bereich der beiden Portale beschränkt werden.

2.4.2 Geologische Sondierungen während dem Bau

Dem Sicherheitsstollen kam faktisch die Rolle eines *Sondierstollens* zu. Er ermöglichte eine Präzisierung der Prognose bezüglich der allgemeinen geologischen und geotechnischen Verhältnisse für den nachfolgenden Tunnelausbruch. Ferner erlaubte er, je nach Bedarf, geotechnische und felsmechanische in situ-Versuche durchzuführen und Proben für Laboruntersuchungen zu entnehmen; so z.B. im Bereich der Kreuzung mit dem Bahntunnel oder im Abschnitt der Urseren-Zone zwischen Tm N 4000–5085, der geotechnisch schwierigen sogenannten "Mesozoikums-Strecke".

Der weit vorausseilende *Sicherheitsstollenvortrieb* bot zudem die Möglichkeit den Bereich des Tunnels mittels Zwischenangriffen direkt aufzuschliessen. Dies geschah auf der Nordseite im Bereich des Mesozoikums und auf der Südseite beim Zwischenangriff Guspis-Zone.

Als auf der Nordseite der Vortrieb des Sicherheitsstollens im Mesozoikum stecken blieb, wurde vom Schacht Hospental aus ein *Sondierstollen* in dessen Achse gegen Norden vorgetrieben, um Aufschluss über die geologisch-geotechnischen Verhältnisse südlich des Mesozoikums zu erhalten.

Ebenfalls in die Bauzeit fielen die fünf bis 27,5 m tiefen *Sondierbohrungen* im Bereich des Schachtkopfes *Bäzberg*. Sie wurden nach dem Vorliegen des definitiven Projektes zur Ermittlung der genauen Lage der Felsoberfläche abgeteuft.

2.5 Tunnelmetrierung

Die Baumetrierung geht für die Nordseite von folgenden Koordinatenpunkten aus:

Nordportal Tunnelröhre	688°243.687/169°049.576
Nordportal Sicherheitsstollen	688°263.221/169°054.082

Die definitive Kilometrierung (Hektometrierung im Tunnel), wie sie vom Unterhaltsdienst benutzt wird, beginnt beim Portal des Vortunnels 552 m nördlich des ursprünglichen Bauportals.

Auf der Südseite sind die Nullpunkte der Baumetrierung in Abweichung vom ursprünglichen Projekt wie folgt festgelegt worden:

Südportal Tunnelröhre	689°074.628/153°651.139 (16'271 m ab Nordportal)
Südportal Sicherheitsstollen	689°036.312/153°647.520 (16'271 m ab Nordportal)

Zu beachten ist, dass das Südportal des Tunnels aufgrund des Voreinschnittes 31 m weiter nördlich liegt als das Portal des Sicherheitsstollens. Dieser Betrag entspricht gerade der Verlängerung der Tunnelachse gegenüber der Achse des Sicherheitsstollens, der stets auf der Innenseite der grossräumigen Krümmung des Tunnels liegt und somit kürzer ist.

In der vorliegenden Zusammenfassung wird, wie im gesamten geologischen Schlussbericht, ausschliesslich die allen geologischen Aufnahmen, Messungen und Belegsammlungen zu Grunde liegende *Baumetrierung* verwendet.

Die Beschreibung der geologischen und geotechnischen Verhältnisse im Gotthard-Strassentunnel erfolgt (analog zur N2-Kilometrierung) fortlaufend von Norden nach Süden. Um die Baumetrierungen besser auseinanderhalten zu können wurden sie wie folgt gekennzeichnet:

Tm N 100	= 100 m ab Nordportal
Tm S 100	= 100 m ab Südportal

3. GEOLOGISCHE VERHÄLTNISSE IM TUNNEL

3.1 Übersicht

Wie in der allgemeinen geologischen Übersicht (Abschnitt 2.1, Seite 3) gezeigt wurde, lagen nach Abschluss der alpinen Gebirgsbildung aufgrund ihrer unterschiedlichen Vorgeschichte 3 Hauptgruppen von Gesteinen vor (Lage im Tunnel siehe Befundprofil, Anhang 3).

Polymetamorphes Altkristallin der Massive. Die zu dieser Gruppe gehörenden Gesteinsserien sind z.T. heterogen aufgebaut. Zu ihr gehören

- südliche Gneiszone des Aar-Massivs
- nördliche Paragneiszone des Gotthard-Massivs
- Guspis-Zone
- Sorescia-Gneis
- Prato-Serie
- Tremola-Serie

Herzynische Granite, die im Zuge der alpinen Gebirgsbildung mehr oder weniger stark deformiert wurden:

- Aare-Granit
- Gamsboden-Granitgneis
- Fibbia-Granitgneis
- Rotondo-Granit

Postherzynische Sedimente, die alpin eine schwache Metamorphose erlitten:

- Mesozoikum der Urseren-Zone
- Permokarbon der Urseren-Zone
- Mesozoikum der Nufenen-Zone

Alle diese Gesteine sind alpin metamorph und daher kristallin. Abgesehen von den mesozoischen Sedimenten weisen sie deshalb immer mindestens zwei Mineralgenerationen auf: Erstens eine präalpine reliktsche, zweitens eine alpin entstandene. Im allgemeinen überwiegt der herzynische Mineralbestand. Feinkörnige Gesteine des Permokarbons und stark durchbewegtes herzynisches Kristallin können jedoch im Extremfall auch einen ausschliesslich alpinen Mineralbestand aufweisen. Alpine Gefügebereiche sind durch ihre Feinkörnigkeit und ein granoblastisches Mosaikgefüge gekennzeichnet.

Im folgenden Abschnitt werden die durchörterten Gesteinsserien zusammenfassend beschrieben. Die angegebenen Gesteinsgrenzen beziehen sich auf die Firstmitte. Von dieser Regel weicht einzig die Angabe der Lockergesteinsgrenze auf der Nordseite ab, da hier in geotechnischer Hinsicht der vollständige Eintritt des Tunnels in festen Fels die massgebende Grösse ist.

Den tonmineralogischen Untersuchungen, den Kluftmineralien und der geotechnisch wichtigen Durchtrennung des Gebirges sind eigene Abschnitte gewidmet. Zum Schluss werden Prognose und Befund verglichen.

3.2 Durchörterte Gesteinsserien

3.2.1 Lockergesteine Nordportal

(Sicherheitsstollen Tm N - 12 – 82)

(Tunnel Tm N 0 – 135)

Übersicht

Die Lockergesteinsstrecke beim Nordportal ist zwar nur kurz. Ihre Durchörterung brachte aber erwartungsgemäss erhebliche Probleme mit sich und nahm entsprechend viel Zeit in Anspruch. Eine Übersicht über die geologischen Verhältnisse zeigt die Figur 2.

Die Lockergesteine bestehen aus jüngeren künstlichen Schüttungen (Deponien) und den natürlichen quartären Ablagerungen über der Felsoberfläche. Die Grenzfläche zwischen den beiden Lockergesteinstypen besteht im vorderen Teil des Tunnels aus einem alten Boden mit einer Humusschicht. Im hinteren Teil sowie im Sicherheitsstollen liegt die Deponie direkt auf blockigem Gehängeschutt.

Deponien

Die Deponien bestehen im wesentlichen aus dem Ausbruchsmaterial des Bahntunnels, untergeordnet auch aus späteren Anschüttungen.

Die Deponie aus der Zeit des Bahntunnelbaus widerspiegelt den damaligen Vortrieb in umgekehrter Reihenfolge. Die zuerst angetroffene, d.h. zuletzt geschüttete Schicht enthält Schiefer und Gneise, die relativ dicht gelagert sind und ziemlich viel feines Material enthalten. Das gegen innen folgende Aare-Granitmaterial ist locker gelagert und besteht vorwiegend aus Blöcken und Steinen bis zu 50 cm. Untergeordnet enthielt die Deponie auch weggeworfenes Arbeitsmaterial wie Bauholz, Kellen, Schaufeln, Pickel und Schlegel.

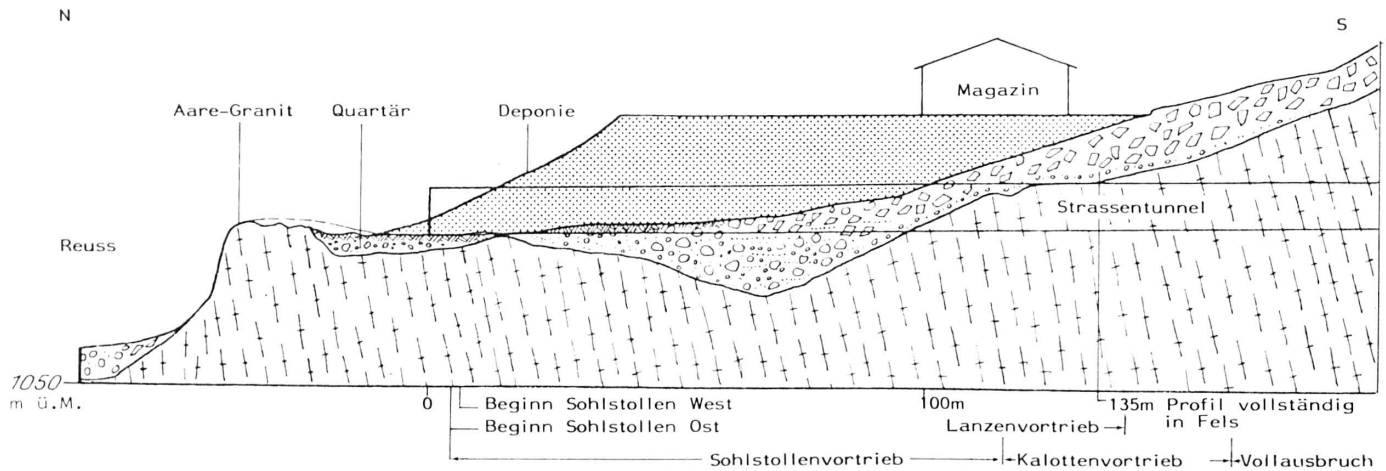


Fig. 2: Detailprofil durch die nördliche Portalzone des Strassentunnels

Quartär

Der höher gelegene Teil des Gehängeschuttes besteht aus groben Grantiblöcken.

Die Zwischenräume zwischen den mehrere m³ grossen Blöcken waren z.T. hohl, z.T. enthielten sie lockeres humoses Material. Im unteren Teil des Tunnels waren die Zwischenräume mit eingeschwemmten Kies und Sand fest verfüllt. Gewaschene Quarzkörner in siltigem Sand und horizontale Schichtung zeigen, dass diese Schichten in fliessendem Wasser abgelagert wurden, resp. der Blockschutt zeitweise von einem Gewässer (Reuss ?) durchströmt wurde (siehe Figur 3).

Im nördlichen Teil der Lockergesteinsstrecke folgt auf eine bis einige dm mächtige Humusschicht verschwemmtes Material mit gerundeten Blöcken, Sand und Kies. Bergeinwärts nehmen Zahl und Grösse der gerundeten Blöcke zu, bis sie zum Schluss in eckigen Blockschutt übergehen. Direkt über der Felsoberfläche erscheint eine geringmächtige grundmoränenartige Schicht, die aus einem dicht gelagerten verlehnten sandigen Kies mit Steinen und kleinen Blöcken besteht.

Verlauf der Felsoberfläche

Wie die Figur 2 zeigt, steht der Fels vor dem Portal z.T. an. Er wurde zudem im rechten Sohlstollen des Tunnels zwischen Tm 14 und 19 angefahren. Drei vor dem Bau abgeteufte Sondierbohrungen erbrachten aber den Nachweis, dass unter dem Deponiematerial und dem groben Blockschutt ein älterer Tallauf verborgen ist. Die Felsoberfläche sinkt aus diesem Grunde tunneleinwärts zuerst ab, um erst nach rund 70–90 m wieder anzusteigen. Sie schneidet den Tunnel in NE-SW Richtung unter einem Winkel von 40–50° und steigt im Tunnelprofil relativ langsam an (Tunnel: 15–25°, Sicherheitsstollen: ca. 30°). Der Anstieg verläuft stufenweise, indem die Felsoberfläche teilweise einer flachen Tallüftung, stellenweise aber auch der steilstehenden Schieferung folgt (Figur 3). Im Tunnel ergibt der schleifende Schnitt ein langes Anhalten der Felsoberfläche im Profil. Sie wurde auf der Ostseite bei Tm N 89 angefahren und war bei Tm N 135 in der westlichen Kalotte letztmals sichtbar, d.h. der Übergang erstreckte sich über eine Länge von 46 m.

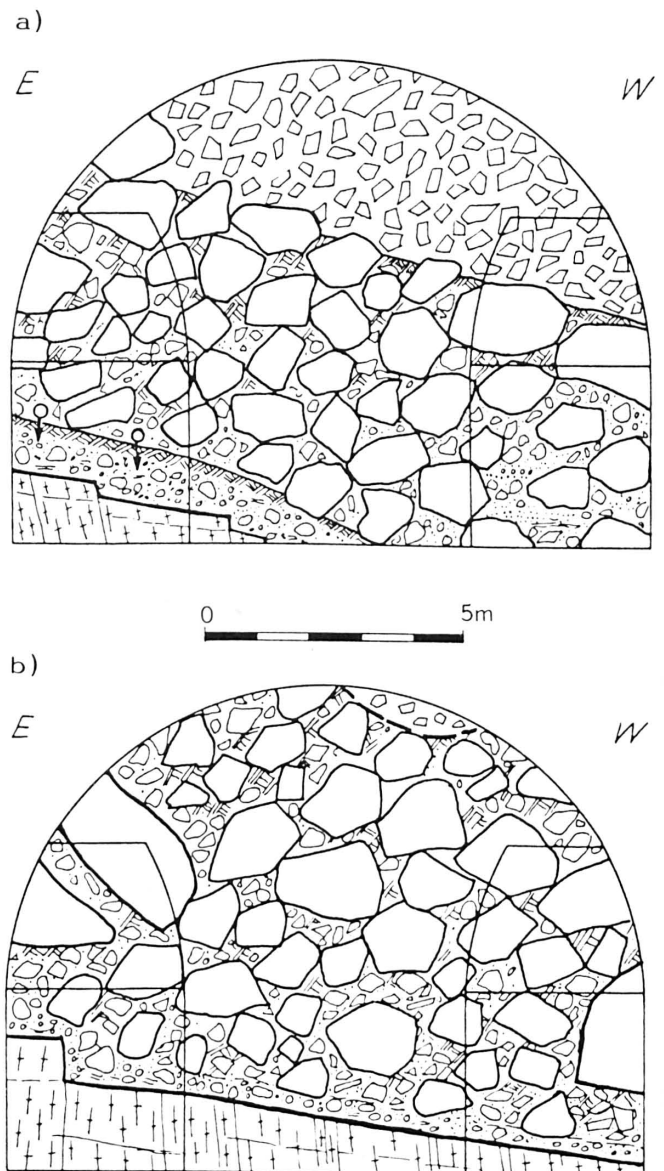


Fig. 3: Typische Querschnitte im Bereich der Lockergesteinsstrecke beim Nordportal.

- a) Tm N 93. Deponiematerial oben, Blockschutt in der Mitte und Moräne über der Felsoberfläche. Alte Bodenbildung an der Basis des Blockschuttes und verschwemmtes, geschichtetes Material in rechtem (westlichem) Sohlstollen.
- b) Tm N 98. Blockschutt mit dünner grundmoränenartiger Schicht über der gestuften leicht westfallenden Felsoberfläche.

3.2.2 Aare-Granit

(Sicherheitsstollen Tm N 82 – 3217)

(Tunnel Tm N 135 – 3238)

(Schacht Bätzberg)

Übersicht

Der Aare-Granit bildet einen ausgedehnten Gesteinskörper, der von den meisten Bearbeitern als intrusiv betrachtet wird. Der Gotthard-Strassentunnel durchquert nur seinen südlichsten Teil.

Der Granit ist alpin selektiv in unterschiedlichem Ausmass überprägt worden. Neben gneisigen bis stark gneisigen Partien kommen auch ausgesprochen massig aussehende, wenig deformierte Bereiche vor. Doch kann auch in diesen Typen zumindest tautozonale Glimmerregelung parallel zu einer Lineation festgestellt werden. In streng petrographischem Sinne handelt es sich daher nicht um einen richtungslos körnigen Granit, sondern um einen Granitgneis mit einem geregelten Gefüge.

Gesteinstypen

Aufgrund primärer stofflicher Unterschiede und der späteren alpinen Überprägung entstand eine Serie von Varietäten. Bei den Tunnelaufnahmen wurden folgende Typen unterschieden:

- *Massiger – flaseriger Typ*. In diesem alpin wenig beanspruchten Granit bleibt der Glimmer im Gestein verteilt oder ist auf Flasern konzentriert. Das Gestein wirkt im Aufschluss kompakt und massig.
- *Flaseriger – gneisiger Typ*. Ein planares Gefüge ist deutlich zu erkennen. Die Glimmer sind parallel zur Schieferung geregelt. Auf einzelnen s-Flächen ist ein rauher aber durchgehender Glimmerbelag vorhanden.
- *Gneisiger bis stark gneisiger Typ*. Das Gestein ist gut gerichtet. S-Flächen mit durchgehendem Serizitbelag sind häufig. Die gneisigen Typen sind meistens plattig bis gebankt.

Auf schmale Bewegungszonen beschränkt sind stark vergneiste, in Schiefer übergehende Typen sowie eigentliche Blastomylonite. Vor allem in gneisigen Gesteinstypen liess sich auf Schnittflächen oder in Dünnschliffen manchmal auch ein kataklastisches Gefüge erkennen (rupturelle Deformation).

In petrographischer Hinsicht ist der Aare-Granit nicht vollständig homogen. Granitische Zusammensetzung herrscht jedoch vor. Das Gestein besteht zu je rund einem Drittel aus Quarz, Plagioklas und Kalifeldspat. Als Glimmerminerale enthält er Biotit und Muskovit. Vor allem der Gehalt an dunklem Glimmer schwankt von einigen wenigen % in hellen bis zu mehr als 10% in dunkleren, gesprenkelt aussehenden Varietäten.

Neben Ganggesteinen (Apliten und Lamprophyren) enthält der Aare-Granit lokal dunklere schollenartige Einschlüsse von bis zu einigen dm Durchmesser. Es handelt sich um biotitreichere Schmitzen und Schlieren, diffus begrenzte helle feldspatreiche Bändchen, aber auch um grössere Gesteinskörper, wie z.B. den sogenannten Schöllenen-Syenit.

Die dunklen Schollen sind ein guter Gradmesser für das Ausmass der späteren Verformung des Aare-Granites. In massigen bis flaserigen Granitpartien blieb die runde Schollenform weitgehend erhalten. Im relativ homogenen gneisigen Aare-Granit des südlichen Abschnittes sind die Schollen dagegen stark geplättet. Die Ebene der grössten Verformung (Plättung) streicht gleich wie die alpine Schieferung, fällt aber mit 96° etwas steiler ein.

Innerhalb des Tunnels herrschen einzelne Gesteinstypen über längere Strecken vor. Dabei nehmen generell die gneisigen Typen gegen Süden zu. Dies führt zu folgender geologisch-petrographischer Gliederung (Tabelle 1).

Tabelle 1: Petrographische Gliederung des Aare-Granites		
Sicherheitsstollen (Tm N)	Tunnel (Tm N)	Ausbildung des Aare-Granites, Varietät
82 – 254	135 – 221	vorwiegend gneisig
254 – 378	221 – 377	vorwiegend massig-flaserig
378 – 1402	377 – 1377	gesprenkelte biotitreiche Varietät
1402 – 2314	1377 – 2267	vorwiegend massig
2314 – 2388	2267 – 2355 (2293 – 2315)	"Schöllenen-Syenit" hydrothermal zersetzter Granit
2388 – 3217	2355 – 3238	gneisiger Aare-Granit

Die Südgrenze des Aare-Granites bildet ein gebänderter Mylonit von 1 m Mächtigkeit.

Im Dünnschliff ist der Anteil an primären bereits herzynisch entstandenen Gemengteilen hoch. Die meisten Feldspäte sowie ein Teil der Biotite überdauerten die alpine Orogenese. Die alpinen Biotite sind olivbraun, kleinschuppig und erscheinen meist häufchenweise oder auf Glimmerzeilen. Zu den alpinen Neubildungen sind ferner Epidot, Klinozoisit, Serizit (Muskovit) zu zählen. Spät- bis postmetamorphe Bildungen sind möglicherweise die Chlorite und der Kalzit. Granat als alpines Mineral kommt sporadisch vor allem in den gneisigen Typen im Süden vor.

Das Korngefüge ist infolge der alpinen Metamorphose heterogen. Neben dem primären grobkörnigen, jetzt porphyroblastischen Gefüge, ist ein feinkörniges alpines granoblastisches Gefüge vorhanden. Das letzere und auch der Gehalt an entsprechenden Gemengteilen nimmt in den gneisigen Typen einen grösseren Raum ein als in den massigen. Auffallende Folge der mechanischen Beanspruchung sind auch die öfters zu beobachtenden kataklastischen Gefüge mit Rissen, die zum Teil intragranular verlaufen und in Extremfällen sogar ein unregelmässiges Netzwerk bilden.

Die Dünnschliffe aus dem südlichsten Teil zeigen oft deutliche Bewegungsspuren wie verbogene Zwillinglamellen, an Glim-

merzeilen abgeschnittene Feldspäte und undulöses Auslösch der Kalifeldspäte. In Felder zerlegte Feldspäte, Kalifeldspäte mit einem Mörtelkranz, stark granulierten Bereiche und durchgehende Mörtelbahnen sind weitere Spuren der Katalase.

"Schöllenen-Syenit"

Sicherheitsstollen Tm N 2314 – 2388, Tunnelröhre Tm N 2267 – 2355, Schacht Bätzberg Sm 432 – 459 des Pilotstollens (oberste 30 m des Schachtes)

Die als "Schöllenen-Syenit" in die Literatur eingegangene inhomogene Zone innerhalb des Aare-Granites (Karte FEHR 1926), die in der Schöllenen bei Brückwald aufgeschlossen ist, besteht im Tunnel aus einer wechsellagernden Serie mit

- unruhigem, stark mit gefalteten Apliten durchsetztem Granitgneis
- grauen fein- bis feinkörnigen, ziemlich gleichkörnigen Gneisen, die z.T. Hornblende führen und unregelmässig schlierig gebändert sind
- lagig-lentikulären hellen Gneisen
- grauen Gneisen mit auffallenden rhombischen bis runden Feldspatäugen.

Auffallendste Merkmale sind die immer vorhandene Gneisstruktur sowie die teilweise auftretenden, z.T. rhombischen Feldspatinsprenglinge. Die verschiedenen Gneistypen stecken oft als Schollen von einigen Metern Länge in normalem Granitgneis und bilden mit diesem komplizierte Intersektionen.

Die Dünnschliffuntersuchungen ergaben, dass neben normal granitischen jedoch feinkörnigen und gleichkörnigen Gneisen vor allem granodioritische bis tonalitische und quartzmonzodioritische bis quartzdioritische Typen vorkommen. Lokal tritt aktinolitische Hornblende auf, die teilweise in Biotit umgewandelt ist.

Lamprophyre

Die im Strassentunnel vorkommenden Lamprophyre streichen E-W bis ENE-WSW und fallen steil gegen Süden ein.

Alpin wenig beanspruchte Lamprophyre liegen in Form von feinkörnigen dunkelbraunen Gneisen vor, stark beanspruchte sind schwarz, schiefrig bis blättrig und bestehen beinahe ausschliesslich aus Biotit. Oft sind die Lamprophyre auch nur randlich verschiefert. Die Mächtigkeit der Gänge reicht von einigen cm bis zu 3 – 4 m. Die Lamprophyre treten regional gesehen scharenweise auf. Im Strassentunnel sind sie strikte auf die Zone zwischen Tm N 1366 – 2375 des Sicherheitsstollens resp. Tm N 1387 – 2386 des Tunnels beschränkt.

Aplite

Die Aplite als helle feinkörnige bis feinkörnige Ganggesteine gehören zur Gangfolge der Granitintrusion. Ihre Lage streut

stärker und sie verlaufen unregelmässiger als die Lamprophyre. Im Sicherheitsstollen erscheinen sie vorwiegend zwischen Tm N 709 – 2391 und im Tunnel zwischen Tm N 812 – 2273.

Hydrothermal zersetzter Granit

Kleine Vorkommen von zersetztem, ausgebleichtem und ausgelaugtem Gestein sind in der Randzone von Mineralklüften häufig zu beobachten. Sie entstanden durch Entzug der zur Kluftmineralneubildung notwendigen Substanz aus dem unmittelbaren Nebengestein.

Im Aare-Granit wurden jedoch im Sicherheitsstollen 2 kleinere und im Strassentunnel ein grösseres Vorkommen von hydrothermal zersetztem Granit angeschnitten, die nicht in direktem Zusammenhange mit Kluftmineralien stehen.

Von geotechnischer Bedeutung war das ausgedehnte Vorkommen von hydrothermal zersetztem Granit bei Tm N 2300 des Tunnels. Es begann bei Tm N 2293,5 auf der Ostseite und reichte auf der gleichen Seite bis Tm N 2315, eine "Apophyse", die einem flachliegenden Quarzband folgt, sogar bis Tm N 2325. Gegen Westen dehnt es sich maximal bis zur Mitte der westlichen Kalottenhälfte aus.

Der zersetzte Granit ist ausgelaugt, porös und von rötlicher Farbe. Die Grenze zum Nebengestein ist scharf.

Die Untersuchungen von STALDER & SCHENKER (1980) ergaben, dass Quarz, Plagioklas und Biotit vollständig verschwunden und als Gemengteile ausschliesslich Kalifeldspat, Laumontit, Hellglimmer, Epidot und rotes Pigment (Eisenoxyd) sowie lokal seidenglanzende, sehr kleinschuppige Hellglimmer vorhanden sind. Das Raumgewicht von 1,89 g/cm³ anstelle von 2,7 g/cm³ in gesundem Granit lässt auf einen Porenraum von 30% schliessen. Eine überschlagsmässige Berechnung ergab, dass rund 1 kg Quarz pro dm³ Gestein weggeführt wurde. Allein aus dem vom Tunnel aufgeschlossenen Bereich wurden somit rund 600 t Quarz gelöst und abtransportiert.

3.2.3 Südliche Gneiszone des Aar-Massivs

(Sicherheitsstollen Tm N 3217 – 4048)
(Tunnel Tm N 3238 – 4069)

Übersicht

Die südliche Gneiszone des Aar-Massivs enthält Migmatite (Bändergneise), Augengneise und Paragneise in komplexen rasch wechselnden Verbandsverhältnissen. Im Bereich des Strassentunnels kann diese wechselvolle Serie an Hand der vorherrschenden Gesteine und deren makroskopischem Gefüge zweigeteilt werden:

- Der *Nordteil* setzt sich vor allem aus hellen feldspatreichen Gneisen, Augengneisen und Bändergneisen zusammen, d.h. Produkten einer hohen herzynischen oder präherzyni-

schen Metamorphose. Der Metamorphosegrad reichte zur teilweisen Bildung migmatitischer Gneise aus.

- Der *Südteil* besteht aus ruhiger gelagerten, verglichen mit der nördlichen Serie, homogenen Gneisen. Zur Hauptsache handelt es sich um graue, fein- bis feinkörnige mesokrate Gneise, die teilweise Paragneischarakter besitzen.

Ganz allgemein wurde die südliche Gneiszone stärker beansprucht und durchbewegt als der wesentlich rigidere Aare-Granit. Entsprechend hoch ist der Anteil an alpin-metamorphen Mineralgemengteilen und Gefügebereichen. Auffallend ist das verhältnismässig häufige Auftreten von Kalzit. Die Ungleichkörnigkeit, d.h. das Nebeneinander von grösseren relik-tischen und sehr feinkörnigen alpin gebildeten Mineralkörnern, ist in der südlichen Gneiszone ebenfalls ausgeprägter und verbreiteter als im Aare-Granit.

Nordteil der südlichen Gneiszone

(Sicherheitsstollen Tm N 3217 – 3634)
(Tunnel Tm N 3238 – 3645)

Im Nordteil dominieren leukokrate Alkalifeldspatgneise. Bei den Bändergneisen führt der Wechsel von mechanisch härteren, feldspatreichen mit wenig resistenten glimmerreichen Bänken bei mechanischer Beanspruchung zu einem Boudinage. Dem migmatitischen Charakter entsprechend kann der Wechsel zwischen den einzelnen Gesteinstypen sehr rasch erfolgen. Trotz der starken Wechselhaftigkeit liessen sich die Gesteine serienweise zwischen Tunnel und Sicherheitsstollen einigermassen korrelieren. Anlässlich der Tunnelaufnahmen wurden die nachstehenden Gneistypen unterschieden:

– Augengneise und leukokrate augenführende Gneise

Unterschiedlich verschieferte vorwiegend leukokrate biotit- und epidotführende Serizit-Alkalifeldspat-Augengneise, z.T. auch kalzitführend.

– Lagige bis leicht gebänderte leukokrate fein- bis mittelkörnige Gneise

Petrographisch können aufgrund der Dünnschliffuntersuchungen unterschieden werden:

- Leukokrate klein- bis mittelkörnige \pm kalzit-, epidot-, biotit- und serizitführende Alkalifeldspatgneise.
- Leukokrate biotitführende Serizit-Alkalifeldspatgneise.
- Leukokrate kalzit- und biotitführende Alkalifeldspat-Serizit-Plagioklasgneise.

Der Glimmergehalt ist allgemein gering. Biotit kann in sehr hellen Typen auch fehlen. Mikroskopisch erweisen sich auch diese, einen gleichkörnigen Anschein erweckenden, Gneise als ungleichkörnig.

– Feinkörnige mesokrate Gneise, schiefrige Gneise bis Schiefer

Diese feinkörnigen feinlagigen bis schiefrigen Gneise sind heterogen. Sie entstanden häufig durch alpine Verschieferung aus anderen Gesteinstypen. Es finden sich alle Übergänge bis zu vollständig alpin metamorph rekristallisierten Myloniten. Entsprechend vielfältig ist aus diesem Grunde die Petrographie mit:

- Fein- bis mittelkörnigen epidot-, biotit-, kalifeldspatführenden Serizit-Plagioklasgneisen
- Epidot- und biotitführenden Serizit-Alkalifeldspatgneisen
- Feinkörnigen gebänderten Biotit-Plagioklasgneisen bis Myloniten
- Feinkörnigen und feinlagigen Zweiglimmer-Plagioklasgneisen
- Zweiglimmer-Plagioklasschiefer (Mylonite).

Mikroskopisch herrscht serizitisierter Plagioklas vor, während Kalifeldspat Nebengemengteil ist. Auffallend ist der bereits makroskopisch wahrnehmbare Pyrit in mylonitisier-ten Gneisen.

– Bändergneise

Die Bändergneise mit einer z.T. markanten Bänderung im dm- bis m-Bereich enthalten die bisher besprochenen Gesteinstypen als Lagen. Die mikroskopischen Untersuchungen ergaben, dass die hier auftretenden Gneise sehr plagioklasreich sind.

Südteil der südlichen Gneiszone

(Sicherheitsstollen Tm N 3634 – 4048)
(Tunnel Tm N 3645 – 4069)

Diese ruhig gelagerten, homogenen Gneise können abschnittsweise klar gegliedert werden. Das auffälligste Gestein der ganzen Zone ist der Aplitgranit, der im Sicherheitsstollen zwischen Tm N 3957 – 3967 durchörtert wurde. Petrographisch bemerkenswert ist ferner die Verbreitung von braunem Biotit und ein im grano-lepidoblastischen Gefüge enthaltener Chlorit mit schiefergrauer Interferenzfarbe (Klinochlor).

Die durchörterte Gesteinsfolge geht aus der Tabelle 2 (Seite 12) hervor.

Südgrenze des Aar-Massivs (Überschiebungszone)

Die Gneise des Aar-Massivs werden gegen die Grenze zur Urseren-Zone zunehmend schiefriger und gehen schliesslich in die vollständig verlehnte Überschiebungszone zwischen dem Aar-Massiv und der Urseren-Zone über. Im Sicherheitsstollen konnte diese tektonische Grenze erster Ordnung eingehend studiert werden: Die eigentliche etwa 1 m mächtige Grenzzone besteht aus einem weissen Lehmmylonit. Gegen die Gneise sind in diesem stellenweise weisse, stark verlehnte Serizit-Phyllonite zu erkennen. Die Grenze gegen die Kalke der Urse-

Tabelle 2 Gesteinsfolge im Südteil der südlichen Gneiszone		
Sicherheitsstollen (Tm N)	Tunnel (Tm N)	Petrographie (vorherrschender Gesteinstyp)
3634 - 3673	3645 - 3686	Braune Glimmerschiefer und feinkörnige feinlagige mesokrate Zweiglimmer-Plagioklasgneise. Rotbrauner Biotit, Klinochloritführend.
3673 - 3687	3686 - 3696	Graue feinkörnige relativ glimmerreiche Gneise, z.T. alkalifeldspatführend.
3687 - 3747	3696 - 3754	Graue feldspatreiche lagige fein- bis mittelkörnige biotit- und serizitführende Alkalifeldspatgneise, ± kalzitführend.
3747 - 3766	3754 - 3780	Bändergneise, Bänderung im 5 - 10 cm Bereich. Helle augenführende Gneise dominierend.
3766 - 3792	3780 - 3811	Graue feinkörnige chlorit- und kalzitführende Biotit-Plagioklasgneise bis Zweiglimmer-Plagioklasgneise, z.T. wirr von Epidotadern durchsetzt. Bis zu 25 - 50 % olivbrauner Biotit.
3792 - 3957 3967 - 3987	3811 - 3988	Monotone Serie von grauen fein- bis mittelkörnigen feldspatreichen kalzit-, chlorit- und biotitführenden Serizit-Alkalifeldspatgneisen, serizitführenden Biotitgneisen bis Zweiglimmergneisen mit stark wechselndem Alkalifeldspatgehalt (einige % bis 45 %), z.T. epidotführend.
3957 - 3967	-	Mittelkörniger heller Aplitgranit, alpin wenig beansprucht.
3987 - 4048	3988 - 4069	Vorwiegend graue sehr feinkörnige schiefrige leicht gebänderte Gneise. Auf den letzten 10 m in Serizitschiefer übergehend. Petrographisch heterogen. Vorwiegend ± kalzit-, epidot- und chloritführende Zweiglimmer-Plagioklasgneise. Lokal Amphibolit.

Tabelle 3 Schichtfolge im Mesozoikum der Urseren-Zone			
Sicherheitsstollen (Tm N)	Tunnel (Tm N)	Lithologie	vorherrschende Bankung
		<u>Jura</u>	
4048 - 4073	4069 - 4098	Homogene, dunkelgraue ruhig gelagerte gebankte Kalke.	cm - dm
4073 - 4116	4098 - 4126	Hellgraue, plättige feinkörnige Kalke mit tonigen oder hellglimmerbelegten Schichtflächen. Unregelmässig marmorisiert.	3 - 5 cm
4116 - 4127	4126 - 4129	Gebankte hellgraue und graue Marmore. 3 - 10 % rundliche Quarzkörner von 0,1 - 0,5 mm.	dm - m
4127 - 4149	4129 - 4153	Feinplättige graue Kalke mit Hellglimmer auf den Schichtflächen, z.T. leicht marmorisiert. Mikroskopisch neben Hellglimmerlagen auch quarzreiche Lagen. Fossilbruchstücke (Krinoiden).	0,5 - 5 cm
4149 - 4179	4153 - 4187	Vorwiegend dunkle Tonschiefer. Tektonisch stark beansprucht. Quarzlinsen. Streckenweise mit geringmächtigen trochitenführenden Kalkbänken. Kalkbänke mit bis zu 0,7 mm grossen Quarzkörnern.	mm - cm
4179 - 4227	4187 - 4238	Hellgraue bis graue feinplättige Kalke mit hellglimmerbelegten Schichtflächen. Vereinzelt reine Marmorbänke oder Tonschieferzwischenlagen. Sicherheitsstollen Tm N 4183 - 4189 dunkle Tonschiefer. Im südlichen Teil Wechsellagerung von grauen plättigen Kalken, dunklen graphitischen Tonschiefern und hellen marmorisierten Kalken. Zunehmend feinere Schichtung und Ueberwiegen der Tonschiefer und Kalkschieferschichten. Quarzgehalt z.T. 5 - 10 %.	2 - 5 cm
4227 - 4246	4238 - 4262	Wechsellagerung von cm mächtigen Kalkbänken mit dunkelgrauen Tonschiefern. Häufig Quarz- oder Quarz-Karbonatlinsen. Gestein z.T. brekziös. Relativ quarzreich.	mm - cm mm - cm
4246 - 4252	4262 - 4269	Verlehnte bis stark verlehnte Serie von grünlichem und weisslichem verlehntem Fels mit Dolomitbruchstücken und grauen verlehnten Tonschiefern. Z.T. mit Kalklinsen sowie grauen bis gelblichgrauen quarzitischen Serizitschiefern z.T. mit Trias verschuppt. Verschuppung Jura/Trias event. z.T. Quartenschiefer der Trias (?).	mm - cm
4252 - 4264	4269 - 4287	<u>Trias</u> . Gips und Dolomit. Häufig brekziös. Dolomitbruchstücke im Gips schwimmend. Auf Scherflächen Fasergipslagen.	massig

ren-Zone ist messerscharf. Die dunkelgrauen gebankten Kalke stossen ohne Übergang an den weissen Lehm. Ungefähr 20 cm nördlich dieser Grenze sind jedoch vereinzelte marmorisierte Kalkknollen in den Lehm eingebettet. Die Kalkknollen haben eine auf die Durchbewegung zurückzuführende rundliche Form (tektonische Gerölle).

Im verlehnten Gestein ist stellenweise eine flach gegen Westen einfallende Lineation zu beobachten.

3.2.4 Mesozoikum der Urseren-Zone

(Sicherheitsstollen Tm N 4048-4264)
(Tunnel Tm N 4069-4287)

Die Urseren-Zone umfasst eine normalstratigraphische Schichtfolge mit jurassischen Kalken und Tonschiefern im Norden, Trias in der Mitte und Permokarbon im Süden. Allerdings ist die Schichtfolge z.T. aus tektonischen, z.T. aus

stratigraphischen Gründen nicht überall vollständig. Der Kontakt gegen das Aar-Massiv ist tektonisch.

Der Jura enthält Kalke, sandige Kalke und Tonschiefer, deren stratigraphische Zuteilung umstritten resp. von den verschiedenen Autoren unterschiedlich vorgenommen wird (nur Lias oder Lias bis Malm (?)).

In den wenigen, sehr lückenhaften oberflächlichen Aufschlüssen der Trias wurden stratigraphisch von oben nach unten:

- quarzitischer Schiefer
- Dolomite
- Rauhwacken

gefunden. Gips in Form von Linsen wurde von BUXTOFF (1911, 1912) aus dem Furkatunnel beschrieben sowie von F.M. Stapff aus der Grenzzone zwischen Jura und Permokarbon im Gotthard-Bahntunnel erwähnt. Mächtigere Schichten aus Gips und Dolomit wurden zudem 1980 bei Sondierbohrungen an der Furkastrasse unterhalb von Tiefenbach gefunden.

Der Gotthard-Strassentunnel durchfährt zuerst den *Jura*. Im nördlichen Teil dominieren Kalke, im südlichen Teil nehmen Tonschiefer und Wechsellagerungen von Tonschiefern mit Kalken überhand. Streckenweise sind die jurassischen Sedimente intensiv verfaltet. Mikroskopisch führen die meisten Kalke etwas Hellglimmer und/oder Chlorit, Erz sowie in unterschiedlichem Masse Quarz und Feldspäte. In der Wechsellagerung von mergeligen Tonschiefern und Kalken im Südteil sind die dünnen Kalkschichten häufig vollständig zerbrochen. Die einzelnen Bruchstücke sind gegeneinander verdreht und mehr oder weniger regellos verteilt, so dass die ursprüngliche sedimentäre Schichtung teilweise nicht mehr zu erkennen ist. Petrographisch müssen diese Gesteine als tektonische Brekzie bezeichnet werden.

Fossilreste in Form von Echinodermenbruchstücken fanden sich in den plattigen Kalken und Wechsellagerungen Kalk/Tonschiefer des mittleren Teils.

Die anschliessende *Trias* besteht vorwiegend aus Gips sowie aus Dolomit, wobei letzterer z.T. brekziös in den Gips eingelagert ist. Die Grenzen beidseits der Trias sind uneben und unregelmässig. Gesamthaft gesehen überwiegt aber ein Einfallen gegen Norden.

Im einzelnen wurden im Mesozoikum die in der Tabelle 3, Seite 12, zusammengestellten Schichten durchfahren.

3.2.5 Permokarbon

(Sicherheitsstollen Tm N 4264 – 5698)
(Tunnel Tm N 4287 – 5712)
(Schacht Hospental)

Das Permokarbon enthält vorwiegend stratigraphisch nicht genauer datierbare Sedimente detritischen Ursprungs, in untergeordnetem Masse auch Gesteine aus der vulkanischen Tätigkeit während des Perms. Im Bereich des Tunnels kann es

im grossen zweigeteilt werden, in einen eher monotonen nördlichen bis ungefähr auf die Höhe des Schachtes Hospental reichenden und einen petrographisch wechsellagernden südlichen Teil. Im ganzen Permokarbon treten häufig perlschnurartig aneinandergereihte Quarzlinsen mit tonig verlehnten Randzonen auf.

Nördlicher Teil des Permokarbons

(Sicherheitsstollen Tm N 4264 – 5064)
(Tunnel Tm N 4287 – 5099)

Der nördliche Abschnitt des Permokarbons umfasst grünlich-graue Gesteine von häufig gneisigem Habitus, die psammatischen bis psephitischen Charakter aufweisen. Sie enthalten reichlich monomikte oder polymikte Knoten und Augen aus Quarz und Feldspat, die als detritische Komponenten gedeutet werden. Die Serizitschiefer und Gneise dieses Abschnittes entstanden aus arkoseartigen Sandsteinen und feinkörnigen Konglomeraten.

Im Bereich der Grenze zur Trias entstanden aus diesen Gesteinen als Folge der mechanischen Beanspruchung phyllitische hellgraue Serizitschiefer, die z.T. stark verlehmt sind. Sie reichen bis ca. Tm N 4420 des Sicherheitsstollens resp. ca. Tm N 4440 des Tunnels. In der unmittelbar auf die Trias folgenden rund 70 m langen Zone lassen sich mikroskopisch nur vereinzelte 1–2 mm grosse Körner als Bestandteile des ursprünglichen Korngefüges erkennen. Die anschliessenden hellen Serizitschiefer zeigen unter dem Mikroskop erstaunlicherweise ein sehr feinkörniges ruhiges grano-lepidoblastisches Gefüge. Das Gestein ist sehr quarzreich und enthält als Glimmermineral fast ausschliesslich Muskovit resp. Serizit. Örtlich gehen die Serizitschiefer in eigentliche Phyllite über.

Die bis zum Schacht Hospental folgenden Gesteine können petrographisch generell als kalzit-, chlorit- und biotitführende Serizitschiefer bis Gneise bezeichnet werden. Glimmer- und Quarzfeldspatgehalt variieren, ohne dass eigentliche Grenzen zwischen den Varietäten gezogen werden können. Das gleiche gilt für die Häufigkeit von Augen und Knoten aus Quarz und/oder Feldspäten als detritische Komponenten. Eigentliche Gerölle von granitischer oder aplitischer Zusammensetzung von einigen cm Durchmesser sind dagegen selten. Ein Beispiel zeigt die nachstehende Figur 4.



Fig. 4: Geröll aus einem Muskovit-Turmalin-Gneis in feinkörnigem Serizitschiefer (Kopie des Dünnschliffes GSN 5050 im Massstab 1 : 1, Kontur nachgezogen)

Neben quarzitischen Schiefern kommen auch cm mächtige Quarzbändchen vor, die stellenweise gehäuft erscheinen. Einschaltungen von Phylliten sind seltener. Selten sind auch die südlich von Tm N 4830 auftretenden 1–5 cm mächtigen Karbonatbänder, die in Einzelfällen Anhydrit enthalten. Gegen den Schacht Hospental schalten sich ferner grünliche feinkörnige relativ homogene Schiefer sowie feinlagige Gneise mit durchgehenden Serizitlagen ein.

Im Dünnschliff kann zwischen dem feinkörnigen Grundgewebe und den detritischen Komponenten unterschieden werden. Das Grundgewebe weist Korngrößen im Bereich von 0,1 mm auf. Der Serizitgehalt schwankt häufig zwischen 20–50%. Braunoliver Biotit ist mit Gehalten von 1–7% häufiger als Chlorit, d.h. die grünlichgraue Gesteinsfarbe stammt vermutlich vom Biotit.

Die detritischen Komponenten können aus bis einigen mm grossen Feldspäten (vorwiegend Plagioklas) oder aus Quarzknoten bestehen. Daneben kommen auch polymikte Komponenten vor. Die grössten bis 2,5 cm erreichenden Komponenten bestehen aus einem hellen granitischen Gestein. Im Druckschatten der detritischen Komponenten ist oft ein granoblastisches Gefüge aus Quarz, selten auch aus Feldspäten zu beobachten.

Südlicher Teil des Permokarbons

(Sicherheitsstollen Tm N 5064–5698)
(Tunnel Tm N 5099–5712)

Der südliche Abschnitt des Permokarbons enthält Gesteine, die sowohl im grossen wie im kleinen petrographisch sehr wechselvoll sind. Ganz allgemein ist das Korn fein bis sehr fein. Die Gneise und Schiefer besitzen z.T., wie im Nordteil, detritischen, d.h. vorwiegend psammitischen bis pelitischen Charakter und selbst konglomeratische Typen kommen untergeordnet immer noch vor. Auffallend sind jedoch zwei Gesteinstypen. Einerseits dunkelgrünliche Chloritschiefer, andererseits sehr helle, gebankte, quarzfeldspatreiche Gneise. Am Aufbau beider Gesteinstypen sind mit ziemlicher Sicherheit Komponenten vulkanischen Ursprungs beteiligt. Indizien dafür sind z.B. leistenförmige Plagioklase, saubere komplex verzwilligte grössere Plagioklase in einem äusserst feinkörnigen Grundgewebe oder das filzige feinkörnige Grundgewebe in feinkörnigen dunklen Gesteinen. Wahrscheinlich sind sowohl einmalige Ergussgesteine (Porphyre resp. Porphyrite), wie auch pyroklastische Gesteine (z.B. Tuffe, die sedimentär aufgearbeitet wurden = Tuffite) vorhanden.

In petrographischer Hinsicht bleibt Serizit der wichtigste Gemengteil. Neu kommt Klinoisit/Epidot hinzu. Einzelne Gesteinstypen enthalten reichlich Chlorit. Bemerkenswert ist das lokale Vorkommen von Anhydrit im Gesteinsgefüge. Der akzessorisch häufig vorkommende Turmalin kann in einzelnen Dünnschliffen zum Übergemengteil werden. Mehrmals zeigt das Schliffbild eine feine Wechsellagerung von ursprünglich sandigen arkoseartigen Lagen mit tonig-siltigen Zwischenschichten. In Extremfällen bestehen die hellen, d.h. sandigen Schichtchen aus lediglich 1–3 Kornlagen und sind

nur 0,03–0,06 mm dick. In genetischer Hinsicht ist von Interesse, dass z.T. im gleichen Abschnitt psammitische Gesteinstypen mit detritischen Komponenten und metamorphe vulkanische bis subvulkanische Gesteine nebeneinander vorkommen.

Petrographisch können im Südteil des Permokarbons folgende Gesteinstypen unterschieden werden:

- Kalzit-, chlorit- und klinoisit/epidotführende Serizitschiefer
- Kalzit-, biotit- und chloritführende Serizitschiefer
- Sehr feinkörnige (Korngrösse 0,03–0,1 mm) karbonatführende Chlorit-Serizitschiefer
- Grünliche feinlagige und feinkörnige serizit- und epidotführende Chloritschiefer
- Helle grobstruierte serizit- und biotitführende Chloritgneise
- Hellgraue bis grünliche quarzfeldspatreiche Gneise
- Feinlagige und feinkörnige karbonat-, chlorit- und biotitführende Epidot-Serizitschiefer
- Feinlagige Chlorit-Serizitphyllite
- Helle bis weisse serizitführende gut gebankte Gneise, z.T. felsitisch feinkörnig, z.T. gröber struiert mit 0,5–1,5 mm grossen Einsprenglingen aus Plagioklasen, Kalifeldspäten und Quarz (vermutlich Quarzporphyre und Porphyrite vulkanischen Ursprungs)
- Graugrüne kalzit-, biotit- und epidotführende Chloritschiefer mit leistenförmigen Plagioklasen (vulkanogen).

3.2.6 Nördliche Paragneiszone des Gotthard-Massivs

(Sicherheitsstollen Tm N 5698–7070)
(Tunnel Tm N 5712–7102)

Das Problem der Grenze zwischen Urseren-Zone und Gotthard-Massiv

Die ursprüngliche mineralogische Zusammensetzung des Permokarbons unterscheidet sich z.T. nur unwesentlich von jener der Gneise des Gotthard-Massivs. Da zudem beide Serien während der alpinen Orogenese ziemlich intensiv durchbewegt wurden, entstanden bei der anschliessenden Metamorphose weitgehend gleichartige Mineralparagenesen (Albit, Chlorit, Epidot, Biotit), so dass die Grenze nicht scharf ausgebildet sein kann. Hinweise auf die Zugehörigkeit zum Altkristallin des Gotthard-Massivs können nur eindeutig reliktsche Gemengteile und Gefüge liefern.

Nach NIGGLI (1944) sind für das Gotthard-Massiv typisch: Grobblättrige Muskovite, Pegmatite, Aplitgänge und alle übrigen Anzeichen plutonischer Tätigkeit.

Im Zuge der Tunnelaufnahmen wurde die Grenze zwischen Urseren-Zone und Gotthard-Massiv dort gezogen, wo erstmals rotbraune Biotite auf den Schieferungsflächen erscheinen. Die südwärts folgenden Gesteine sind jedoch z.T., wie jene des Permokarbons, stark chloritführend. Eindeutige Indizien für das Gotthard-Massiv, wie z.B. zerscherte Pegma-

tite mit grossen Muskoviten erscheinen erst ab Tm N 5910 des Sicherheitsstollens.

Übersicht über die nördliche Paragneiszone

Die nördliche Paragneiszone des Gotthard-Massivs wird in der Literatur auch als Gurschengneis-Zone bezeichnet. Zur Hauptsache besteht diese aus einer eher monotonen Serie von mesokraten feinkörnigen Zweiglimmergneisen, die stellenweise eine Kleinfältelung aufweisen. Sie führen lokal reichlich Quarz-Feldspatlagen und -linsen, seltener karbonatführende Linsen. Die Serpentine, die oberhalb des Tunnels bei Kämmleten (Steinbruch) aufgeschlossen sind, erschienen im Gotthard-Strassentunnel nur in Form von kleinen Linsen resp. Linsenzügen. In die Paragneise sind ausserdem in untergeordnetem Masse Amphibolite sowie helle quarzfeldspatreiche Gneise eingeschaltet. Teilweise sind die Gneise gebändert.

Paragneise

Haupttyp der Paragneise sind mesokrate feinkörnige Zweiglimmer-Plagioklasgneise mit wechselndem Glimmergehalt. Die Korngrösse schwankt vorwiegend zwischen 0,1–0,3 mm. Die Paragneise führen ausser den Hauptgemengteilen in unterschiedlichem Ausmass Granat, Epidot, Chlorit und Kalzit. Kalifeldspat kommt nur sporadisch vor. Mikroskopisch hat der Muskovit sowohl die Form von feinschuppigem Serizit als auch von kleinschuppigem Muskovit.

Auf den ersten 250 m nach dem Permokarbon erscheinen zuerst noch grünliche kalzit- und chloritführende Serizit-schiefer bis biotitführende Karbonat-Chloritschiefer, die sich von den Gesteinen des Permokarbons einzig durch rotbraune Biotite auf den Schieferungsflächen sowie gröbere Muskovitblättchen unterscheiden. Daneben kommen aber auch Gneise vor, die vulkanischen Typen des Permokarbons stark gleichen. Die Möglichkeit einer Verschuppung von Permokarbon mit gotthardmassivischen Paragneisen im Grenzbereich kann daher nicht ausgeschlossen werden. Neben typischen Paragneisen treten auch helle, feinkörnige feldspatreiche karbonat-, biotit- und z.T. alkalifeldspatführende Muskovit-Plagioklasgneise auf. Im Abschnitt Tm N 5868–5954 des Sicherheitsstollens resp. Tm N 5896–5968 des Tunnels enthalten die Paragneise grobe deformierte Quermuskovite sowie zerschernte Muskovit-Pegmatite.

Amphibolite

Die Strecke zwischen Tm N 6429–6537 des Sicherheitsstollens resp. Tm N 6456–6552 des Tunnels enthält Amphibolite, die mit mesokraten Biotitgneisen und Zweiglimmergneisen wechsellagern. Die Amphibolite im nördlichen Teil dieses Abschnittes zeichnen sich durch eine blassgrüne *aktinolitische Hornblende* und einen hohen Chlorit- und Klinozoisitgehalt aus, d.h. es handelt sich um titanit-, kalzit- und biotitführende Plagioklas-Klinozoisit-Chlorit-Amphibolite. Der mächtigere Amphibolitzug im südlichen Teil führt eine *gewöhnliche grüne Hornblende*, die bestäubt sein kann sowie

bedeutend weniger Chlorit und Klinozoisit, dafür vermehrt Biotit. Diese Gesteine können somit als titanit-, klinozoisit-, z.T. auch granat- und chloritführende Biotit-Plagioklas-Amphibolite bezeichnet werden.

Ultrabasische Gesteine (Speckstein, Topfstein)

Im Sicherheitsstollen erschienen bei Tm N 6143, 6173 und 6268 ultrabasische Linsen resp. in Linsen zerlegte Bänder, die maximal 2 m mächtig sind. Im Tunnel wurden keine derartigen Vorkommen festgestellt.

Die Dünnschliffe zeigen, dass das Gestein vorwiegend aus Klinochlor, Magnesit und Talk besteht, wobei sowohl Magnesit wie Talk vorherrschen können. Alle Schliffe enthalten noch etwas Quarz sowie akzessorisch Erz. Der Rand der ultrabasischen Linsen ist biotitreich. In einem Schliff besteht er aus einem Biotit-Klinochlorschiefer mit niedrigem Magnesitgehalt.

Muskovit-Pegmatite

Die bis 2 m breiten hellen grobkörnigen Muskovit-Pegmatite wurden als mechanisch rigidere Ganggesteine als die umgebenden glimmerreichen Gneise durch die alpine Gebirgsbildung in perlschnurartig aneinandergereihte Linsen zerlegt. Das Gestein ist meistens mittel- bis grobkörnig geblieben. Auffallend ist die Zusammensetzung der Muskovit-Pegmatite. Neben 5–15% Muskovit, z.T. auch Serizit, enthalten sie 20–35% Quarz und 60–70% Plagioklas, jedoch keinen Kalifeldspat, d.h. die Pegmatite besitzen quarzdioritischen bis dioritischen Charakter.

3.2.7 Gamsboden-Granitgneis

(Sicherheitsstollen Tm N 7070–8009/Tm S 8262–5377)
(Tunnel Tm N 7102–8283/Tm S 7988–5376)
(Schacht Guspisbach)

Der Gamsboden-Granitgneis bildet an der Oberfläche auf einer Fläche von rund 12 km² einen stockartigen Körper, der diskordant im Altkristallin liegt, und für den eine intrusive Entstehung angenommen wird. Hofmänner (1964) hat ihn petrographisch eingehend untersucht.

Der Gamsboden-Granitgneis ist ein ziemlich homogener heller kompakter mittel- bis grobkörniger Gneis, für den eine porphyrische Struktur charakteristisch ist. Die bis mehrere cm grossen Kalifeldspat-Einsprenglinge stehen z.T. quer zur Schieferung, z.T. sind sie in diese eingeregelt. Im Unterschied zum Aare-Granit sind im Gamsboden-Granitgneis immer durchgehende glimmerbelegte s-Flächen vorhanden, d.h. die Gneisstruktur ist ausgeprägt. Unterschiede im Glimmer- resp. Feldspatgehalt können zu lokalen Varietäten mit etwas helleren feldspatreicheren einerseits und grauen biotitreichen Typen andererseits führen. Der Grad der Verschieferung kann ebenfalls variieren. Stärker schiefrige Typen sind im allgemeinen auch feinkörniger und enthalten lentikulare

augenförmige Feldspateinsprenglinge. Örtlich war das Gestein auch relativ homogen und gleichkörnig, so dass in den Stollenaufnahmen granitische Zonen ausgeschieden werden konnten. Sie erstreckten sich meistens über eine Länge von rund 10 m (siehe Anhang 4b). Quarzlinsen, feine Quarzlagen und kleine dunkle Schollen sind eher selten.

Petrographisch besitzt der Gamsboden-Granitgneis eine granitische Zusammensetzung, d.h. er enthält gesamthaft neben 20–50% Quarz ähnlich grosse Anteile an Plagioklas und Kalifeldspat. Daneben führt er Muskovit/Serizit (5–15%), Biotit/Chlorit (2–10%), Epidot (3–8%) sowie etwas Kalzit (1–3) und Granat (ca. 1%). Er kann somit als porphyrischer epidotführender Zweiglimmer-Alkalifeldspatgneis, der z.T. granathaltig ist, bezeichnet werden.

Im Dünnschliff überwiegt der Altbestand generell über die alpin neu gebildeten Mineralien. Ausschliesslich alpinen Alters sind Kalzit, Serizit, Epidot und möglicherweise Granat. Alle übrigen Gemengteile sind in zwei Generationen vorhanden. In gneisigen Typen mit alpin gebildeten durchgehenden feinkörnigen Lagen beträgt die Korngrösse oft lediglich 0,05–0,15 mm. Wie im Aare-Granit können z.T. kataklastische Strukturen wie zerrissene oder in Felder zerlegte Feldspäte, verbogene Muskovite und verbogene Zwillinglamellen der Plagioklase beobachtet werden.

Lamprophyre

Die dunklen Gänge sind dm bis maximal 3 m mächtig und streichen vorwiegend schieferungsparallel. Sie bestehen z.T. zu einem Drittel bis zur Hälfte aus Biotit. Daneben enthalten sie Muskovit, z.T. reichlich Kalzit und Epidot sowie Plagioklas und Quarz. Die schieferigen Randzonen eines Lamprophyrs bestehen sogar ausschliesslich aus Epidot und Biotit.

3.2.8 Guspis-Zone

(Sicherheitsstollen Tm S 4483–5377)
(Tunnel Tm S 4475–5376)

Die Guspis-Zone bildet einen schmalen Paragneis-Zug, der die Fibbia- von den Gamsboden-Granitgneisen trennt. Die beiden letzteren bilden möglicherweise sogar eine petrographisch-tektonische Einheit, die durch die "Einfaltung" der Guspis-Zone oberflächlich getrennt wurde. Im Westen wird diese von Rotondo-Granit abgeschnitten, setzt sich aber weiter westlich bis ins Oberwallis fort. Die östliche Fortsetzung ist umstritten, kann aber in den Paragesteinen der Zone von Motta Naira gesehen werden.

Die Zone fällt durch den hohen Biotitgehalt der meisten Gesteine auf. Am stärksten vertreten sind Biotitgneise und -schiefer, Biotit-Chloritgneise und -schiefer, Hornblende-schiefer sowie vereinzelte Amphibolite. Häufig sind auch Pegmatite, Aplite und Lamprophyre. Vor allem im nördlichen Abschnitt zeugen viele Mylonitzonen und völlig zerrüttete Partien von einer starken postmetamorphen tektonischen Beanspruchung.

3.2.9 Fibbia-Granitgneis

(Sicherheitsstollen Tm S 3659–4483)
(Tunnel Tm S 3652–4475)

Der Fibbia-Granitgneis bildet einen batholithischen Granitkörper in der Gegend des Gotthardpasses.

Es handelt sich um einen sehr konstant ausgebildeten Komplex heller, granitischer Gneise mit charakteristischen grossen Feldspataugen. Die Textur ist im allgemeinen flaserig-schlierig, die Feldspataugen sind eingeregelt. Deutlich ist auch eine steilstehende alpine Striemung ausgebildet. Teilweise tritt aber die Schieferung ganz zurück und es liegen eigentliche massige Granite vor. Das Gestein wird häufig von Apliten und Pegmatiten, seltener von Lamprophyren durchschlagen. Die Nordgrenze zur Guspis-Zone ist tektonisch stark beansprucht und wird durch einen ca. 8 m mächtigen Biotitphyllit gebildet.

Die petrographische Zusammensetzung ist granitisch, wobei der Anteil des Kalifeldspates (rund 20%) gegenüber dem Plagioklas (25–30%) deutlich zurück liegt. Bei den Glimmern dominiert Biotit (10%) über Muskovit-Serizit (5–10%).

3.2.10 Rotondo-Granit

(Sicherheitsstollen Tm S 3543–3596 und 3644–3659)
(Tunnel Tm S 3511–3583 und 3625–3652)

Der Rotondo-Granit bildet einen stockförmigen Granitkörper, dessen Hauptmasse ziemlich weit westlich des Tunnelprofils, zwischen Nufenenpass und Witenwasserental aufgeschlossen ist. Im Strassentunnel wurden lediglich zwei schmale Ausläufer nach Südosten angefahren. Der südlichere, mächtigere (70 m) ist deutlich intrusiv in den Sorescia-Gneis eingedrungen. Der nördliche Ausläufer, ein eher gangförmiger Granit, hat eine intrusive Grenze zum Sorescia-Gneis im S, während die nördliche Grenze zum Fibbia-Granitgneis tektonisch ist.

Beim im Tunnel angetroffenen Gestein handelt es sich um typischen hellen, aplitischen Rotondo-Granit mit grünlichem Feldspat, bräunlichem Quarz und auffallend wenig dunklem Biotit (3–5%). Charakteristisch für den Rotondo-Granit ist sein massiges gleichkörniges Aussehen. Die Hauptgemengteile Quarz, Plagioklas und Kalifeldspat machen je etwa einen Drittel des Mineralgehaltes aus. In petrographischer Hinsicht ist das Vorkommen von Granat (0,1–1%) als Nebengemengteil interessant.

3.2.11 Sorescia-Gneis

(Sicherheitsstollen Tm S 3015–3543 und 3596–3644)
(Tunnel Tm S 3004–3511 und 3583–3625)

Der Sorescia-Gneis wird mit dem Hühnerstock-Gneis und der Prato-Serie zusammen als eine genetische Einheit betrachtet (HAFNER 1958). Er bildet einen markanten Gesteinszug, der

sich in West-Ost-Richtung durch das ganze Gotthardmassiv verfolgen lässt. Im Tunnel tritt er auf einer Strecke von 549 m auf, an der Oberfläche schwankt seine Mächtigkeit zwischen 100 und 800 m.

Das Gestein ist ein lagiger, dunkler Biotit- oder Zweiglimmergneis, der in Meterabständen grosse Kalifeldspataugen enthalten sollte (HAFNER 1958, STEIGER 1962). Im Tunnelprofil sind solche Augen zwar vorhanden, nicht aber in der angegebenen Regelmässigkeit, sondern nur in wenigen, massigen Partien. Der Gneis ist alpin-tektonisch stark überprägt und zeigt eine deutliche, steilstehende Striemung. Sehr verbreitet sind Pegmatite und Aplite. Ein Lamprophyr tritt in der Nähe des Rotondo-Granites auf (Tm S 3610; Tm S 3627 im Sicherheitsstollen).

Der Sorescia-Gneis hat (nach STEIGER 1962) eine polymetamorphe Genese unter Einbezug anatektischer Vorgänge. Er wird vom Rotondo-Granit diskordant durchschlagen, was zu einem doppelten Auftreten des Sorescia-Gneises im Tunnel führt. Petrographisch kann er als Zweiglimmer-Plagioklasgneis bezeichnet werden. Er führt neben den Hauptgemengteilen Quarz (45%), Plagioklas (15–25%), Biotit (15–20%) und Muskovit (10–15%), als Neben- und Übergemengteile noch Kalifeldspat (0–5%), Granat (0–2%) und Chlorit (0–2%).

3.2.12 Prato-Serie

(Sicherheitsstollen Tm S 2545–3015)
(Tunnel Tm S 2525–3004)

Die Prato-Serie lässt sich an der Oberfläche vom Nufenenpass bis zum Gotthardpass verfolgen und setzt sich östlich leicht versetzt als Corandoni-Zone fort.

Neben hellen Glimmergneisen treten Biotit-Schiefer, Hornblendegneise sowie charakteristische feingebänderte Amphibolite auf. Die Serie zeigt eine komplizierte Internstruktur mit vielen steilen, engen Falten und ist sicher polymetamorph überprägt. Der nicht ganz scharfe Kontakt zur Tremola-Serie wird mit den ersten feingebänderten Amphiboliten gezogen. Der letzte Amphibolit im N gilt als Grenze zum Sorescia-Gneis.

Typisch für die Prato-Serie ist die stromatitische Lagerung der hellen und dunklen Gesteinsarten. Die Amphibolite sind meist gebändert und zeigen scharfe Grenzen, wobei Amphibolithorizonte mit hellen Glimmergneisen wechsellagern. In der ganzen Zone verbreitet sind linsenartige Pegmatite.

Im Tunnel können folgende Gesteinsarten unterschieden werden:

- Zweiglimmergneise
- Biotitschiefer/Glimmerschiefer
- Hornblendegneise/Hornblendeschiefer
- Amphibolite

Die charakteristische Zusammensetzung der einzelnen Gesteinstypen ist in der Tabelle 4 zusammengestellt:

Gemengteil	Zweiglimmergneise	Glimmerschiefer	Hornblendegneise	Amphibolite
Quarz	45	35	20	15
Plagioklas	25	10	5	25
Muskovit-Serizit	15	20	0	0
Biotit	10	25	10	5
Hornblende	5	0	50	50
Epidot	5	5	15	5
Karbonat	5	5	5	0
Granat	0–5	0	0	0–5

3.2.13 Tremola-Serie

(Sicherheitsstollen Tm S 56–2489)
(Tunnel Tm S 35–2496)
(Lüftungsschacht Motto di Dentro)

Der allgemeine Charakter der im Tunnel angetroffenen Gesteine der Tremola-Serie stimmt gut mit der Beschreibung der oberflächlichen Aufschlüsse von STEIGER (1962) überein. Am Aufbau sind die in Tabelle 5 aufgeführten Gesteine beteiligt:

Gestein	Anteil (%)	
	an der Oberfläche	im Tunnel
Glimmergneise	65	63
Glimmerschiefer		
Hornblendegneise und -schiefer	20	27
Silikat-Karbonat-Gesteine	5	7
Amphibolite	3	2
Quarzite	7	1

Die Serie muss als metamorphe Paragesteinsserie gedeutet werden, die ursprünglich vorwiegend Tone, mergelige Tone, Mergel, dolomitische Mergel, sandige Dolomite und Kalke, eventuell auch tuffogene Lagen enthielt. Der rasche Wechsel der Gesteinstypen entspricht einer ursprünglich unruhigen Sedimentation. Auf die wahrscheinlich niedriggradige präalpine Metamorphose folgte eine alpine, die von der Grünschiefer bis in die untere Amphibolitfazies reicht. Der heutige Mineralgehalt geht allein auf diese zweite Metamorphose zurück. Im Gegensatz zu allen übrigen mit dem Gotthardtunnel durchfahrenen Serien fehlen somit voralpine Relikte.

Die Tremola-Serie wurde im Bereiche des Gotthardtunnels von STEIGER (1962) in 3 Zonen unterteilt, nachdem HAFNER (1958) weiter westlich eine Zweiteilung vorgenommen hatte. Steiger unterschied:

- a) Nelva-Zone (= südliche Zone)
- b) Zone des Sasso Rosso (= mittlere Zone)
- c) Pontino-Zone (= nördliche Zone)

Unterscheidungsmerkmal war die relative Häufigkeit der verschiedenen Gesteinstypen. In der Nelva-Zone dominieren Glimmergneise und Glimmerschiefer, in der Zone des Sasso

Tabelle 6 Modalgehalte der wichtigsten Gesteinstypen der Tremola-Serie (Vol.%)

Gemengteil	Glimmer- gneise	Glimmer- schiefer	Hornblende- gneise	Hornblende- schiefer	Silikatkarbo- natgesteine	Kalksili- katgesteine	Amphibolite	Quarzite
Quarz	35 – 40	30 – 35	30	20	25	15	15	75
Plagioklas	25	10	25	10	10	0 – 5	20	5
Biotit	15	15 – 20	10	10	10	–	5	+
Muskovit-Serizit	10 – 15	30 – 35	+	+	10	–	–	15
Chlorit	0 – 5	0 – 5	5	10	0 – 5	5	5	+
Hornblende	0 – 5	0 – 10	25	50	–	15	50	+
Granat	0 – 5	0 – 5	+	+	–	–	–	+
Karbonat	0 – 5	0 – 5	5	0 – 5	40	25	5	5
Zoisit-Epidot	–	–	0	0 – 5	0 – 5	35	0 – 5	–

+ akzessorisch oder Uebergemengteil

Rosso Chloritglimmerschiefer, Chloritglimmergneise, Hornblendeschiefer und in der Pontino-Zone Glimmergneise, Hornblendeschiefer und -gneise und Glimmerschiefer.

Bei den geologischen Tunnelaufnahmen wurde diese Zoneneinteilung nicht berücksichtigt, da die Zonen aufgrund makroskopischer Befunde im kleinräumigen Tunnelaufschluss nicht abgegrenzt werden konnten. Auf dem Befundprofil 1 : 10'000 (Anhang 3) und den Horizontalschnitten 1 : 10'000 (Anhang 4b) wurde die Einteilung jedoch andeutungsweise übernommen.

Trotz der grossen Vielfalt an Gesteinstypen sind nur die in Tabelle 6 aufgezählten 9 Mineralien sowie akzessorisch Disthen und Staurolith etc. am Aufbau derselben beteiligt. Die berühmtesten und bekanntesten Gesteine der Tremola-Serie sind die dekorativen Granat-Hornblendegarbenschiefer.

Je nach Mineralgehalt und Ausbildung der Mineralien kommen alle Übergänge zwischen den Gesteinstypen vor. Die wichtigsten werden im folgenden kurz charakterisiert. Die mittleren Modalgehalte der verschiedenen Gesteine sind in der Tabelle 6 zusammengestellt.

Glimmergneise und -schiefer

Der Übergang von Gneis zu Schiefer ist fließend. Zusammengekommen sind rund zwei Drittel der Tremola-Serie aus Glimmergneisen und -schiefern aufgebaut.

Gneise und Schiefer bilden mächtige Horizonte von bis 100 m Mächtigkeit. Häufig ist auch eine enge Wechsellagerung mit Quarziten, Hornblendegesteinen sowie Karbonatsilikatgesteinen zu beobachten. Generell sind in den Randzonen der Tremola-Serie eher massige, in der Mitte vermehrt auch schieferige Gesteine vertreten.

Nach dem Mineralgehalt kann petrographisch eingeteilt werden in Biotitserizit-, Zweiglimmer-, Chlorit-, Karbonatglimmergneise und -schiefer etc.

Einige typische makroskopische Merkmale sind:

- Auffallend helle Farbe
- Horizonte bis 100m mächtig, lagenweise aber stark schwankender Mineralgehalt
- Intensive Wechsellagerung mit anderen Gesteinen
- Meist gut ausgebildete Schieferung, Glimmerminerale in Schieferungsrichtung orientiert und auf Schieferungsflächen angereichert
- Querbiotite sind häufig, vor allem in den schieferigen Gesteinen
- Schlierenartig diffuse Anreicherung von Feldspat, sowohl kondordant als auch diskordant zur Schieferung
- Quarzlinsen und Schmitzen
- In den Schiefen: Schieferungsflächen oft wellenförmig verbogen, gefaltet oder gefältelt
- Auffallende Granate 0,1 – 3 cm gross
- Hornblendegarben bis 10 cm, nur bei niedrigem Hornblendegehalt in schieferigen Gesteinen.

Hornblendegneise und -schiefer

Hornblendegneise und -schiefer sind vor allem im mittleren und nördlichen Teil der Tremola-Serie stark vertreten. Auch hier führen verschiedener Gehalt und Ausbildung der Hornblende zu mannigfachen Gesteinsbildern. Typisch ist die stromatische Ausbildung dieser Gesteine.

Typische makroskopische Merkmale:

- Feinnematoblastische Hornblendeschiefer mit geregelter Hornblende, schieferig-lagig ausgebildet, zeigen Übergänge zu Amphiboliten
- Porphyroblastische Hornblendeschiefer ohne Einregelung der Hornblende, mit nur undeutlich ausgebildeter Schieferung, bilden die Hauptmasse dieser Gruppe
- Garbenschiefer treten nur bei geringem Hornblendegehalt auf
- Hornblendegneise zeichnen sich durch etwas höheren Plagioklasgehalt und hellere Farbe aus.

Silikatkarbonatgesteine

Silikatkarbonatgesteine sind im Tunnelprofil vorwiegend zwischen Tm S 1400 und 2200 sowie an der Grenze zur Trias im Süden anzutreffen. Es handelt sich um dm – m, ausnahmsweise bis 10 m mächtige Einschaltungen, die in wenigen, aber mächtigen, in ihrer Ausbildung sehr unregelmässigen Zonen auftreten. Meist handelt es sich um massige, körnige Gesteine, die nur bei erhöhtem Serizitgehalt leicht schieferig ausgebildet sind. Biotit, Chlorit und Hornblende sind häufig schon von Auge zu erkennen. Einzelne Lagen enthalten auch bis 30% Epidot-Zoisit, wobei dann diese Mineralien lagenweise angereichert sind.

Amphibolite

Amphibolite treten nur im Norden der Tremola-Serie auf und erschweren die Abgrenzung der Tremola- von der Prato-Serie. Es sind meist schmale, cm bis m mächtige Lagen in enger Wechsellagerung mit hellen Gneisen, jedoch nie wie typische Bänderamphibolite aussehend. Die Textur ist schiefrig bis lagig und es können meist zwei Generationen Hornblende unterschieden werden: feine, gut geregelte Hornblendestengeln sowie porphyroblastische, unregelmässig wachsende sperrige Hornblendekristalle. Von Auge lassen sich weiter Plagioklas, Quarz, Biotit, Chlorit, Epidot, Karbonat und Limonit erkennen.

Quarzite

Quarzite sind in der ganzen Tremola-Serie vertreten, spielen aber höchstens eine untergeordnete Rolle. Sie treten immer in Wechsellagerung mit anderen Gesteinen als wenig mächtige Horizonte auf. Auffallend ist ihre grauweiss-rötliche, seltener grünlich dunkelgraue Farbe sowie die massige Ausbildung. Meist ist etwas Serizit vorhanden, was zu einer leichten Schieferung führen kann. Nur selten tritt etwas Biotit, Chlorit, Granat, Erz oder biotitisierte Hornblende auf.

3.2.14 Mesozoikum (Trias) der Nufenen-Zone

(Sicherheitsstollen Tm S (–10) –56)
(Tunnel Tm S (–30) –35, Voreinschnitt)

Die Trias wurde im Haupttunnel praktisch nur im Voreinschnitt angetroffen. Im Sicherheitsstollen wurde sie auf einer Länge von 54 m durchfahren, nachdem sie auch hier bereits im Voreinschnitt teilweise abgebaut worden war.

An der geologischen Basis der Trias befindet sich ein ca. 7 m mächtiger Quarzit, der Basisquarzit. Darin sind einzelne Muskovit- und Kalzitlagen eingeschaltet. Es folgen Dolomite mit einigen Biotitlagen, weiche, sehr kavernöse Rauhacken und dann wieder gebankte Dolomite.

Die Trias bildete hier die Basis der ehemaligen mesozoischen Sedimentbedeckung des Gotthard-Massivs. Jüngere Schichten sind in der Umgebung von Airolo nicht vorhanden, denn

während der alpinen Gebirgsbildung wurden grosse Teile der Sedimentbedeckung des Massivs als Decken abgeschert. Die verbliebene Trias wurde steilgestellt.

3.3 Tonmineralogische Untersuchungen

Die Gesteine im Übergang vom Mesozoikum ins Permokarbon sind z.T. stark zersetzt und verlehmt. Aus dieser Zone wurde eine Anzahl von Proben tonmineralogisch untersucht, um zu prüfen ob und in welchen Mengen quellfähige Tonmineralien vorliegen. In der Trias galt es abzuklären, ob neben Gips auch Anhydrit vorhanden ist.

Die Proben wurden im mineralogisch-petrographischen Institut der Universität Bern röntgenographisch auf einem Diffraktometer analysiert (Analytiker Prof. Dr. Tj. Peters und Dr. M. Frey (heute Professor an der Universität Basel)). Die Nachweisgrenze dieser Methode liegt bei ca. 5 Gew.%. Neben dem Mineralbestand der Tonfraktion (Korngrösse < 2µ) wurde jeweils auch der Mineralbestand der Gesamtprobe qualitativ bis halbquantitativ abgeschätzt.

Die Analysen ergaben überraschenderweise das Vorhandensein von Montmorillonit in der Tonfraktion. Überraschend deshalb, weil Montmorillonit sehr empfindlich gegenüber der Diagenese reagiert und meist bereits vor Beginn der niedrigsten Metamorphose verschwindet. Im Gegensatz zu den Glimmern ist im Montmorillonit die Bindung zwischen den einzelnen Schichten des Kristallgitters sehr schwach. Beim Quellvorgang kann Wasser in variablen Mengen zwischen die Schichten eingelagert werden.

Resultate der röntgenographischen Untersuchungen

Montmorillonit ist als Mineral der Tonfraktion in der Zone von Tm 4265–4340 durchwegs in Konzentrationen von 5–20 Gew.%, maximal 50% vorhanden. Im Stollenteil, der von Tm N 4340 bis zum Schacht Hospental (Tm N 5085) folgt, lässt sich Montmorillonit nur noch in der Tonfraktion von lokalen verlehnten und zersetzten Schichten (Störungen) geringer Mächtigkeit nachweisen.

Im Gesamtgestein reicht der Anteil der Tonfraktion am Gestein in den meisten Fällen nicht aus, um Montmorillonit röntgenographisch nachzuweisen. Die Nachweisgrenze von 5 Gew.% wurde nur in drei der untersuchten 20 Proben erreicht.

In der Trias ist Anhydrit als weiteres quellbares Mineral nur in unbedeutenden Mengen vorhanden.

Im übrigen besteht die Tonfraktion in den Tonschiefern des Mesozoikums hauptsächlich aus phengitischem Muskovit, Chlorit und Margarit (siehe auch FREY et al. 1982). Im Permokarbon ist Muskovit der weit überwiegende Gemengteil neben dem als Übergemengteil noch Chlorit auftritt.

Beim Gesamtgestein ergaben die Analysen der Tonschieferproben aus dem Jura hauptsächlich Chlorit, Muskovit und Quarz sowie wenig Margarit und erstaunlich wenig Kalzit (2–9%). Eine Probe enthielt zudem 25% Dolomit. In den phyllitischen verlehnten Schiefern des Permokarbons sind Muskovit, Quarz und Plagioklas die Hauptgemengteile. Die Gesteine führen stellenweise etwas Kalzit und/oder Chlorit, in Einzelfällen zudem Kalifeldspat und Gips.

Zur Entstehung des Montmorillonites

Genetisch ist der Montmorillonit ein typisches Mineral der Verwitterung. Da er bereits beim niedrigsten Metamorphosegrad umgewandelt wird, muss er im Falle des Gotthard-Strassentunnels in einer späten Phase der Alpenbildung, am ehesten im Zuge der jungen längs der Trias sehr intensiven Bewegungen entstanden sein.

3.4 Kluftmineralien

Auf der Nordseite wurden die mineralführenden Klüfte durch den Mineralienaufseher des Kantons Uri ausgebeutet (LUSSMANN 1980). Auf der Südseite wurde diese Aufgabe von Dr. A. Simonetti in Zusammenarbeit mit der Bauleitung ausgeführt.

In der Praxis war jedoch nicht zu verhindern, dass Mineralklüfte auch durch die im Tunnel Beschäftigten ausgeräumt wurden und folglich reichlich Material in Privatsammlungen bzw. im Handel verschwand. Dem Naturhistorischen Museum in Bern gelang es eine Anzahl von Schaustücken käuflich zu erwerben. Im Berner Museum und im neu errichteten Mineralienmuseum im Schlösschen A Pro, Seedorf, sind die grössten öffentlich zugänglichen Sammlungen von Mineralien aus dem Strassentunnel zu finden.

Eine vollständige Liste der bis 1980 bekannt gewordenen Mineralparagenesen ist im Fundortverzeichnis von LUSSMANN (1980) enthalten.

Erwähnt seien einige geologisch-felsmechanische Zusammenhänge bei der Entstehung der Zerrklüfte. Im Aare-Granit sind zahlreiche und ergiebige mineralführende Zerrklüfte an die Anwesenheit von Lamprophyren gebunden. Der Granit riss häufig an der Grenze zu diesen plastisch verformbaren glimmerreichen Ganggesteinen auf, wobei der Lamprophyr oft gegen den entstehenden Hohlraum ausgebeult wurde (Figur 5a). Mechanisch handelt es sich um den gleichen Vorgang wie bei der Boudinage. Es kann deshalb von einseitiger Boudinage gesprochen werden.

Ebenfalls sehr reich an mineralführenden Zerrklüften sind die gebänderten Gneise im nördlichen Teil der südlichen Gneiszone des Aarmassivs. Der Grund ist auch hier im Wechsel von rigiden hellen feldspatreichen Gneisen und

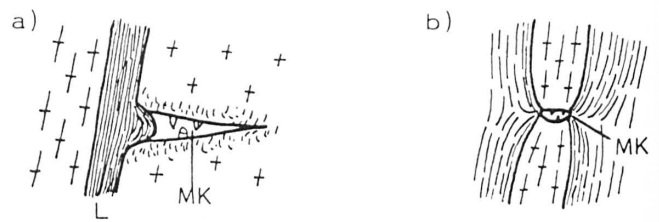


Fig. 5: Entstehung mineralführender Zerrklüfte (MK). Beim Wechsel von rigiden mit plastisch deformierbaren Gesteinen rissen die ersteren auf, die letzteren wurden teilweise in die Rupturen hineingepresst.

a) Lamprophyr L in Granit ("einseitige Boudinage")

b) Band von hellem feldspatreichem hartem Gneis in glimmerreichem dunklem weichem Gneis (Boudinage)

glimmerreichen Lagen oder Bänken zu suchen. Die hellen Gneise wurden häufig boudiniert, wobei an der Abschnürungsstelle eine Zerrkluft entstand (Figur 5b).

Als wenig ergiebig bezüglich mineralführender Klüfte erwiesen sich das Mesozoikum, der nördliche Teil des Permokarbons sowie der Gamsboden-Granitgneis.

Der von der Menge her spektakulärste Fund wurde auf der Südseite im Zugangsstollen zum Schacht Motto di Dentro gemacht. Aus einem 1–2 m weiten und 20 m langen Hohlraum wurden tonnenschwere Kalzitstufen geborgen.

3.5 Strukturen und Durchtrennung des Gebirgskörpers

Im Zuge der geologischen Tunnelaufnahmen wurden folgende Trennflächentypen unterschieden:

- Schieferungsflächen (Kristallin, Permokarbon) und Schichtung (Mesozoikum). Sie werden im folgenden z.T. unter dem Begriff s-Flächen zusammengefasst.
- Kluftflächen
- Ruschelzonen (Störungen, Harnischflächen).

S-Flächen und Kluftflächen durchtrennen den Gebirgskörper systematisch und stehen meist in enger gefügemässiger Beziehung zueinander. Bautechnisch spielen Lage, Häufigkeit, Durchtrennungsgrad und Ausbildung einer Trennfläche eine Rolle, die Genese dagegen nur, falls sie sich auf diese Faktoren auswirkt. Die in einer flächentreuen stereographischen Projektion (Schmidt'sches Netz) ermittelten Trennflächensysteme wurden aus diesem Grunde mit römischen Ziffern durchnummeriert, beginnend mit der alpinen Hauptschieferung als wichtigstem System. Die Mittelwerte (Tabelle 7, Seite 22) entsprechen statistisch der häufigsten Lage (grössten Dichte) und nicht dem arithmetischen Mittel der Einzelmessungen. Die Lage wird im folgenden durch die Angabe des Streichens über E und das Schichtfallen in ° (400°-Tlg.) fixiert.

Die Ruschelzonen sind an spät gebildete Einzelstörungen gebunden, stimmen aber lagemässig meist mit einem der Trennflächensysteme überein (Reaktivierung vorhandener Schwächezonen).

3.5.1 Systematische Durchtrennung

Alpine Hauptschieferung

Die alpinen Hauptschieferungsflächen sind in allen Serien vorhanden und auch aufgrund von Durchtrennungsgrad und Häufigkeit das geotechnisch weitaus wichtigste Trennflächensystem (System I). Die s-Flächen weisen meist einen Glimmerbelag auf. Feinschuppiger Muskovit (Serizit) dominiert. Im Permokarbon kann der Mineralbelag aus Chlorit und Serizit bestehen; ausnahmsweise konnten in dieser Serie auch gipsbelegte Schieferungsflächen beobachtet werden (z.B. Tm N 4720 des Sicherheitsstollens).

Die nicht deformierten Mineralbeläge zeigen, dass die Schieferungsflächen vor und während der alpinen Metamorphose entstanden (syn- bis postkinematische Metamorphose). Die Richtung der Hauptschieferung stimmt mit der Richtung der grössten stetigen Verformung während der alpinen Gebirgsbildung überein, wie anhand der Plättung von Schollen im Aare-Granit zu erkennen ist (Figur 6c, Seite 24).

Erhaltene und als solche eindeutig zu erkennende voralpine, d.h. herzynische s-Flächen sind im Bereich des Strassentunnels selten. Die Parallelität von herzynischer Stoffbänderung in den Massiven sowie Lamprophyrgängen mit der alpinen Schieferung zeigt, dass bei der mechanischen Beanspruchung während der Alpenbildung mindestens teilweise die palaeozoisch angelegten Strukturen als Deformationsrichtung übernommen wurden. Nur an wenigen Stellen schneidet die alpine Schieferung die herzynische Stoffbänderung diskordant ab (südliche Gneiszone Tm N 3490–3600 des Sicherheitsstollens).

Die s-Flächen stehen durchwegs steil und streichen WSW-ENE. Sie fallen im Aar-Massiv, in der Urseren-Zone und im nördlichen Gotthard-Massiv vorwiegend steil gegen Süden ein. Im mittleren und südlichen Gotthard-Massiv ist dagegen das Einfallen gegen Norden gerichtet, so dass eine Art Fächerstruktur entsteht (siehe Anhang 3).

Auf den Schieferungsflächen sind häufig bis zu 2 Lineationen zu beobachten, so z.B. im Aare-Granit:

- eine steil südfallende Wellung der Glimmerhäute
 - eine gröbere flachwellige Runzelung
- oder gut ausgeprägt im Permokarbon:
- eine mit 10–30° ostfallende feine Runzelung
 - eine mit 80–90° westfallende Mineralelongation.

Eine Glimmerregelung um die steilachsige Lineation oder eine Mineralstreckung längs dieser Lineation ist in allen Gesteinen inklusive Granite vorhanden. Die Lage der s-Flächen selbst pendelt ebenfalls um eine steile Achse (konstruierte B-Achse in Tabelle 7, Seite 22), die mit der Lineation übereinstimmt.

Falten sind eher selten zu beobachten. Im mesoskopischen Bereich intensiv z.T. wirr knäuelig verfaltet ist der Jura der Urseren-Zone. Die beobachteten Faltenachsen divergieren zwar stark, doch herrschen flach gegen Nordosten einfallende Achsen vor. In den Paragneisen und im Permokarbon ist

streckenweise eine Kleinfältelung um eine steile Achse vorhanden. Ferner weisen die Serizitschiefer bis Phyllite des Permokarbons oft eine Knitterfältelung mit mm- bis cm-Amplituden auf.

Während Gneise und Schiefer regelmässig in mm- bis dm-Abständen von Schieferungsflächen durchsetzt werden, erfolgt die Verschieferung granitischer Gesteine selektiv. Intensiv mit s-Flächen durchsetzte Abschnitte können mit massigen Strecken wechseln. Während z.B. im massigen Aare-Granit diskrete Schieferungsflächen als Trennflächen vorhanden sind, können im gleichen Gestein homogene gneisige Typen wenig echte Trennflächen aufweisen.

Wie das geologische Befundprofil (Anhang 3) zeigt, ist die kleinräumige Konkordanz von Stoffgrenzen und alpiner Schieferung – grossräumig gesehen – nicht immer vorhanden. Die Hauptschieferung verläuft an verschiedenen Stellen diskordant zu einer Grenzfläche (südliche Gneiszone/Mesozoikum; Gamsboden-Granitgneis/Guspis-Zone).

Übrige Trennflächensysteme

Die Lage der verschiedenen Trennflächensysteme geht aus der Tabelle 7, Seite 22, hervor. Die steilstehenden Systeme II und III gehören dem gleichen Zonenkreis wie die Hauptschieferung (System I) an. Das System III streicht zudem ungefähr senkrecht zur Schieferung. Eine weitere bevorzugte Lage bezüglich der Gefügekoordinaten nimmt das flachliegende System IV ein. Es steht ebenfalls senkrecht auf S und zudem mehr oder weniger senkrecht auf der B-Achse (sogenannte ac-Klüfte). Längs diesem System fanden vereinzelt sehr späte subhorizontale Bewegungen statt, die alle übrigen Strukturen versetzen.

Ganz allgemein fällt auf, dass im Aar-Massiv beinahe ausschliesslich steile und flache Trennflächenlagen vorhanden sind. In den südlich anschliessenden Serien streuen die Trennflächen dagegen lagemässig stärker und fallen zudem häufig mittelsteil ein.

In der Portalzone war der Aare-Granit intensiv nach dem System IV geklüftet, das hier nicht horizontal verläuft sondern mit 20–30° gegen NW geneigt ist. Diese Lage entspricht mehr oder weniger jener der Felsoberfläche. Die Scharung von Klüften dieses Systems im Portalbereich ist daher sehr wahrscheinlich auf eine Talkklüftung zurückzuführen, d.h. auf oberflächennahe Spannungsumlagerungen im Zusammenhang mit der Talbildung.

Die Art von allenfalls vorhandenen Mineralbelägen ist sowohl vom Trennflächensystem wie auch von der Gesteinsserie abhängig. Die Flächen der Systeme II weisen häufig einen Glimmerbelag auf. Sie entsprechen somit einer s-Fläche. Sie muss nach der alpinen Hauptschieferung entstanden sein, da sie diese durchschneidet (siehe auch STECK 1968). Die glatten Klüftflächen des Systems III sind oft fein mit Chlorit überzogen. In den Kalken des Juras sind die Klüftflächen häufig mit weissem Kalzit belegt, stellenweise auch vererzt (Pyrit). Kalzit war auch auf Klüftflächen des Gamsboden-Granitgneises verbreitet.

Tabelle 7 Lage, der Mittelwerte von Trennflächensystemen in Gefügediagrammen

Gesteinsserie	Aufnahmestrecke (Tm)		Trennflächensysteme, Lage der Mittelwerte (Streichen und Fallen in 9)					B-Achse (konstr.)
	Sicherheits- stollen	Tunnel	I*	II	III	IV	weitere	
Aare-Granit	ab Nordportal		56/93 SE 88/91 S 67/82 SE	110/89 S 120/89 S 91/87 S	153/98 SW 164/91 SW 168/91 W a) b)	44/27 NW 20/16 W		144/95 SE 17/89 S 136/80 SE
	82 - 400 930 - 1140 1900 - 2100	134 - 400 800 - 1200 1900 - 2100	46/93 SE	89/91 S a) b)	137/93 SW 172/90 SW a) b)	11/ 7 W		193/92 S
	2513 - 2600	-	64/80 SE a) b)	114/92 S 95/95 N	132/93 S 173/98 W a) b)	5/15 W	V	20/93 S
	2980 - 3040	-			149/100			
Südliche Gneiszone des Aar-Massivs	3250 - 3400 3800 - 4050	3250 - 3400 3800 - 4000	68/96 SE 69/96 SE	123/98 S 121/93 N	158/91 NE	178/13 W		89/87 E 122/93 E
	4048 - 4264 4264 - 4430 4800 - 5000	4069 - 4287 4287 - 4430 4800 - 4900	58/95 SE 59/96 SE 68/89 S	99/84 S 131/74 SW	168/83 SW 144/93 SW 147/88 SW	169/13 E 161/26 NE	VI 134/49 NE VII 41/87 NW VI 133/49 NE	B1 83/86 E B2 39/80 S 89/96 S 167/88 S 189/87 S
Paragneise des Gotthard-Massivs	5800 - 5950 6450 - 6550	5800 - 5950 6450 - 6550	69/78 SE	131/79 SW	174/70 W		VI 120/71 N VII 43/81 NW	189/78 S 136/78 SE
	6850 - 7000	6850 - 7000	58/84 SE	136/80 NE 138/89 NE	180/62 W			24/82 E
Gamsboden-Granit- gneis Nordteil	7100 - 7200 7800 - 8000	7100 - 7300 7800 - 8000	53/82 SE 52/78 SE	138/82 SW a) b) 139/82 NE 142/84 NE	183/64 W 158/47 SW		VI 114/65 N VII 76/78 N	182/80 S 139/78 SE
Gamsboden-Granit- gneis Südteil	ab Südportal		60/76 SE 62/83 SE	89/69 N	153/89 SW 160/80 SW			
	7000 - 8262 5377 - 7000	7000 - 7988 5376 - 7000	64/100	72/100		18/08 E		
	4483 - 5377	4475 - 5376	51/82 SE		180/94 W	100/44 S		
	3659 - 4483	3652 - 4475						
Guspis-Zone	4483 - 5377	4475 - 5376						
Fibbia-Granitgneis	3659 - 4483	3652 - 4475						
Rotondo-Granit **	3644 - 3659	3625 - 3652						
Sorescia-Gneis	3015 - 3644	3004 - 3625	26/87 NW	117/56 N	183/93 W			
Prato-Serie	2545 - 3015	2525 - 3004	53/83 NW		180/89 W	100/50 S		
Tremola-Serie	56 - 2545	35 - 2525	63/67 NW		162/83 W	87/50 S		

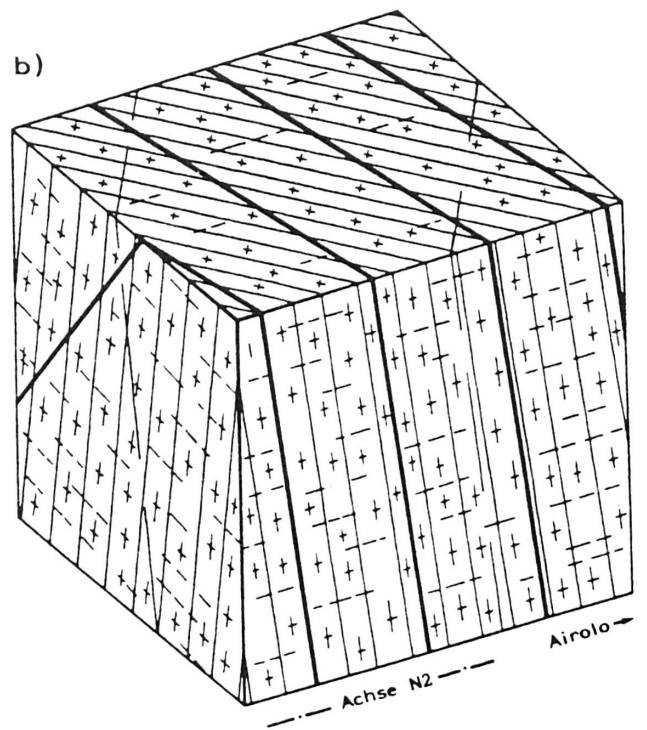
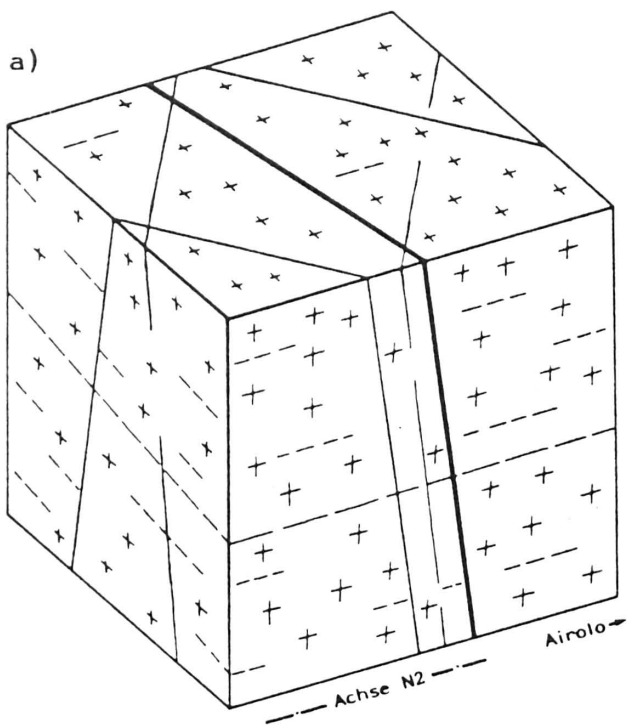
* Das System I entspricht der alpinen Hauptschieferung

** Statistisch ungenügende Datenmenge

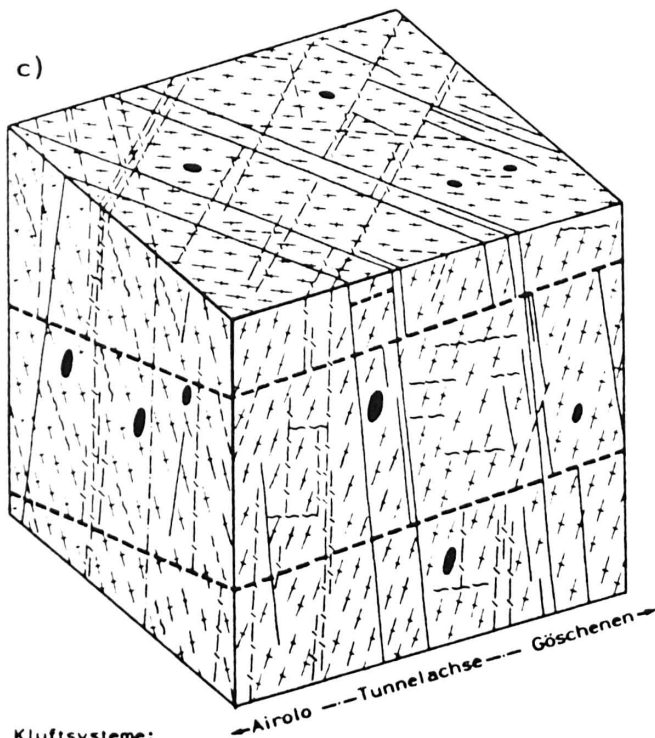
Tabelle 8 Vorherrschende systematische Durchtrennung des Felskörpers					
Gesteinsserie	s-Flächen (als Trennflächen) Bankung	d	Intensität*	Kluftflächen	
				d	Durchtrennungs-grad*
Aare-Granit flaserig-massig	grob gebankt - massig	0,5 - 10 m	gering - mittel	1 - 10 m	mittel - gross
gneisig	gebankt - grob gebankt	0,5 - 10 m	gering - mittel	0,5 - 10 m	mittel - gross
Südliche Gneiszone	plattig - gebankt	2 - 30 m	gering	0,5 - 10 m	klein - mittel
Mesozoikum Kalke	fein gebankt - plattig	5 - 20 cm	hoch	1 - 10 cm	sehr klein
Tonschiefer	schiefzig	mm - cm	gering	1 m	klein
Trias	massig	-	gering	-	-
Permokarbon	schiefzig - gebankt	mm - dm	gering	0,5 - 5 m	klein
Nördliche Paragneise	plattig - gebankt	5 - 40 cm	gering	1 - 5 m	klein - mittel
Gamsboden-Granitgneis	grob gebankt	1 - 10 m	mittel - hoch	0,2 - 3 m	mittel - gross
Guspis-Zone	schiefzig - plattig	mm - cm	sehr hoch	0,5 - 10 cm	klein
Fibbia-Granitgneis	grob gebankt	3 - 10 m	gering - mittel	2 - 10 m	mittel
Rotondo-Granit	massig	5 - 20 m	gering	5 - 20 m	klein
Sorescia-Gneis	plattig - gebankt	0,5 - 5 m	hoch	1 - 10 m	gross
Prato-Serie	schiefzig	cm - dm	mittel - hoch	0,5 - 3 m	mittel
Tremola-Serie	feinschiefrig	mm - cm	hoch	0,1 - 1 m	klein
Bemerkungen					
stark wechselnd, System II mit hohem Durchtrennungsgrad					
lokal Kluftscharen					
z.T. zuckerwürfelgrosse Kluftkörper					
Wechselagerung Kalk/Tonschiefer: brekziös unregelmässige Harnischflächen					
rigide helle Bänke kleinklüftig, lokal Kluftscharen					
lokal Kluftscharen					
stark wechselnd					
Knicke, lokal Verbiegungen					
regelmässig					
kompakt					
wechselhaft					
lokal Kluftscharen					

Durchtrennungsgrad
gross = Länge Ausbisslinie > 5 m
mittel = Länge Ausbisslinie 1 - 5 m
klein = Länge Ausbisslinie < 1 m

Intensität
hoch = regelmässige Klüftung mit Kluftflächenabständen < 0,5 m
mittel = Kluftflächenabstände 0,5 - 5 m, sporadisch Kluftscharen
gering = unregelmässig gestreute Kluftflächen



————— Kluftsystem II ————— Kluftsystem III
 ———— System I (= Schieferung) - - - - - Kluftsystem IV



Kluftsysteme:

- - - - - I - - - - - IIIb
 ———— II - - - - - IV ● Scholle
 - / - / - IIIa ~ ~ ~ ~ V

Fig. 6: Durchtrennung des Aare-Granites, schematische Darstellung
 des Gefüges und der Trennflächenverhältnisse
 a) massig bis flaseriger Granit, Bereich Kreuzung Bahntunnel
 b) gneisiger Granit, Bereich Kreuzung Bahntunnel
 c) gneisiger Granit, Bereich Tm 2980–3040

Durchtrennung des Felskörpers

Die vorherrschende systematische Durchtrennung des Felskörpers, wie sie sich aus den geologischen Aufnahmen ergab, ist in der Tabelle 8, Seite 23, zusammengestellt.

In allen Gesteinsserien der Massive tritt die Klüftung gegenüber der Schieferung deutlich zurück. Sie ist zudem anisotrop, indem die Ausdehnung der Klüfte in Richtung der Schieferung im allgemeinen um ein mehrfaches grösser ist als quer dazu. Durch die Schieferung werden die Gesteine intensiver und regelmässiger unterteilt, in den Schieferungsflächen in cm- bis dm- oder dm- bis m-Abständen.

In den herzynischen Graniten ist dies nicht der Fall. In diesen kann die Intensität der Durchtrennung auf kurze Distanz ändern. Drei Beispiele aus dem Aare-Granit zeigt die Figur 6, Seite 24. Detailuntersuchungen im Aare-Granit ergaben, dass wenig durchtrennte Bereiche und intensiv geklüftete Felspartien innerhalb des Dekameterbereiches einander ablösen können.

Vereinzelte wiesen jedoch 50–70 m lange Abschnitte überhaupt keine Trennflächen von Bedeutung auf. Die Homogenbereiche bezüglich der Durchtrennung des Felskörpers und damit auch bezüglich des felsmechanischen Verhaltens sind somit im Falle des Aare-Granites relativ klein. Die Untersuchungen zeigten ferner, dass selbst im grob geklüfteten Aare-Granit die Trennflächen mit kleinem Durchtrennungsgrad rein zahlenmässig dominieren.

3.5.2 Ruschelzonen und junge Störungen

Unter dem bautechnischen Begriff Ruschelzonen wurden bei den Tunnelaufnahmen alle Trennflächen zusammengefasst, längs denen postmetamorphe Bewegungen stattfanden. Der Bewegungsbetrag ist nebensächlich. Geotechnisch wichtig ist einzig, dass es sich um meist nicht verheilte durchgehende Störungen des Gesteinsverbandes handelt. Ihre Ausbildung reicht von mm-breiten Harnischflächen bis zu mehreren dm-breiten Zonen mit zerbrochenem Gestein. Sie ist stark vom Muttergestein abhängig. In Graniten besteht die Füllung z.T. nur aus Gesteinsbruchstücken, in den Serizitschiefern des Permokarbons dagegen praktisch immer aus Lehm. In der geologischen Nomenklatur würden die meisten Ruschelzonen in die Kategorie der Kakirite fallen, ein geringerer Teil kann den Myloniten zugeordnet werden.

Lagemässig gehört der weitaus grösste Teil der Ruschelzonen zu den Systemen I und II, wobei schieferungsparallele Störungen dominieren. Ganz offensichtlich wurden alte Kluftsysteme, Ruschelzonen (häufig verquarzt) oder petrographische Inhomogenitäten als bereits vorhandene mechanische Schwachstellen des Gebirges bei erneuter Beanspruchung als Bewegungszonen reaktiviert. Ein typisches Beispiel dafür sind die an glimmerreiche Lamprophyre gebundenen Ruschelzonen.

Ein Teil der nachmetamorphen Brüche, die zur Bildung der Ruschelzonen führten, steht vermutlich mit den späten

tektonischen Bewegungen im Zuge der Heraushebung der Massive in Zusammenhang. Als Hauptbewegungsfläche für die differentiellen Hebungsvorgänge kommt vor allem die sogenannte Rhein-Rhone-Linie in Frage (ECKARDT et al. 1983). Im Strassentunnel entspricht ihr wahrscheinlich die stark gestörte, montmorillonitführende Übergangszone Jura-Trias sowie der nördlichste Teil des Permokarbons mit den ebenfalls montmorillonitführenden verlehmtten Serizitschiefern bis Phylliten. Noch jünger sind die verschiedenen Orts festgestellten postglazialen Verwerfungen (JÄCKLI 1965, ECKARDT 1957, 1974). Wie weit diese Bewegungen noch anhalten und ob sie im Zusammenhang mit den durch eine Nachkontrolle der Präzisionsnivelements der Landestopographie festgestellten rezenten Hebungen im zentralen Alpenraum im Zusammenhang stehen, muss noch offen bleiben (JEANRICHARD 1972).

Störungen in Form von Ruschelzonen kommen in allen Gesteinsserien vor. Im Aare-Granit traten z.B. pro 100 m Strecke 1–3 schmale Ruschelzonen auf. Grössere Einzelstörungen sind dagegen seltener und machen sich erst südlich von Tm N 2000 bemerkbar.

Die *südliche Gneiszone* enthält zahlreiche schieferungsparallele verlehmtte Ruschelzonen, die bis zu 10–30 cm mächtig sind. Stärker verschiefert, mit zahlreichen verlehmtten Schieferungsfugen und bis zu 50 cm mächtigen verlehmtten schieferungsparallelen Ruschelzonen durchsetzt, sind die letzten 10–20 m vor der Südgrenze des Aar-Massivs.

Als *Grossstörung* können wie gesagt die verlehmtten Zonen beidseits der *Trias* aufgefasst werden, wobei der plastische Gips der Trias vermutlich ebenfalls durchbewegt wurde.

Im *Permokarbon* erscheint neben den steilstehenden Störungen der Systeme I und II ein neuer Typ von Störungen des Gesteinsverbandes. Die Schieferungsflächen biegen innerhalb einer scharf begrenzten Zone knickartig in eine anormale flachere Lage um (Figur 7, Seite 26). Die Kanten der Knickstellen verlaufen ungefähr parallel zur Achse der flach ostfallenden Lineation. Das Streichen der Schieferungsflächen innerhalb der Störungen verläuft ebenfalls anormal N-S. Daraus lässt sich die Relativverschiebung ableiten (südlicher Block relativ nach Osten geschoben). Das Gestein ist im Bereich derartiger Störungen z.T. vollständig entfestigt. Sie fallen vorwiegend mit 30–70° gegen Norden (Figur 7b), seltener mittelsteil gegen Süden (Figur 7a) ein. Ausser im Permokarbon konnten gleichartige Störungen in den Paragneisen des Gotthard-Massivs beobachtet werden.

In den *nördlichen Paragneisen* des Gotthard-Massivs enthalten die breiteren Störungen bis zu 50 cm weiches verlehmttes Gestein. Sie verlaufen mit einer Ausnahme durchwegs schieferungsparallel. Die Ausnahme betrifft eine mittelsteil ESE-fallende 1,5–5 m mächtige Zone mit entfestigtem Gestein und anormaler s-Flächenlage (Tm N 5971 des Sicherheitsstollens resp. 6307–6309 des Tunnels).

Auch im *Gamsboden-Granitgneis* streichen auf der Nordseite sämtliche der bis zu 3 m mächtigen Störzonen parallel zur Schieferung. Sie sind oft mit dem Vorhandensein verschiefer-

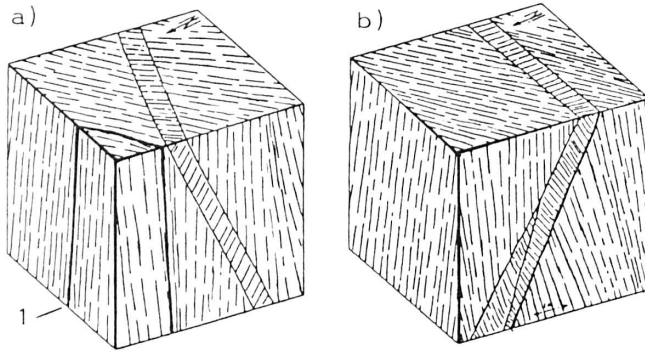


Fig. 7: Knickartige Verstellung der Schieferungsflächen im Permo-karbon des Sicherheitsstollens

- a) Steil südfallende 60–80 cm breite Störzone bei Tm N 4624 (132/72° S) mit Verstellung der Schieferungsflächen innerhalb der Störzone 1 = verlehnte Ruschelzone 67/98° S
b) Nordfallende Störzone bei Tm N 4671 (125/70° N)

ter Lamprophyre verknüpft. Im südlichen Teil, erstmals bei Tm S 7410, treten mit zunehmender Häufigkeit Ruschelzonen auf, welche die s-Flächen diskordant durchschlagen. Sie stehen in der Regel sehr steil und streichen \pm West-Ost. Gelegentlich sind diese Zonen und ihr Nebengestein wasser-

führend. Bei Tm S 5780 wurde im Sicherheitsstollen eine vermutlich hydrothermal ausgelaugte Zone von 15 m Mächtigkeit angefahren, die auf ihrer Nordseite von einem steilstehenden Kakirit begrenzt wird. Im Strassentunnel, der auch hier nur 30 m neben dem Sicherheitsstollen verläuft (!), wurde die Zone nicht angetroffen (siehe dazu Abschnitt 5.3.3, Seite 37).

Die *Guspis-Zone* enthält nur wenige ausgeprägte Ruschelzonen, da auf den Schieferungsflächen genügend grosse Relativbewegungen möglich waren. Die Schieferungsflächen sind gelegentlich kleinräumig gefaltet bzw. geschleppt.

Im *Fibbia-Granitgneis* kommen wenige, stets ziemlich flach nach S einfallende grössere Störungen vor. Sie folgen in der Regel nicht den Aplit- oder Lamprophyrgängen.

Im *Sorescia-Gneis* und in der *Tremola-Serie* finden sich häufig meist geringmächtige junge Störungen. Diese sind in der Regel durchgehend zwischen Sicherheitsstollen und Strassentunnel. Überwiegend fallen sie steil nach S ein, doch ist auch Nordfallen parallel zur Schieferung oft zu beobachten.

4. PROGNOSE UND BEFUND

4.1 Übersicht

Aus der Zeit des Variantenstudiums für eine wintersichere Verbindung durch den Gotthard lagen umfangreiche generelle geologische Beurteilungen vor (1963 vom EDI publiziert). Eine spezielle Geologie des Bauprojektes für die zur Ausführung gelangende Projektvariante des Gotthard-Strassentunnels wurde deshalb nicht verfasst. Den Submittenten wurden als geologische Information einzig die von Dr. R.U. Winterhalter, Dr. T.R. Schneider und Prof. Dr. E. Dal Vesco ausgearbeiteten kurzen Beschreibungen jeder Variante zur Verfügung gestellt. Diese enthielten eine Zusammenfassung der früheren Untersuchungen in Form von kurzen petrographischen Erläuterungen, einem geologischen Längsprofil und einem Horizontalschnitt. Weitere Beilagen befassten sich speziell mit den beiden Portalzonen.

Grössere Abweichungen sowohl bezüglich des petrographischen Inhaltes wie auch der Lage der Gesteinsgrenzen waren aus folgenden Gründen nicht zu erwarten:

- Der unsichere Verlauf der Felsoberfläche bei den Portalen war mit Sondierbohrungen abgetastet worden.
- Die wichtigsten Grenzflächen zwischen den Gesteinsserien stehen nahezu vertikal und sind nicht verfaltet, d.h. sie lassen sich mit relativ grosser Genauigkeit in die Tiefe projizieren.
- Mit dem unweit östlich durchziehenden Bahntunnel sind die oberflächlich schlecht aufgeschlossenen Serien des Mesozoikums und des Permokarbons der Urseren-Zone vollständig aufgeschlossen worden.

Der rein wahrscheinlichkeitstheoretische Fehler bei der Extrapolation einer Grenzfläche von der Oberfläche in die Tiefe wächst mit steigender Überlagerung und abnehmendem Fallwinkel. Aus diesem Grunde liegen auch die grösseren Abweichungen im Südteil des Gotthard-Massivs noch innerhalb der mathematischen Fehlergrenze. Ausserhalb dieser liegen dagegen folgende Schichtgrenzen:

- Lockergestein/Fels der nördlichen Portalzone
- nördliche Paragneise/Gamsboden-Granitgneis
- beidseitige Begrenzung der Guspis-Zone

Eine weitere Abweichung des Befundprofils vom Prognoseprofil betrifft eine nomenklatorische Frage. Die Serie der Serizitschiefer des Prognoseprofils wurde im Befundprofil aufgrund einer geologischen Neubeurteilung vollständig dem Permokarbon zugeordnet. Am petrographischen Inhalt und der geotechnischen Beurteilung der entsprechenden Gesteinszone ändert diese Neuordnung nichts.

Wie aus der Tabelle 9, Seite 28, hervorgeht, weichen die Streckenlängen des Befundes im Sicherheitsstollen und Tunnel im allgemeinen wenig von der Prognose ab. Geotechnisch am stärksten ins Gewicht fiel der beträchtlich grössere Anteil der eher ungünstigen Gesteine der Guspis-Zone. In Bezug auf den Gesteinsinhalt, d.h. die petrographische Zusammensetzung, waren, wie zu erwarten war, wenige, sich zudem im allgemeinen geotechnisch vorwiegend positiv auswirkende Abweichungen festzustellen. Im folgenden wird auf die wichtigsten kurz eingegangen.

4.2 Abweichungen des Befundes von der Prognose

Lockergesteinsstrecke und Felsoberfläche beim Nordportal

Die Länge und Zusammensetzung der mit dem Tunnel zu durchfahrenden Lockergesteine war vorgängig mit 3 Sondierbohrungen erkundet worden. Andere als die prognostizierten Lockergesteinstypen sind aus diesem Grunde beim Vortrieb nicht angetroffen worden. Dagegen wurde der Lockergesteinsvortrieb nicht wie prognostiziert 103 m sondern 135 m lang. Dies hat hauptsächlich zwei Gründe:

- Der Nullpunkt der Baumetriierung liegt am Fuss der Böschung und ausserhalb des Beginns des bergmännischen Vortriebs. Dieser beschränkt sich auf eine Strecke von 122 m.
- Die Linienführung des definitiven Projektes wurde aus verkehrstechnischen Gründen gegenüber jener der Ausschreibungsunterlagen geändert. Der Tunnel stösst dadurch nicht wie ursprünglich geplant – und in der Prognose angenommen – senkrecht, sondern schief auf die Felsoberfläche. Die Felsoberfläche blieb dementsprechend statt wie vorhergesehen während 12 m auf 46 m Länge im Profil.

Hydrothermal zersetzter Aare-Granit

Das Anfahren des hydrothermal zersetzten Granites zwischen Tm N 2293 und 2325 darf als echte geologische Überraschung gelten. An der Oberfläche sind derartige verwitterungsanfällige weiche Gesteine normalerweise nicht aufgeschlossen. In Untertagebauten waren sie in den schweizerischen Zentralmassiven vor dem Bau des Strassentunnels in diesem Ausmass unbekannt.

Tabelle 9 Vergleich Prognose – Befund bezüglich der Gesteinsserien

l = Streckenlänge (m)
 % = prozentualer Anteil
 Δ = Differenz Befund-Prognose in m (in () in % der Tunnellänge)

GESTEINS-SERIE	PROGNOSE**			BEFUND					
	Strecke Tm	l	%	Sicherheitsstollen			Tunnel		
				Strecke Tm	l	%	Strecke Tm	l	%
Nordseite	Tm N			Tm N			Tm N		
Lockergestein	0 – 103	103	0,6	-12 – 82	94	0,6	0 – 135	135	0,5
Aare-Granit	103 – 3173	3070	18,9	82 – 3217	3135	19,2	135 – 3238	3103	19,0
Südliche Gneiszone des Aar-Massivs	3173 – 4103	930	5,7	3217 – 4048	831	5,1	3238 – 4069	831	5,1
Mesozoikum	4103 – 4293	190	1,2	4048 – 4264	216	1,3	4069 – 4287	218	1,3
Permokarbon, total	4293 – 5633	(1340)	(8,3)	4264 – 5698	1434	8,8	4287 – 5712	1425	8,7
Permokarbon Prognoseprofil (= Nördlicher Teil des Permokarbons)	4293 – 5008	715	4,4	(4264 – 5064)	(800)	(4,9)	(4287 – 5099)	(812)	(5,0)
Serizitschiefer Prognoseprofil (= Südlicher Teil des Permokarbons)	5008 – 5633	625	3,9	(5064 – 5698)	(634)	(3,9)	(5099 – 5712)	(613)	(3,7)
Paragneise Gottshard-Massiv	5633 – 6793	1160	7,1	5698 – 7070	1372	8,4	5712 – 7102	1390	8,5
Gamsboden-Granitgneis (Nordseite)	6793 – 8170	(1377)	(8,5)	7070 – 8009	(939)	-	7102 – 8283	(1181)	-
Gamsboden-Granitgneis total		4343	26,7		3824	23,4		3793	23,2
Südseite	Tm S			Tm S			Tm S		
Gamsboden-Granitgneis (Südseite)	5127 – 8093	(2966)	(18,2)	5377 – 8262	(2885)	-	5376 – 7988	(2612)	-
Guspis-Zone	4897 – 5127	230	1,4	4483 – 5377	89,4	5,5	4475 – 5376	901	5,5
Fibbia-Granitgneis	3517 – 4897	1380	8,5	3659 – 4483	824	5,0	3652 – 4475	823	5,0
Rotondo-Granit	-	-	-	3644 – 3659 } 3543 – 3596 }	68	0,4	3625 – 3652 } 3511 – 3583 }	99	0,6
Sorescia-Gneis	2927 – 3517	590	3,6	3596 – 3644 } 3015 – 3543 }	576	3,5	3583 – 3625 } 3004 – 3511 }	549	3,4
Prato-Serie	94 – 2927	2833	17,4	56 – 3015	2959	18,1	35 – 3004	2969	18,1
Tremola-Serie				(-60) – 56	116	0,7	(-92) – 35	127	0,8
Trias + Lockergest.	0 – 94	94	0,6						
Total		16263**	100,0		16343**	100,0		16363**	100,0
						+80 (0,0)			+100 (0,0)

* Schacht Guspisbach im Prognoseprofil bei Tm 8170

** Tunnelprofil gemäss Ausschreibungsunterlagen Plan Nr. 60 004 A
Trassierung von ausgeführtem Projekt leicht abweichend

Trias

In der Trias wurde anstelle der in den Ausschreibungsunterlagen erwähnten kavernen bautechnisch ungünstigen Rauhwacke vorwiegend standfester Gips angetroffen.

Permokarbon und Serizitschiefer

Der augenfälligste Unterschied zwischen Prognose- und Befundprofil betrifft die Serie der Serizitschiefer. Er ist allerdings rein nomenklatorischer Natur.

Die Ausscheidung einer Serie der Serizitschiefer zwischen dem Permokarbon und den Paragneisen des Gotthard-Massivs geht auf die unterschiedliche Beurteilung durch die verschiedenen Bearbeiter der Urseren-Zone zurück. Das Vorkommen eines schwarzen Schiefers an der Oberalpstrasse bei Andermatt wurde von FEHR (1926) ins Karbon gestellt und die südlich anschliessenden Serien als "Paragneise des äusseren Kontakt-hofes" bereits dem Gotthard-Massiv zugerechnet. AMBÜHL (1929) stellte mit Recht fest, dass das Alter der schwarzen Schiefer unsicher ist. Er schied zwischen Mesozoikum und Paragneisen des Gotthard-Massivs nur eine einzige Zone von Permokarbon aus. Seine Beurteilung wurde durch den Befund im Strassentunnel bestätigt. Schwarze Schiefer, die sich ins Karbon stellen liessen, wurden keine durchörtert. Das Gotthard-Massiv beginnt dort, wo Anzeichen für eine herzynische (= oberkarbonische) Metamorphose bestehen. Alle darüber abgelagerten Sedimente gehören geologisch-stratigraphisch ins Permokarbon.

In der Prognose wurde dem Problem der tektonischen Zuordnung ausgewichen, indem eine separate geotechnisch homogene Serie der "Serizitschiefer" ausgeschieden wurde. Die Tunnelaufnahmen haben gezeigt, dass die Unterteilung der Prognose in Permokarbon und Serizitschiefer sich weitgehend mit der Unterteilung in einen nördlichen monotonen psammitisch-psephitischen Teil und einen südlichen wechselvolleren teilweise vulkanogenen Teil des Permokarbons deckt. In der Tabelle 9, Seite 28, ermöglichte diese Tatsache einen direkten Vergleich der Längenteile in Prognose und Befund.

Nicht angetroffen wurden im Permokarbon das vorsorglich aus geotechnischen Gründen ins Prognoseprofil aufgenommene anderweitig vorkommende Marmorband.

Nördliche Paragneis-Zone

Aufgrund der oberhalb des Strassentunnels vorhandenen Serpentinorkommen, die bei Kämmleten (Steinbruch) aufgeschlossen sind und einer 440 m langen Serpentinstrasse im Gotthard-Bahntunnel musste auch im Strassentunnel mit dem Anfahren von geotechnisch ungünstigem Serpentin gerechnet werden. Glücklicherweise blieben diese Gesteine auf kleine linsenförmige Vorkommen im Sicherheitsstollen beschränkt.

Der Tunnelvortrieb durchstoss die Nordgrenze des Gamsboden-Granitgneises 309 m weiter südlich als im Prognoseprofil angegeben. Zu einem geringeren Teil (130 m) verursachte eine 60 m weiter westlich durchziehende Linienführung des ausgeführten Tunnels die Abweichung. Die restlichen beinahe 200 m der Abweichung sind darauf zurückzuführen, dass die Grenzfläche nicht wie angenommen mit 91° sondern mit 75° gegen Süden einfällt.

Gamsboden-Granitgneis

Die Tunnelstrecke im Gamsboden-Granitgneis ist rund 550 m kürzer als erwartet. 300 m Abweichung ergeben sich aus dem vorstehend erwähnten, flacheren Einfallen der Nordgrenze. Die restliche Abweichung (ca. 250 m) geht zu Lasten der Guspis-Zone, was nachstehend begründet wird.

Guspis-Zone

Die Guspis-Zone ist rund 670 m länger als erwartet. Da diese Zone, zwischen den Granitstöcken der Fibbia und des Gamsboden eingeklemmt, an der Oberfläche gegen W sehr schmal wird, war zu erwarten, dass sie auch mit zunehmender Tiefe geringmächtiger wird. Die grosstektonische Interpretation des Gotthard-Massivs lässt den Schluss ebenfalls zu, dass die Guspis-Zone gegen unten auskeilt. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die im Tunnel angetroffene Mächtigkeit ziemlich genau jener an der Terrainoberfläche entspricht, dass somit auf Tunnelniveau noch keine Mächtigkeitsreduktion festzustellen ist.

Fibbia-Granitgneis und Rotondo-Granit

Es wurde wesentlich weniger Fibbia-Granitgneis und Rotondo-Granit angetroffen als erwartet. Knapp 450 m Abweichung resultieren aus der grösseren Mächtigkeit der nördlich anschliessenden Guspis-Zone. Die restliche Differenz von 70 m ist darauf zurückzuführen, dass im Prognoseprofil der Rotondo-Granit nicht separat aufgeführt ist und vermutlich stillschweigend dem Fibbia-Granit zugeschlagen wurde. Geringmächtige Granitzüge zwischen Tm S 3500 und 3700 wurden jedoch eindeutig als Rotondo-Granit identifiziert.

Tremola-Serie

Das Prognoseprofil fasst die Prato-Serie mit der Tremola-Serie zusammen. Die Nordgrenze wurde wenig weiter nördlich angetroffen als erwartet. Die Abweichung liegt jedoch innerhalb der zu erwartenden Prognosestrebweite.

5. GEOTECHNIK

5.1 Einleitung

5.1.1 Übersicht

Das Kapitel "Geotechnik" befasst sich vor allem mit der Standfestigkeit und Masshaltigkeit der durchörterten Gesteine und den daraus resultierenden Sicherungsmassnahmen. Aufgrund des Sicherungsaufwandes und des Ausmasses der Störung der Vortriebsarbeiten wurden die einzelnen Strecken den verschiedenen Ausbruchsklassen zugeteilt, die ihrerseits die Basis für die Abrechnung der Ausbruchsarbeiten bilden. Nicht eingegangen wird auf die ganze Polemik, die – vor allem auf der Nordseite – zwischen Bauleitung resp. Bauherr und Unternehmung entstand, als die letztere versuchte für die nicht erreichten Leistungen und die dadurch entstandenen Verluste "geologische Schwierigkeiten" verantwortlich zu machen. Allerdings lässt sich nicht ganz vermeiden, dass auf gewisse damals diskutierte Punkte, wie z. B. die Mesozoikums-Strecke und den Vergleich Prognose-Befund etwas ausführlicher eingegangen wird.

Im folgenden wird das allgemeine geotechnische Verhalten der Gesteinsserien beschrieben. Alle speziellen geotechnischen Probleme werden anschliessend separat behandelt. In einem eigenen Abschnitt sind die Resultate der felsmechanischen Versuche zusammengefasst. Zum Schluss wird auf die Ausbruchsklassenverteilung und den Vergleich Prognose-Befund eingegangen. Die geologisch-geotechnisch wichtigsten Daten sind in den beiden Horizontalschnitten für den Nordteil (Anhang 4a) und den Südteil (Anhang 4b) zusammenfassend dargestellt.

Wie sich der Grössenunterschied zwischen Sicherheitsstollen und Tunnel auf die notwendigen Felssicherungen und damit auch auf die Ausbruchsklassen auswirkt, wurde von SCHNEIDER (1980) beschrieben.

Im folgenden werden zuerst einige geologische Einflussfaktoren angeführt, die sich in allen Gesteinsserien gleichartig auswirkten.

5.1.2 Geologische Einflussfaktoren

Der Strassentunnel durchfährt vorwiegend feste Gesteine. Das geotechnische Verhalten dieser Gesteine wird weitgehend von der Durchtrennung des Gebirgskörpers und der Lage der Trennflächen bezüglich des Tunnels bestimmt. Das wichtigste Trennflächensystem, die Schieferung, verläuft – wie die Horizontalschnitte im Anhang 4 zeigen – günstig. Der

Schnittwinkel mit der Tunnelachse beträgt vorwiegend 45 – 100° und die Flächen stehen steil. Auch die meisten der übrigen Trennflächensysteme stehen steil. Flache bis mittelsteile Klüftflächen waren nicht sehr häufig, wirkten sich jedoch im Firstbereich ungünstig aus. Flache Klüfte in Kombination mit steilen Trennflächen oder Störungen waren an allen Niederbrüchen von Gesteinspaketen beteiligt (Sargdeckel), die zu Unfällen führten.

Abgesehen von ungünstigen Trennflächenverschnidungen wirkten sich drei Faktoren unabhängig von der Gesteinsserie geotechnisch negativ aus:

- Junge postmetamorphe Störungen resp. die daraus resultierenden Ruschelzonen
- Verschiefterte Lamprophyre
- Quarzlinzen.

Junge Störungen, Ruschelzonen

Die nach Abschluss der Metamorphose entstandenen und deshalb nicht verheilten einige mm bis mehrere dm breiten Ruschelzonen bestehen aus zerbrochenem Gestein und lehmiger oder fehlender Matrix. Im ersten Fall besitzen sie eine geringe, im zweiten Fall unter Umständen überhaupt keine Kohäsion. Schwach verlehmtete Ruschelzonen sind ausserdem oft wasserführend. Günstig wirkt sich die Lage bezüglich des Tunnels aus. Die meisten Störungen stehen steil und verlaufen querschlägig bis stumpfwinklig zum Tunnel. So kam es beim Anfahren von Ruschelzonen in den meisten Fällen höchstens zu kleinen Niederbrüchen oder zur Ausbildung schlitzförmiger Kamine.

Lamprophyre

Dünnschiefrige sich am Rande seifig anfühlende Lamprophyre besitzen eine stark herabgesetzte Festigkeit, die im Falle einer Durchnässung noch zusätzlich reduziert ist. Das angrenzende Nebengestein war häufig durchnässt, weil es oft stärker zerbrochen und damit klüftiger und durchlässiger ist als die weitere Umgebung. Lamprophyre waren nicht nur im Strassentunnel sondern auch im später ausgebrochenen Furkatunnel die Ursache von Niederbrüchen (KELLER & SCHNEIDER 1982).

Günstig wirkte sich im Falle des Gotthard-Strassentunnels der vorwiegend stumpfwinklige Schnittwinkel zwischen Lamprophyren und Tunnelachse aus (Figur 8, Seite 31).

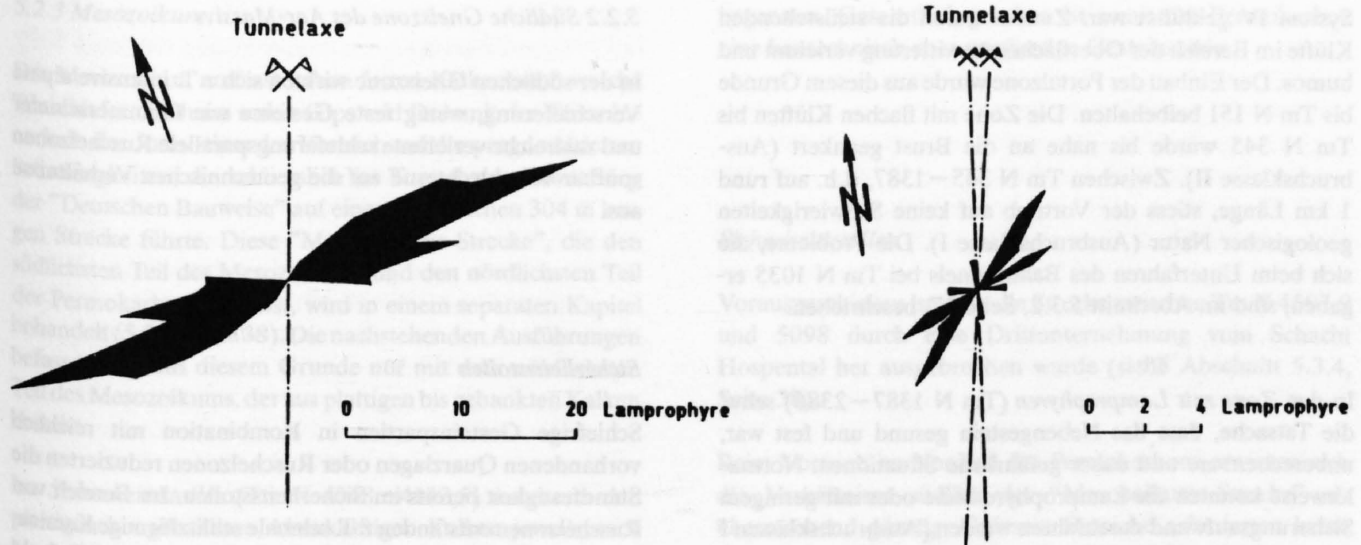


Fig. 8: Lage der Lamprophyre bezüglich der Tunnelachse (Häufigkeit der Streichrichtungen). Links im Aare-Granit, rechtes im Gamsboden-Granitgneis.

Quarzlinsen

Quarzlinsen kommen in allen Gesteinsserien vor, wirkten sich jedoch nur in den glimmerreicheren Gesteinstypen ungünstig aus, d.h. in den Paragneisen beider Massive, dem Permokarbon und den Tonschiefern des Juras. Bei der Bildung der Quarzlinsen durch metamorphe Differentiation entstanden glimmerreiche weiche Randzonen. Diese wurden bei mechanischer Beanspruchung in eine verlehnte schmierige Randzone umgewandelt, während der spröde Quarz im Innern der Linsen zertrümmert wurde. Proben aus Quarzlinsen konnten aus diesem Grunde teilweise von Hand zu Sand oder sogar zu Pulver zerrieben werden.

5.2 Geotechnische Verhältnisse in den einzelnen Gesteinsserien

Bei den im Text erwähnten Ausbruchsklassen handelt es sich um die effektiven, nach dem Sicherungsaufwand definierten Ausbruchsklassen gemäss Anhang 2.

5.2.1 Aare-Granit

Der Aare-Granit ist an und für sich ein bautechnisch sehr günstiges festes Gestein. In massigen Partien ereigneten sich streckenweise bergschlagartige Ablösungen auf die im Abschnitt 5.3.5, Seite 43, näher eingegangen wird. Negativ auf die Standfestigkeit des Aare-Granites wirkten sich vor allem Lamprophyre aus. Sie hatten verschiedentlich Kaminbildungen oder sogar Niederbrüche zur Folge. Die dunklen schieferigen Gänge sind auf den mittleren Teil der Aare-Granitstrecke beschränkt, so dass innerhalb des Aare-Granites ein geotechnischer Homogenbereich mit Lamprophyren ausgeschieden werden konnte (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10 Geotechnische Homogenbereiche im Aare-Granit		
Sicherheitsstollen (Tm N)	Tunnel (Tm N)	Beschreibung
82 - 1366	135 - 1387	vorwiegend massig-flaseriger Granit
1366 - 2375	1287 - 2386	Zone mit Lamprophyren
2375 - 3217	2386 - 3238	vorwiegend gneisiger Granit

Die Störungen in Form von Ruchelzonen sind im Aare-Granit vorwiegend schmal (1–10 cm) und traten, da sie beinahe immer von gesundem Granit begleitet sind, geotechnisch wenig in Erscheinung.

Sicherheitsstollen

Im nur 2,6 m breiten Sicherheitsstollen wirkten sich weder die Störungen noch die Lamprophyre soweit aus, dass sie einen zusätzlichen Sicherungsaufwand erforderten. Auf der ganzen mehr als 3000 m langen Strecke im Aare-Granit beschränkten sich die Sicherungsmassnahmen auf kurze Strecken mit Ankern oder Gunit (Ausbruchsklasse II) auf den ersten 457 m. Auf der ganzen restlichen Strecke konnte auf jegliche Sicherheitsmassnahme verzichtet werden (Ausbruchsklasse I).

Tunnel

Im 11 m breiten Tunnel bestand eher die Möglichkeit zu kritischen, die Standfestigkeit beeinträchtigenden Verschneidungen von Lamprophyren mit ungünstigen Trennflächen innerhalb des Ausbruchsprofils.

In der Zone mit vorwiegend *massig flaserigem Granit* (Tm N 135–1387) erforderte einzig der auf die Felsoberfläche folgende Abschnitt einen höheren Sicherungsaufwand. Es wurde bereits erwähnt, dass der Aare-Granit unterhalb der Felsoberfläche intensiv nach dem flach nordwestfallenden

System IV geklüftet war. Zudem waren die steilstehenden Klüfte im Bereich der Oberflächenverwitterung verlehmt und humos. Der Einbau der Portalzone wurde aus diesem Grunde bis Tm N 151 beibehalten. Die Zone mit flachen Klüften bis Tm N 345 wurde bis nahe an die Brust geankert (Ausbruchsklasse II). Zwischen Tm N 345–1387, d.h. auf rund 1 km Länge, stiess der Vortrieb auf keine Schwierigkeiten geologischer Natur (Ausbruchsklasse I). Die Probleme, die sich beim Unterfahren des Bahntunnels bei Tm N 1035 ergaben, sind im Abschnitt 5.3.2, Seite 37, beschrieben.

In der *Zone mit Lamprophyren* (Tm N 1387–2386) schuf die Tatsache, dass das Nebengestein gesund und fest war, unberechenbare und daher gefährliche Situationen. Normalerweise konnten die Lamprophyre ohne oder mit geringem Sicherungsaufwand durchfahren werden (Ausbruchsklassen I + II), vor allem weil sich deren querschlägiger Verlauf günstig auswirkte (Figur 8, Seite 31). Nachdem ab Tm N 1387 über ein Dutzend Lamprophyre ohne spezielle Vorkommnisse durchfahren worden waren, ereignete sich bei Tm N 1986 ein schwerer Unfall infolge einer nicht vorhersehbaren Verschneidung zwischen einem schiefrigen durchnässten Lamprophyr und einer ungünstig liegenden unsystematischen Trennfläche. Bei der vorhandenen groben Klüftung des Granites bestand auch in der noch aufzufahrenden Strecke das Risiko, dass zufällig ungünstig orientierte Trennflächen angefahren und grobblockige Massen niederbrechen würden. Um jedes derartige Risiko auszuschliessen, erging nach dem Unfall die Weisung an die Unternehmung, künftig alle Strecken mit Lamprophyren im Tunnelprofil einzubauen. Zudem wurden 2 Strecken im rückwärtigen Bereich nach rund 6 Monaten mit Einbau versehen (Einbaustrecken siehe Tabelle 16, Seite 53).

Bei Tm N 2293 traf der Vortrieb auf einen völlig zersetzten grusigen Granit, der einen laufenden Einbau notwendig machte (Abschnitt 5.3.3, Seite 37). In dieser Zone ereignete sich ein weiterer tödlicher Unfall bei Tm N 2309. Er war der unmittelbare Anlass zur Umstellung auf den Kalottenvortrieb bei Tm N 2312,4. Im Kalottenvortrieb behielt die Unternehmung den Einbau (System Bernold) bis Tm N 2330,8 bei (Ausbruchsklasse V gemäss Vereinbarung Bauleitung/Unternehmung ohne Rücksicht auf die Definition der Ausbruchsklassen).

Bis zum Ende der Zone mit Lamprophyren wurde der Kalottenausbruch in wiederum standfestem Granit mit Netzen und einer Systemankerung als Kopfschutz gegen Steinflall gesichert. Um die Netze vor der Sprengwirkung beim Strossabbau zu schützen, wurde die Kalotte versuchsweise zusätzlich gunitiert (Ausbruchsklasse II).

Im Abschnitt zwischen Tm N 2386–3238 mit vorwiegend gneisigem Granit erwies sich das Gestein als weitgehend standfest, so dass die Sicherung weiterhin mit Ankern, Netzen und Gunit erfolgen konnte (effektive Ausbruchsklasse II). Spezielle Vorkommnisse ereigneten sich in diesem Abschnitt keine mehr.

5.2.2 Südliche Gneiszone des Aar-Massivs

In der südlichen Gneiszone wirkten sich z.T. intensive alpine Verschieferung, wenig feste Gesteine wie Glimmerschiefer und zahlreiche verlehnte schieferungsparallele Ruschelzonen spürbar verschlechternd auf die geotechnischen Verhältnisse aus.

Sicherheitsstollen

Schiefrige Gesteinspartien in Kombination mit reichlich vorhandenen Quarzlagen oder Ruschelzonen reduzierten die Standfestigkeit bereits im Sicherheitsstollen. Im Bereich von Ruschelzonen entstanden z.T. schmale schlitzförmige Kamme. Der Ausbruch musste daher streckenweise ziemlich bald hinter dem Vortrieb mit Gunit gesichert werden (Ausbruchsklassen II und III). Insgesamt wurden 172,5 oder 21% der total 831 m in der südlichen Gneiszone des Aar-Massivs gunitiert (die Lage der Strecken geht aus dem Anhang 4a hervor). Im südlichsten Abschnitt mit den zahlreichen verlehnten Ruschelzonen begannen sich im vorerst aufgetragenen Gunit Risse zu bilden. Die Strecke zwischen Tm N 4036–4046 wurde deshalb nachträglich eingebaut.

Tunnel

Die normale Sicherung des Kalottenvortriebes bestand in der südlichen Gneiszone aus Gunit und Ankern (Ausbruchsklasse II). Die Erfahrungen beim Vortrieb im Aare-Granit hatten gezeigt, dass in kritischen, einen Einbau erfordernden Situationen durch das Nachprofilieren wertvolle Zeit verloren ging. Der so erlittene Zeitverlust überstieg z.T. die Standzeit des Gesteins, so dass sich während den Vorbereitungsarbeiten für den Einbau Niederbrüche ereigneten. Um dies zu verhindern wurden die im Sicherheitsstollen angetroffenen schlechten Zonen und Störungen auf den Tunnel projiziert und dann beim Vortrieb noch vor dem Erreichen dieser Strecken auf ein gespreiztes Profil übergegangen. Diese Massnahme lohnte sich, denn in der südlichen Gneiszone konnten grössere Niederbrüche vollständig vermieden werden (SCHNEIDER 1979). In vier Strecken mit gespreiztem Profil genügte effektiv ein armiertes Spritzbetongewölbe zur Sicherung (Anker, Netz, Gunit = Ausbruchsklasse III). Weitere vier Strecken mussten dagegen tatsächlich eingebaut werden (Lage siehe Anhang 4a). Die Einbaustrecken beliefen sich total auf 57,5 m (7%). Die Strecken mit armiertem Spritzbeton auf 138,5 m (17%). Die insgesamt 196 m lange Strecke mit erhöhtem Sicherungsaufwand (24%) ist erstaunlicherweise nur geringfügig länger als jene im Sicherheitsstollen (186,5 m). Erstaunlich deshalb, weil die Störungen den Tunnel unter einem Winkel von 40–60° schneiden und damit wesentlich länger im Ausbruchprofil bleiben als dies im Sicherheitsstollen der Fall ist. Offensichtlich deckt die normale Sicherung mit Ankern und Gunit auch im grösseren Profil des Tunnels einen Teil der mit Gunit gesicherten Strecken des Sicherheitsstollens ab.

5.2.3 Mesozoikum

Das Mesozoikum umfasst neben festen Kalken auch weiche Tonschiefer des Juras sowie Gips und Dolomit der Trias. Innerhalb des Juras stiess der Vortrieb auf die prognostizierten Schwierigkeiten, die schliesslich im Tunnel zur Anwendung der "Deutschen Bauweise" auf einer einheitlichen 304 m langen Strecke führte. Diese "Mesozoikums-Strecke", die den südlichsten Teil des Mesozoikums und den nördlichsten Teil des Permokarbons umfasst, wird in einem separaten Kapitel behandelt (5.3.4, Seite 38). Die nachstehenden Ausführungen befassen sich aus diesem Grunde nur mit dem nördlichsten Teil des Mesozoikums, der aus plattigen bis gebankten Kalken besteht.

Im *Sicherheitsstollen* (Tm N 4048–4142,5) musste in den plattigen bis gebankten, kleinklüftigen Kalken jeweils nach 1–2 Tagen respektive 6–23 m Vortrieb gunitiert werden (Ausbruchsklasse III).

Im *Tunnel* (Tm N 4069–4135) schneidet die verlehmtete Störzone an der tektonischen Grenze zwischen Aar-Massiv und Urseren-Zone die Tunnelachse unter einem Winkel von 45°. Der im Bereich dieser Störung bereits in der südlichen Gneiszone bei Tm N 4051,5 begonnene Einbau wurde bis Tm N 4077 beibehalten (Ausbruchsklasse IV). In den anschliessenden Kalken erwiesen sich die Verhältnisse als so günstig, dass eine Sicherung mit einem armierten Spritzbeton ausreichte (Ausbruchsklasse III). Im Erschliessungs- und Installationsbereich der beiden Sohlstollen der "Mesozoikums-Strecke" wurde als Schutz der permanenten Arbeitsstelle ein Stahleinbau erstellt, eine Massnahme, die nicht ausschliesslich geologisch bedingt war.

Der nördlichste kalkige Teil des Mesozoikums konnte somit sowohl im Sicherheitsstollen wie im Tunnel ohne spezielle Schwierigkeiten ausgebrochen werden.

5.2.4 Permokarbon

Der nördlichste, an das Mesozoikum anschliessende Teil des Permokarbons wird ebenfalls im Rahmen des Kapitels über die "Mesozoikums-Strecke" behandelt. Er reicht im Tunnel bis Tm N 4439 und im Sicherheitsstollen bis Tm N 4421.

Im Permokarbon sind die Schieferungsflächen z.T. sehr glatt und mit Serizit belegt (phyllitische Flächen). Sie besitzen daher eine geringere Festigkeit als z.B. die Schieferungsflächen der Gneise in den Massiven. Weitere Faktoren, die sich negativ auf die Standfestigkeit auswirkten, waren:

- Die bröckeligen Quarzlinzen mit ihrem tonigen Rand
- Der Wechsel von harten hellen kleinklüftigen Gneisen mit dunklen weichen Schiefern im Südteil des Permokarbons
- Phyllitische Schiefer südlich der Mesozoikums-Strecke
- Verlehmtete Störungen mit anormal verlaufender Lage der Schieferung.

Dünnpaltige Gesteine hatten zudem die Tendenz, dass steilstehende Gneisplatten in den Paramenten auszuknicken

begannen. Gesamthaft gesehen ist somit das Permokarbon eine bautechnisch eher ungünstige Gesteinsserie.

Sicherheitsstollen

Vorauszuschicken ist, dass die Strecke zwischen Tm N 4597,9 und 5098 durch eine Drittunternehmung vom Schacht Hospental her ausgebrochen wurde (siehe Abschnitt 5.3.4, Seite 38).

Beim Vortrieb im Nordteil des Permokarbons erwiesen sich die Verhältnisse südlich der "Mesozoikums-Strecke" als überraschend günstig. Grössere Bereiche erforderten keine Sicherungsmassnahmen (Ausbruchsklasse I). Streckenweise musste gunitiert werden (Ausbruchsklassen II und III).

Im petrographisch wechselvollen Südteil des Permokarbons waren die Verhältnisse gesamthaft etwas ungünstiger. Verschiedene Strecken mussten gunitiert werden (Ausbruchsklassen II und III; Lage siehe Anhang 4a). Die Gunitstrecke von Tm N 5287–5320 in weichen, z.T. verlehmteten Phylliten wies nach kurzer Zeit Risse auf. Zudem hob sich nach einigen Wochen zwischen Tm N 5300–5310 auf der linken (östlichen) Seite die Sohle. Die Strecke von Tm N 5296,4–5315,7 wurde daher nachträglich eingebaut (Hufeisenprofil, Bogenabstand ca. 1 m). An 2 Stellen entstanden infolge von schieferungsparallelen Rutschelzonen kleine bis 1 m tiefe Kammine, bei denen jedoch eine Sicherung mit Gunit genügte.

Tunnel

Obwohl das Permokarbon vorwiegend schiefrige bis dünngebankte Gesteine enthält, verhielt es sich südlich der "Mesozoikums-Strecke", gesamthaft gesehen, geotechnisch günstiger als erwartet. Die normale Sicherung bestand aus einer Ankerung im Ausmass von 1–5 Ankern/m' und einem Gunitauftrag von 1–3 m³/m'. Lokal, z.B. beim Anfahren von Störungen, wurden zudem zusätzlich Armierungsnetze angebracht. Je nach dem Zeitpunkt des Gunitierens fiel die Sicherungsmassnahme in die Ausbruchsklasse II oder III. Wie aus dem Anhang 4a ersichtlich ist, dominiert im Nordteil des Permokarbons die Ausbruchsklasse II, im Südteil die Ausbruchsklasse III.

Die sieben bautechnisch ungünstigen Strecken im Bereich von Störungen, die mehr oder weniger unverzüglich mit einem deutlich erhöhten Aufwand an Ankern, Netzen und Spritzbeton gesichert wurden, machen insgesamt 110 m oder 9% der 1273 m langen Permokarbon-Strecke ausserhalb des Spezialvortriebes "Mesozoikum" aus.

Eine einzige Strecke erforderte einen *Stahleinbau*. Die eingebaute Tunnelstrecke von Tm N 5305,6–5331 entspricht der Einbaustrecke im Sicherheitsstollen (Tm N 5296,4–5315,7).

5.2.5 Nördliche Paragneiszone des Gotthard-Massivs

Die Paragneise erwiesen sich sowohl im Sicherheitsstollen wie auch im Kalottenvortrieb des Tunnels als bautechnisch relativ günstiges standfestes bis leicht gebräches Gebirge. Lokal wirkten sich steil westfallende Klüfte des Systems III sowie flache Klüfte ungünstig aus. Auch in dieser Serie führten die schieferungsparallelen Ruschelzonen zu kleinen Niederbrüchen oder einem Mehraufwand an Sicherungen.

Sicherheitsstollen

Die Paragneise verhielten sich weitgehend standfest. Streckenweise war im Bereich von verlehmtten Ruschelzonen oder leicht gebrächem bis gebrächem Gebirge ein Gunitauftrag in den Ausbruchsklassen II und III notwendig (siehe Anhang 4a).

Eingebaut wurden lediglich 2 kurze Strecken. Die erste lag zwischen Tm N 6296,8–6303, wo aufgrund einer 4–5 m mächtigen durchnässten Störzone ein ca. 3 m tiefer Kamin entstand (nachträglicher Einbau in Ausbruchsklasse II). Die zweite Einbaustrecke zwischen Tm N 6835,3–6840,7 fiel in eine Zone mit 3 je 20–50 cm mächtigen Ruschelzonen, aus der sich ein Niederbruch von ca. 10 m³ ereignete (Ausbruchsklasse III). Auf den letzten 100 m der Paragneis-Strecke kam es nach einiger Zeit zu kleinen Nachbrüchen aus dem westlichen Parament.

Im ganzen erforderten 155,2 m oder 11% der 1372 m langen Paragneis-Strecke einen höheren Sicherungsaufwand in den Ausbruchsklassen II und III. Sicherungsmassnahmen in der Ausbruchsklasse IV gelangten nicht zur Anwendung.

Tunnel

Auch beim Tunnelvortrieb erwies sich das Gebirge als weitgehend standfest bis leicht gebräch. Die normale Felssicherung bestand aus Ankern (vorwiegend 2–4 Stück/m') und Gunit (meist 0,5–2 m³/m'). Der letztere wurde z.T. hinter dem Vortrieb (Ausbruchsklasse II), z.T. vor Ort (Ausbruchsklasse III) angebracht. Beim Strossabbau musste nur lokal geankert oder gunitiert werden.

Die erwähnten tunnelparallelen und mittelsteil bis steil westfallenden Klüfte führten hauptsächlich im Abschnitt Tm N 6310–6785 zu Ablösungen auf der Westseite. Die Ankerdichte stieg in dieser Zone streckenweise auf 6–14 Anker/m'. Im Zusammenhang mit der westfallenden Klüftung ereignete sich bei Tm N 6384 ein tödlicher Unfall.

Schieferungsparallele Störungen verursachten verschiedene kleinere Niederbrüche von 10–25 m³ Inhalt. Der eine erfolgte zwischen Tm N 5827–5832, in einer mit Gunit gesicherten Strecke, und zwar erst ein halbes Jahr nach dem Auffahren. Einbau wurde einzig in der Strecke von Tm N 6853,8–6862,5 notwendig, wo sich im Bereich von bis zu 1 m mächtigen Störungszonen und verschiefertem Fels ein ca. 3 m breiter und 1 m tiefer Niederbruch ereignete.

Einen deutlich erhöhten Sicherungsaufwand bezüglich Ankerdichte und Gunitauftrag erforderten 178,5 m oder 13% der 1390 m langen Paragneis-Strecke.

5.2.6 Gamsboden-Granitgneis

Der Gamsboden-Granitgneis erwies sich wie der Aare-Granit als bautechnisch günstiges, weitgehend standfestes Gestein. Die grobe Klüftung führte allerdings lokal zu einer schlechten Masshaltigkeit, indem der Ausbruch streckenweise den Trennflächen folgte.

Die wichtigsten Störungen sind im Gamsboden-Granitgneis mit Lamprophyrgängen verknüpft. Diese verlaufen etwas ungünstiger als jene des Aare-Granits, indem sie den Tunnel häufig unter einem Winkel von nur 30–50° schneiden (siehe Figur 8, Seite 31). Die angetroffenen Störungen wirkten sich geotechnisch nur geringfügig aus, weil sie beidseitig von gesundem Gestein begrenzt waren.

Sicherheitsstollen

Im Sicherheitsstollen erwies sich der Gamsboden-Granitgneis über weite Strecken als standfest. Einzelne Strecken im Bereich von Störungen wurden mit Ankern gesichert. Im Falle von Nachsicherungen wurden z.T. auch Abdeckbleche sowie Gunit verwendet. Selbst Störungen, bei denen sich kleinere Kamine bildeten, konnten auf der Nordseite ohne spezielle Massnahmen durchfahren werden. Die ganze Strecke des Zwischenangriffes Hospental wurde daher in der Ausbruchsklasse I ausgebrochen. Im Bereich von nachträglichen bergschlagartigen Ablösungen wurde hauptsächlich das westliche Parament mit Ankern und Blechen nachgesichert.

Tunnel

Auch im Tunnel verhielt sich der Gamsboden-Granitgneis weitgehend standfest. Die normale Sicherung gegen Steinfall umfasste eine Ankerung verbunden mit einem Gunitauftrag (Ausbruchsklasse II im Zwischenangriff Hospental, Ausbruchsklasse III im Los Süd). Abgesehen von kleineren Niederbrüchen ereignete sich der einzige Niederbruch von Bedeutung bei Tm N 7547 und zwar in einem Sohlstollen innerhalb des künftigen Tunnelprofils. Dort war eine Störung von flach geklüftetem Gestein begleitet. Die gleiche Störung konnte im anschliessenden Kalottenvortrieb normal mit Gunit gesichert werden (Ausbruchsklasse II).

Die grobe Klüftung beeinträchtigte die Masshaltigkeit, indem sie streckenweise zu einem unregelmässigen Ausbruchsprofil führte. Sie und die bergschlagartigen Ablösungen machten stellenweise eine Sicherung der Paramente notwendig.

5.2.7 Guspis-Zone

Die Guspis-Zone stellt die geotechnisch schwierigste Strecke des Südloses dar. Hauptursache vieler Probleme war die starke

Durchtrennung des Gebirges durch Schieferung und Klüftung. Dazu kam ein ausgesprochen druckhaftes Verhalten über grössere Strecken. Die daraus resultierenden Konvergenzen waren so gross, dass im Stollen und im Tunnel streckenweise nachprofiliert werden musste, obschon massive Stützmassnahmen getroffen worden waren. Die besonderen Verhältnisse beim Zwischenangriff Süd sind im Abschnitt 5.3.5, Seite 43, erläutert.

Sicherheitsstollen

Schon beim Anfahren der schiefrigeren Partien dieser Zone wurde deren verminderte Standfestigkeit erkannt. Das Profil wurde über weite Strecken durch Stahlbögen (Hufeisenprofil) gesichert. In eher gneisigen Abschnitten wurden Sprezhülsenanker versetzt. Spritzbeton mit 5–15 cm Mächtigkeit wurde fast durchwegs aufgetragen. Diese Stützmassnahmen vermochten jedoch die bedeutenden Konvergenzen im Bereich einiger Dezimeter nicht aufzuhalten. Ein Nachprofilieren des Stollens wurde dann unumgänglich, als das Lichtraumprofil nicht mehr für die Durchfahrt der Stollenbahn ausreichte. Zur Verbesserung der statischen Wirkung wurde dabei ein Kreisprofil gewählt.

Tunnel

In der stark verschieften und geklüfteten Mittelzone der Paragneise wurden aufgrund der Erfahrungen vom Sicherheitsstollen grössere Schwierigkeiten erwartet. Zwischen Tm S 4922 und Tm S 5298 erfolgte daher von S und von N her ein Zwischenangriff vom Sicherheitsstollen aus (siehe Abschnitt 5.3.5, Seite 43). Die Randpartien der Guspis-Zone bestehen eher aus Gneisen und Amphiboliten. Diese Bereiche konnten im Vollausbuch aufgefahren werden (Ausbruchsklasse III), wobei über weite Strecken Stahlbogen als Stützmittel versetzt wurden.

5.2.8 Fibbia-Granitgneis und Rotondo-Granit

Diese Zone verhielt sich – abgesehen von einzelnen grobklüftigen Strecken – weitgehend standfest. Die relativ geringe Wasserführung begünstigte den Vortrieb. Erschwernisse ergaben sich in massigen Partien durch Bergschlag sowie durch einige lokal begrenzte Ruschelzonen.

Sicherheitsstollen

Über mehr als 40% der Granitstrecke waren keinerlei Sicherungsmassnahmen nötig (Ausbruchsklasse I), über weitere 45% genügte einzelne Anker zum Sichern von Blöcken und Platten. Stahlbau war vereinzelt im Bereich von Ruschelzonen erforderlich.

Tunnel

Im an sich standfesten Granit war wegen des grossen Tunnelquerschnittes ein Kopfschutz nötig und von der SUVA vorgeschrieben. Der Ausbruch erfolgte daher weitgehend als Klasse II. In stärker zerklüfteten Zonen kam Klasse III zur Anwendung, und im Bereich der Ruschelzonen war eine Umstellung auf Teilausbuch mit Kalottenvortrieb (Ausbruchsklasse V) erforderlich.

5.2.9 Sorescia-Gneis

Die Gneise und Schiefer dieser Zone waren im allgemeinen standfest, der Sicherheitsstollen konnte daher zu fast $\frac{3}{4}$ ungesichert bleiben (Ausbruchsklasse I). Im Tunnel kam – dem grösseren Profil entsprechend – Klasse II und III zur Anwendung. In Einzelfällen wurde bei Störungszone auf Kalottenvortrieb (Teilausbuch) umgestellt.

5.2.10 Tremola-Serie

Die oft schiefrige bis phyllitische Ausbildung der Gesteine und die häufigen kleinen Ruschelzonen und Kakirite machten hauptsächlich im Tunnel oft Stahlbau nötig.

Sicherheitsstollen

Ca. 60% konnten unverkleidet bleiben. In den übrigen Strecken wurde im rückwärtigen Bereich in der Regel Spritzbeton aufgetragen. Stahlbau wurde in 10% der Strecke verwendet.

Tunnel

Die steil nach N einfallende Schieferung hat häufig zu einem Aufblättern der Ortsbrust geführt. Dadurch wurde die Mannschaft beim Laden der Sprenglöcher gefährdet. Nach einigen glücklicherweise ohne Unfall verlaufenen Niederbrüchen wurde die Ortsbrust nicht mehr senkrecht, sondern leicht gegen den Tunnel hin geneigt angelegt.

In verschiedenen Störungszone wurde auf Kalottenvortrieb umgestellt. Die Entscheidung, wieder auf Vollausbuch zurückzugehen, fiel in der Regel erst dann, wenn aufgrund der Situation im Sicherheitsstollen über eine grössere Strecke keine Störungen mehr zu erwarten waren. Die 20% Ausbruchsklassen V und VI bedeuten somit nicht, dass 20% der Strecke eine sehr schlechte Standfestigkeit aufwiesen. Die relativ grosse Länge hoher Ausbruchsklassen beruht deshalb grösstenteils auf den erwähnten vortriebstechnischen Überlegungen. Für die im standfesten Fels im Kalottenausbruch aufgefahrenen Strecken wurde deshalb eine neue Klasse V* eingeführt.

5.2.11 Triasstecke Südportal

Diese aus Rauhwaacke und Dolomit bestehende Strecke wurde im Sicherheitsstollen durchwegs mit Bernold-Bleichen ausgekleidet. Im Tunnel wurde dieser Bereich in offener Bauweise als Voreinschnitt ausgeführt.

5.3 Spezielle technische Probleme und Vorkommnisse

5.3.1 Lockergesteinsstrecke Nordportal

Wie im Abschnitt 3.2.1, Seite 7, gezeigt wurde, setzt sich das zuerst zu durchfahrende Lockergestein aus über die Kante geschüttetem und daher nicht künstlich verdichtetem Deponiematerial zusammen. Der locker gelagerte Schutt erwies sich als weitgehend kohäsionslos. Dies unabhängig davon, ob er aus Granitkomponenten oder aus Gneis- und Schieferkomponenten und einem höheren Feinanteilgehalt bestand. Im zweiten Fall hob der aufgrund der glatten Schieferungsflächen niedrigere Reibungswinkel den Effekt der dichteren Lagerung wieder auf. Der innere Reibungswinkel des Lockergesteins kann aufgrund der natürlichen Böschungswinkel auf $35 - 40^\circ$ geschätzt werden.

Der im Kalottenbereich des Tunnels und im Sicherheitsstollen auf das Deponiematerial folgende Gehängeschutt ist grobblockig (siehe Figur 3, Seite 8). Die Brust erwies sich zwar im groben Blockschutt aufgrund der Kantenreibung und der gegenseitigen Abstützung der Blöcke als weitgehend standfest. Der Blockschutt war aber schwer abbaubar, da die Blöcke gesprengt werden mussten.

Als relativ günstiges Lockergestein erwies sich das dichter gelagerte feste alte Terrain im Bereich der unteren Sohlstollen des Tunnels.

Sicherheitsstollen

Mit dem Sicherheitsstollen wurden zuerst 56 m Deponiematerial, dann rund 30 m Blockschutt mit normalen Vortriebsleistungen von rund 10 m pro Woche bei laufendem Einbau ohne spezielle Schwierigkeiten durchfahren. Der Übergang in den Fels erfolgte über die relativ kurze Distanz von 7 m.

Tunnel

Der Tunnel wurde nach der deutschen Bauweise aufgefahren.

In den Sohlstollen wurde konventionell vorgegangen, indem zuerst ein Hut gesetzt und anschliessend der ganze Bogen gestellt wurde. In der Kalotte wurden hydraulisch vorgetriebene Lanzen eingesetzt.

Das rollige *Deponiematerial* machte beim Vortrieb der oberen Sohlstollen das Setzen eines vollständigen Brustverzuges notwendig. Einzig nach dem Weihnachtsunterbruch war die Brust infolge des gefrorenen Materials auf eine kurze Strecke standfest. In der Kalotte erlaubte die Frostperiode auf den ersten 37 m ebenfalls einen Vortrieb ohne Brustverzug. In der anschliessenden Strecke erschwerte die grosse Ausbruchfläche das Setzen eines vollständigen Brustverzuges. Daher ging die Unternehmung zu einem Abbau mit angeböschter Brust über. Die Neigung entsprach ungefähr dem Winkel der inneren Reibung. Der Brustverzug konnte so auf $3 - 10 \text{ m}^2$ reduziert werden.

Im *Blockschutt* wurde der Vortrieb in zweierlei Hinsicht erschwert:

Erstens war er wasserdurchlässig. Unglücklicherweise fiel der Vortrieb im Blockschutt mit der Schneeschmelze zusammen, so dass in den unteren Sohlstollen ein ausserordentlich hoher temporärer Wasseranfall herrschte. Das ständig aus der Brust fliessende Wasser behinderte die Vortriebsarbeiten stark.

Zweitens waren die Blöcke schwer abbaubar. Sie mussten meistens gesprengt werden. Im Bereich der Brust, resp. der Kalotte bestand zudem immer die Gefahr eines Hineinrollens von massigen Blöcken resp. des Niederdrückens der Einbaubogen. Beim Kalottenvortrieb zeigte sich zudem die bekannte Erscheinung, dass die Lanzen während des Vorschiebens bei aufsitzenden Blöcken ins Profil gedrückt wurden.

Beim Vortrieb durch die Deponie rutschte loses Material trotz den getroffenen Massnahmen in den Tunnel, was teilweise massive Setzungen an der Oberfläche zur Folge hatte. Im Blockschutt führten die Sprengerschütterungen und das von oben in die losen Zwischenräume nachrutschende Material zu weiteren Setzungen. Total setzte sich das Gelände über dem Tunnel um $6 - 102 \text{ cm}$.

Nachdem im östlichen Sohlstollen die letzten 5 m im Fels ohne Einbaubogen vorangetrieben werden konnten und der westliche Sohlstollen den Fels ebenfalls erreichte, wurde bei Tm 115 zum Kalottenvortrieb übergegangen (siehe Figur 2, Seite 8).

Der schleifende Schnitt mit der Felsoberfläche hatte zur Folge, dass die westliche Kalottenhälfte noch über eine längere Strecke im Übergangsbereich Lockergestein/Fels blieb und das Auflager rechts verankert werden musste. Z. T. wurden die Bogen aufgrund der lokal absinkenden Felsoberfläche wieder verlängert. Bei Tm N 135 befand sich der Tunnel vollständig im Fels. Der Lanzenvortrieb wurde jedoch vorsichtshalber bis Tm N 140,25 beibehalten (Ausbruchsklasse VI). Stichbohrungen ergaben bei Tm 147 eine Felsbrücke von 2,7 m und erst bei Tm 151 eine als genügend erachtete Felsüberdeckung von mehr als 4 m. Erst nachdem ein erneutes Absinken der Felsoberfläche nicht mehr zu befürchten war, konnte bei Tm 163,3 vom Kalottenausbruch mit schonendem Sprengen (Ausbruchsklasse V) zum Vollausschub übergegangen werden (Ausbruchsklasse II).

5.3.2 Unterfahrung des Bahntunnels

Der Strassentunnel unterfährt bei Tm N 1035 den Bahntunnel in einem Abstand von nur wenigen Metern (Situation siehe Anhang 4a). Ein Unterbruch des Bahnverkehrs musste mit grösstmöglicher Sicherheit vermieden werden. Eine Kontrolle des ausgemauerten Gewölbes des Bahntunnels ergab, dass der Zustand nicht überall einwandfrei war. Aus diesem Grunde wurden die Sprengerschütterungen bereits beim Vortrieb des Sicherheitsstollens kontrolliert und die Abschlagslängen von 3,2 m auf 1 m verkürzt (WEISS 1974).

Im Hinblick auf den späteren Tunnelvortrieb wurden im Sicherheitsstollen verschiedene geologisch-geotechnische Untersuchungen durchgeführt (SCHNEIDER 1979).

Eine bei Tm N 1109,81 des Sicherheitsstollens angesetzte Sondierbohrung zeigte, dass die theoretische Felsbrücke zwischen Kalotte des Strassentunnels und der Sohle des Bahntunnels nur 5,2 m betrug, aber aus gesundem Granit besteht.

Strukturelle Untersuchungen ergaben, dass 3 sich schneidende vertikale Trennflächensysteme mit teilweise niedriger Scherfestigkeit neben einem horizontalen Kluftsystem vorhanden sind (siehe Figur 9). Ungünstige Verschneidungen und entsprechende Niederbrüche mussten vor allem auch deshalb als potentiell möglich erachtet werden, weil die Unterfahrungsstrecke aufgrund des nur 25° betragenden Schnittwinkels zwischen Bahntunnel und Strassentunnel relativ lang ist.

Aufgrund der geologisch-geotechnischen Situation, des Zustandes des Bahntunnelgewölbes und der Erfahrungen mit

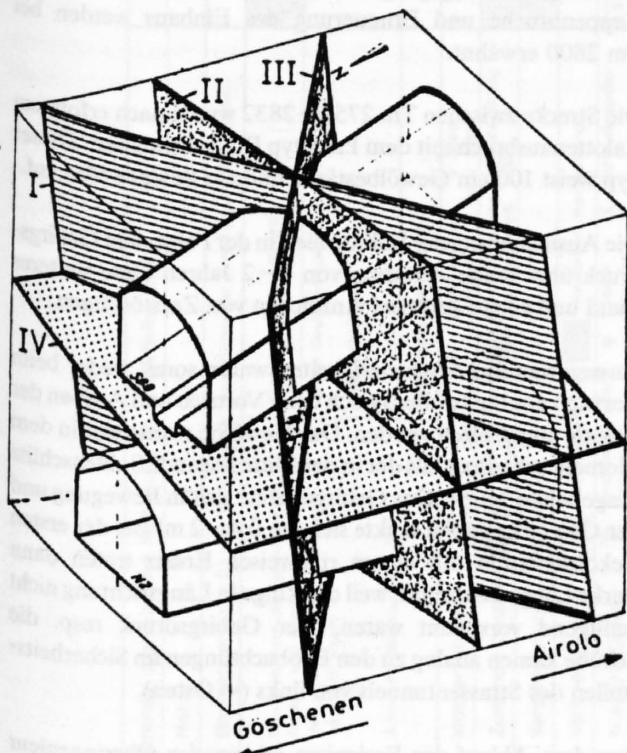


Fig. 9: Lage der Trennflächensysteme im Bereich der Unterfahrung des Bahntunnels.

den Sprengerschütterungen beim Vortrieb des Sicherheitsstollens, musste vom ursprünglich vorgesehenen Vollausschub mit verkürzten Abschlägen abgesehen werden. Als Bauvorgang wurde ein Teilausbruch mit Sohlstollen, Aufschlitzen, Ausweiten der Kalotte mit sofortigem Einbau und Abbau der Strosse gewählt (WEISS 1974). Die Abschläge wurden verkürzt, sobald die im Bahntunnel gemessenen Erschütterungen zu gross wurden (Schwinggeschwindigkeiten $> 10 \text{ mm/s}$). Insgesamt erstreckten sich die einschränkenden Massnahmen über eine Strecke von 329 m.

Um den normalen Tunnelvortrieb nicht zu stark abzubremesen, wurde der zeitaufwendige Teilausbruch vorzeitig vom Sicherheitsstollen aus in Angriff genommen. Der Zeitbedarf zur Unterfahrung betrug alles in allem, d.h. den Zwischenangriff eingerechnet, 8 Monate. Dies für eine Strecke, die bei normalem Tunnelvortrieb in 2 Monaten aufgeföhren worden wäre. Immerhin konnte aufgrund der getroffenen Massnahmen und der sorgfältigen Überwachung ein Unterbruch des Bahntunnelbetriebes vermieden werden. Bereits ein Unterbruch von wenigen Tagen hätte kostenmässig den Aufwand für den Teilausbruch bei der Unterfahrung überschritten.

5.3.3 Hydrothermal zersetzter Granit

Der auf der Ostseite des Tunnels bei Tm N 2293,5 angefohrne hydrothermal zersetzte Granit ist ausgelaugt und porös. Das Porenvolumen beträgt rund 30%; das Gestein ist dementsprechend wasserdurchlässig.

Das ursprüngliche Korngefüge des Gesteins ist noch deutlich erkennbar und scheint jenem des gesunden Granites zu entsprechen. Die Kornbindungen sind jedoch aufgehoben, so dass sich das Gestein von Hand zerreiben lässt. Der Granit ist somit weitgehend vergrust und desaggregiert.

Die fehlende Kornbindung und die entsprechend sehr niedrige Festigkeit des zersetzten Granites erforderten einen laufenden Einbau. Trotz dieser Massnahmen führte die schlechte Standfestigkeit des Gesteins und der Wasserandrang von Osten auf dieser Seite zu einem erheblichen Überprofil und bei Tm N 2309 zu einem tödlichen Unfall während der Einbauarbeiten.

Auch im Gamsboden-Granitgneis wurde ein hydrothermal zersetzter Granit angefohren und zwar im Sicherheitsstollen bei Tm S 5780. Der Stollen verläuft hier in stark wasserführendem, grobkörnigem Granit, der hier mit schwach gerichteter Textur und grossen Feldspatäugen ausgebildet ist. Bei Tm S 5773 wurde stark wasserführendes Lockermaterial angetroffen, das mehrmals in den vordersten Teil des Stollens einbrach. Nach mehreren Wochen Baggerarbeit war es möglich, die Einbruchstelle zu begehen. Dabei wurde folgende Situation angetroffen:

Der Gamsboden-Granit verläuft praktisch ungestört bis zu einer markanten Trennfläche, die ungefähr parallel zur Schieferungsrichtung mit Lagerung 156/80 steil nach Süden einfällt. Die Trennfläche ist mit tonigem Material belegt und zeigt wenige, nicht parallel verlaufende Harnische (möglicherweise durch das Nachrutschen des Materials beim Ausbaggern

entstanden?). Nördlich dieser Trennfläche öffnet sich eine West-Ost verlaufende Kaverne mit ca. 6 m Breite, 16 m überblickbarer Länge und 7 m Höhe über Stollenoberkante. Auf der Nordseite ist der Hohlraum begrenzt durch eine wellige (Fels-)Fläche, die mit Lagerung 350/85 steil nach Norden einfällt. Diese nähert sich auf der Ostseite und im Dach des Hohlraumes der vorstehend erwähnten markanten Trennfläche bis auf ca. 50 cm. Dieser Zwischenraum besteht aus einem Mylonit mit Feinmaterial in Tonfraktion.

Nach Westen lässt sich der Mylonit entlang der Trennfläche weiterverfolgen. Er erweitert sich auf ca. 2 m Mächtigkeit. Nördlich davon ist eine Rippe aus stark zerbrochenem Gamsboden-Granit zu erkennen. Dieses Gestein lässt sich leicht von Hand zu Kies zerdrücken.

Aus zwei Löchern im Westen der Kaverne fliesst abwechselungsweise trübes Wasser mit konstanter Temperatur. Weitere Wasseraustritte erfolgen in Intervallen in der Mitte der Kaverne, ungefähr in der Verlängerung der Stollenachse.

Diese Störung, die im Sicherheitsstollen zu erheblichen Schwierigkeiten und mehrwöchigen Verzögerungen führte, wurde beim Vortrieb des Hauptstollens überhaupt nicht mehr bemerkt. Nur nach intensivem Suchen konnte dort die Trennfläche gefunden werden. Sie war beidseits von kompaktem Granit umgeben und wies nur stellenweise wenig Füllmaterial auf. Es scheint, dass der hydrothermal zersetzte Granit seitlich sehr rasch in kompaktes Gestein übergeht.

5.3.4 "Mesozoikums-Strecke"

Im Bereich des Übergangs Mesozoikum/Permokarbon sah die Prognose für den Tunnel teilweise die Ausbruchsklasse VI vor, die definitionsgemäss einen Teilausbruch mit geschlagenem Marchiavanti und einer Abstützung der Tunnelbrust umfasst. Mit grösseren Vortriebsschwierigkeiten musste somit in dieser Zone zum vornherein gerechnet werden. Dass dieser Tunnelabschnitt gleichwohl eine grössere Publizität erreichte, ist auf den Versuch der Unternehmung zurückzuführen, aus finanziellen und programmmischen Erwägungen auf ein im Vertrag nicht festgelegtes Ausbruchsverfahren umzustellen und auf diese Weise Neupreise, eine verlängerte Bauzeit und dadurch ein bezahltes längeres Vorhalten der Installationen zu erwirken.

Die Diskussionen über die günstigste und beste Vortriebsmethode und die damit zusammenhängende Beschaffung der notwendigen Grundlagen für felsmechanische Modellrechnungen führten zu einem umfangreichen Untersuchungsprogramm.

Nachdem der Sicherheitsstollen bis zum Schacht Hospental durchgehend ausgebrochen war, schlugen Bauherr und Bauleitung vor, die im Sicherheitsstollen angetroffenen geotechnisch schwierigen drei Einzelstrecken von insgesamt 75 m Länge im Tunnel unter Einbezug einer 50 m langen Anlaufstrecke zu einem einheitlichen Abschnitt von rund 300 m Länge zusammenzufassen und nach der Deutschen Methode aufzufahren. Mit diesem Vorgehen konnten zeit-

raubende Umstellungen und Uminstallation bei mehrmaligem Wechsel der Ausbruchsverfahren in dem relativ kurzen Abschnitt vermieden werden. Auf der Baustelle bürgerte sich für diesen Abschnitt der — geologisch nicht ganz korrekte — Begriff "Mesozoikum" oder "Mesozoikums-Strecke" ein. Er umfasst nämlich neben dem südlichsten Teil des Mesozoikums auch den Beginn des Permokarbons.

Die damalige Publizität und die Geschehnisse während der Bauzeit lassen es notwendig erscheinen, etwas ausführlicher auf die "Mesozoikums-Strecke" einzugehen. Einen guten Überblick über die geologisch-geotechnischen Verhältnisse in diesem Abschnitt verschafft der Anhang 5.

Die "Druckstrecke" im Bahntunnel

Der Bahntunnel wurde nach der belgischen Methode in mehreren Etappen ausgebrochen (Firststollen, Ausweitung Kalotte, Sohlenschlitz, Strossabbau). Die Angaben von Stapff beziehen sich hauptsächlich auf den Vortrieb des Firststollens. Die geologisch-geotechnischen Verhältnisse bei dessen Vortrieb sowie die Daten der Gewölbemauerung im hier interessierenden Abschnitt, sind in der Figur 10, Seite 39, zusammengestellt.

Die Schwierigkeiten begannen im Firststollen in den Kalken und Kalkschiefern des Juras mit dem Ausknicken der Schichtflächen in den Paramenten ab Tm 2700. Ein schwerer Holzeinbau wurde jedoch erst von Tm 2756 an notwendig. Die Einbauarbeiten behinderten allerdings den Vortrieb nicht gross. Die monatliche Vortriebsleistung fiel nicht unter 32,5 m (Januar 1876, siehe Figur 10, Seite 39), obwohl zu Beginn des verlehnten Permokarbons von der Maschinenbohrung auf Handarbeit übergegangen werden musste. Mehrmalige Kappenbrüche und Erneuerung des Einbaus werden bei Tm 2800 erwähnt.

Die Strecke zwischen Tm 2755 — 2832 wurde nach erfolgtem Kalottenausbruch mit dem Profiltyp III₄ ausgemauert. Dieser Typ weist 100 cm Gewölbestärke und ein Sohlgewölbe auf.

Die Ausmauerung der Kalotte hielt in der Folge dem Gebirgsdruck über einen Zeitraum von 1 — 2 Jahren ohne weiteres stand und zeigte keinerlei Anzeichen von Zerstörungen.

Ausserordentliche Schwierigkeiten waren somit weder beim Vortrieb des Firststollens noch beim Vortrieb und Ausbau der Kalotte angetroffen worden. Das Gewölbe wurde erst in dem Moment schadhafte, als der in der Mitte liegende Sohlenschlitz ausgehoben wurde. Das Gebirge setzte sich in Bewegung und der Gewölbescheitel senkte sich um 0,4 — 2 m! Bei der ersten Rekonstruktion mit einem ringweisen Ersatz traten dann starke Längsschübe auf, weil die Ringe in Längsrichtung nicht genügend verspannt waren. Der Gebirgsdruck resp. die Schübe kamen analog zu den Beobachtungen im Sicherheitsstollen des Strassentunnels von links (= Osten).

Aus dem Ablauf der Ereignisse schloss der Oberingenieur G. Bridel, dass bereits die erste Mauerung zum Erfolg geführt hätte, wenn die Gewölbefüsse von Anfang an durch Spannrie-

gel abgestützt worden wären und das Unterfangen des Gewölbes sowie das Schliessen der Ringe sofort und nicht erst nach 2–3 Jahren erfolgt wäre. Verschlimmert wurde die Situation durch das schlecht abgeleitete Bergwasser, das jahrelang auf das Gestein einwirken konnte, das dadurch weich und blähend wurde.

Die zweimalige Zerstörung des Gewölbes ist somit nicht allein auf das schlechte Gebirge, sondern in ebensolchem Masse auf einen ungünstigen Arbeitsvorgang zurückzuführen.

Bei der zweiten Rekonstruktion wurden dann die schweren Druckprofile, wie sie in der Figur 11 dargestellt sind, eingebaut.

Nachträglich wurde festgestellt, dass die Felsoberfläche an dieser Stelle nur 30 m über dem Tunnelfirst liegt. Ob und wie weit sich diese Tatsache auf den Gesteinszustand auswirkte resp. in welchem Ausmass die Verhältnisse im Strassentunnel günstiger waren, muss offen bleiben.

Die Strecke mit sehr schlechten geotechnischen Verhältnissen war total ca. 90 m lang. Im Strassentunnel musste folglich mit einer geotechnisch schwierigen Strecke ähnlichen Ausmasses gerechnet werden.

Vortrieb des Sicherheitsstollens Tm N 4142,5–4421

Nachdem der Vortrieb im Jura bis Tm N 4148,5 ohne Schwierigkeiten (Gunit nach 1–2 Tagen, siehe Abschnitt 5.2.3, Seite 33) vor sich gegangen war, ereignete sich am 12. November 1971 beim vierten und letzten Abschlag der Nachtschicht ein *Niederbruch*. Es entstand ein Kamin, dessen Höhe auf 6 m geschätzt wurde. Beim Versuch den Stollen auszubaggern, rutschte ständig schwarzes Tonschiefermaterial nach. Mitverantwortlich am Niederbruch war eine bröckelige grosse Quarzlinse, deren graphitisch-toniger Rand bei Zutritt von feuchter Luft ausfloss. Im Verlaufe eines Tages begannen die dünnplattigen Kalke im rückwärtigen Bereich nördlich des Niederbruchs in $\frac{2}{3}$ Wandhöhe auszuknicken. Mit dem Einbau wurde daher im rückwärtigen festen und unversehrten Gestein bei Tm N 4141,5 begonnen. Das Kamin wurde in der Folge unter laufendem Versetzen eines vollständigen Brustverzuges unterfahren.

Bis Tm N 4176 musste in den Tonschiefern teils ein ganzer, teils ein partieller Brustverzug beibehalten werden. Die östliche Stollenwand war ständig leicht durchnässt, so dass das tonige Material auf dieser Seite durch Kohäsionsverluste druckhaft wurde. Bei Tm N 4165 links (= östlich) sickerte Wasser ein. In der Folge wurde das Gebirge druckhaft. Der Brustverzug wurde eingedrückt und der vorderste Bogen durch einen nordwestwärts gerichteten Schub verdreht. Die rückwärtigen Bogen wurden in $\frac{2}{3}$ Höhe leicht eingebeult und im Gunit der eingespritzten Bogen zeigten sich auf der rechten Seite Risse, die bis 10 m hinter die Stollenbrust reichten. Die östliche Seite verhielt sich ständig schlechter als die westliche. Die Standzeiten betrugen nur wenige Stunden.

Zwischen Tm N 4150 und 4160 verbog der Druck die Sohlsprenger. Diese mussten ersetzt werden. Bei Tm N 4176,2 wurde aufgrund der anhaltend schlechten Verhältnisse auf das statisch günstigere Hufeisenprofil übergegangen.

Die Strecke von Tm N 4176–4185, die in plattigen Kalken liegt, konnte wiederum ohne Brustverzug durchfahren werden, d.h. sie wies etwas günstigere Verhältnisse auf.

Danach folgen erneut 5 m Tonschiefer. In diesen wurde bei Tm N 4186,4 zur Sicherung über das Wochenende vom 11./12. März 1972 ein vollständiger Brustverzug gesetzt. Am Montag war der Brustverzug eingedrückt, so dass er verstärkt werden musste. Das Wasser hatte ca. 10–20 m³ Material in den Vortrieb geschwemmt (geschätzter Erguss 1–2 l/s). Der Vortrieb wurde an dieser Stelle für einen Monat unterbrochen, weil bei Tm N 600 die Ventilation uminstalliert werden musste. Vor der Wiederaufnahme des Vortriebes wurden vom 10.–12. April auf der Ostwand und in der Kalotte 27 Schienen à 4 m Länge eingerammt. Der weitere Vortrieb in den Tonschiefern erforderte einen weitgehenden Brustverzug.

Bis Tm N 4205 durchfuhr der Sicherheitsstollen hierauf graue feinplattige Kalke mit einer mittleren Bankung von 1–5 cm. Das Gestein war auf den letzten Metern ausgesprochen bröckelig. Wiederum sickerte auf der linken Seite ständig Wasser ein. Aus diesen Gründen musste ab Tm N 4202 erneut ein Brustverzug gesetzt werden.

Beim Tm N 4204,8 wurde der Vortrieb eingestellt und eine 30 m lange Strecke versuchsweise injiziert (siehe Seite 41).

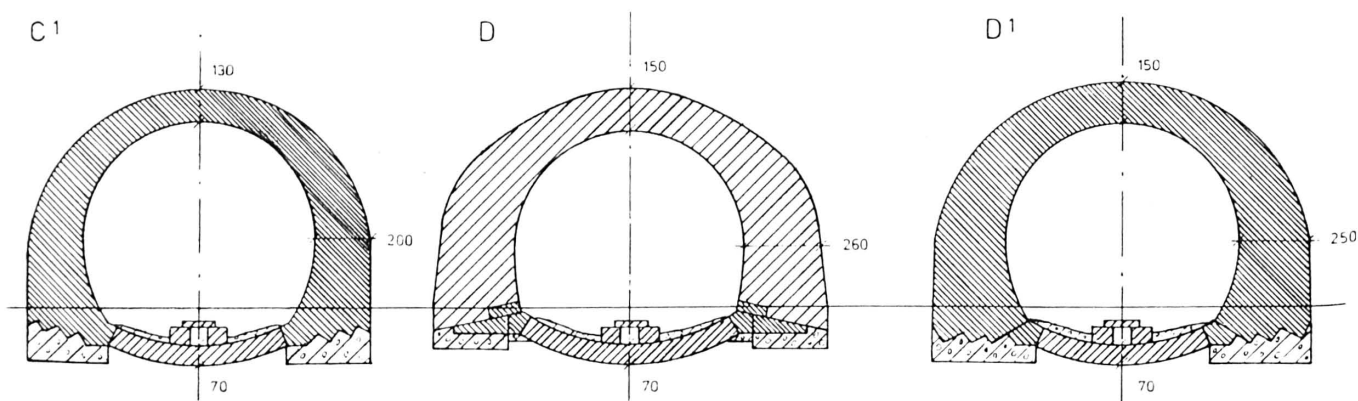


Fig. 11: Schwere Profile der zweiten Rekonstruktion in der Druckstrecke des Bahntunnels (Lage siehe Figur 10). Die Gewölbemauerung erfolgte mit zugehauenen Bruchsteinen.

Nach Abschluss der Injektion traf der Vortrieb vorerst auf 4 m einer stark durchnässten Wechsellagerung von dünnen Kalkbändchen mit Tonschiefern. Der Kalk war trotz Injektion ausgesprochen bröckelig. In dieser Zone rammten die Mineure in der östlichen Hälfte der Kalotte und z.T. im östlichen Parament Schienen ein und zwar bei:

Tm N 4204,8: 47 Schienen à 3,5 m
Tm N 4206,4: 20 Schienen à 3,0 m
Tm N 4208,0: 12 Schienen à 2,5 m

Bis Tm N 4234 war in den wieder stärker kalkigen Schichten mindestens ein teilweiser Brustverzug notwendig.

Wie die Aufzeichnungen im Anhang 5 zeigen, waren anschliessend die geotechnischen Verhältnisse trotz der eher schlechteren lithologischen Beschaffenheit günstiger, hauptsächlich weil der Stollen beim Anfahren trocken war. Ein Brustverzug wurde nur noch an Wochenenden gesetzt. Die Trias erwies sich sogar als standfest, der Einbau wurde allerdings beibehalten.

Im Permokarbon erforderten die stark verlehmtten Serizit-schiefer bis Tm N 4359,5 durchwegs einen Einbau. Die Vortriebsarbeiten gingen jedoch unter günstigeren Verhältnissen als im Mesozoikum vor sich. Der Fels wurde zwar weiterhin mit Abbauhammer und Spitzhacke ausgebrochen, doch besass er eine kurze Standzeit, so dass die Marchiavanti-bleche von vorne her eingelegt werden konnten. Ein Brustverzug im oberen Stollendrittel schützte die Belegschaft beim Einbau der unteren Bogenteile und der Sohlsprenger. Der Fels in der Brust begann sich normalerweise im Verlauf von 1–3 Stunden zu lockern. Unter Zutritt von Luft und Wasser verlor das Gestein seine Kohäsion. Beim Anfahren war der Fels meist trocken oder erdfeucht. Innerhalb weniger Tage begann das Wasser jedoch durchzudrücken und zwar wiederum vorwiegend von der Ostseite her. Dadurch ging die Kohäsion nachträglich verloren und das durchweichte Gestein begann zu drücken. Zwischen Tm N 4316,5–4322,5 wurden die Sohlsprenger verbogen und mussten ersetzt werden.

Zwischen Tm N 4360–4392 waren die Verhältnisse wieder besser, so dass als Sicherung ein Gunitauftrag nach 4–7 m Vortrieb (1–2 Tagen) genügte. Zwischen Tm N 4392–4421 verschlechterte sich die Situation jedoch und es musste erneut zu einem Einbau übergegangen werden. Ungünstig wirkte sich vor allem eine Änderung der Streichrichtung aus. Der Schnittwinkel mit der Stollenachse verringerte sich von 40–50° auf 10–20°. Die Gampen der ursprünglich eingebauten Bogen erwiesen sich als zu schwach und wurden eingebeult. Das Fensterprofil musste nachträglich durch ein Hufeisenprofil ersetzt werden. Zwischen Tm N 4410–4420 traten mehrere verlehmtte Schieferungsflächen und schieferungsparallele Ruchelzonen auf, so dass trotz des an und für sich wieder festeren Gesteins der Einbau beibehalten wurde. Bei Tm N 4421 war jedoch das Südende des geotechnisch schlechteren Nordteils des Permokarbons erreicht.

Aus den Ereignissen geht zusammenfassend hervor, dass im kalkigen und wasserdurchlässigen Mesozoikum die Schwierigkeiten während dem Vortrieb auftraten, im ver-

lehmtten schlecht durchlässigen Permokarbon dagegen infolge der Deformationen erst nach dem Vortrieb.

Injektion Tm N 4205–4235 des Sicherheitsstollens

Nach der Erstellung einer Abschlussmauer wurde in der Zeit vom 15. 5. 72–19. 9. 72 die Strecke von Tm N 4205–4235 in drei Phasen nach dem in Tabelle 11 aufgezeigten Schema injiziert.

Total wurden 230 t resp. im Mittel 7,7 t/m' injiziert.

Tabelle 11 Injektionsarbeiten bei Tm N 4205

Phase	Druck atü	Zement/Wasser	Menge / Zone (t)		
			0 – 6 m	6 – 16 m	16 – 30 m
1	30 – 50	2 : 1	80	–	–
2	50 – 100	1 : 1	40	40	–
3	– 120	1 : 2	20	20	30

Der Erfolg der Injektionen war am finanziellen und zeitlichen (4 Monate) Aufwand gemessen gering. In der ersten Phase floss das Injektionsgut z.T. hinter dem Einbau hindurch in den Stollen. In den nächsten Phasen drang es in die durch die Injektionsdrucke aufgerissenen Spalten und blieb auf diese beschränkt. Das Bergwasser wurde nur teilweise verdrängt. Die felsmechanischen Eigenschaften des Gesteins blieben weitgehend unverändert. Die Standfestigkeit beim Durchörteren der injizierten Zone entsprach jener von geologisch analogen Strecken vor der Injektionszone (siehe Anhang 5).

Rückblickend muss festgestellt werden, dass, von bautechnischer Seite betrachtet, kaum von einem Erfolg der Injektionen gesprochen werden kann. Diese können jedoch als wertvoller Grossversuch im Hinblick auf den späteren Tunnelvortrieb betrachtet werden. In diesem wurde denn auch auf Injektionen verzichtet und in der stärker wasserführenden Zone bei Tm N 4200 ein Drainageschirm ausgeführt.

Sondierstollen (Zwischenangriff) in der Achse des Tunnels

In der Zeit, in der der Vortrieb im Sicherheitsstollen durch die Injektionsarbeiten blockiert war, wurde in der Achse des Strassentunnels ein Zwischenangriff bei Tm N 3990 begonnen, der bis Tm N 4198,6 vorangetrieben wurde.

Die Verhältnisse waren jenen im Sicherheitsstollen analog, doch wurde die auf die gebankten Kalke folgende tonige und teilweise verlehmtte Serie früher als erwartet angetroffen. Der Grund war die starke Verfaltung der Schichten und ein anormales NWSE-Streichen (siehe Anhang 5). Der Vortrieb ging bis Tm N 4183 unter günstigeren Bedingungen als im Sicherheitsstollen vor sich (1–3 Bogen/Tag). Ein Brustverzug erwies sich nur an Wochenenden als notwendig. Dies weil der Stollen grösstenteils trocken war. Vermutlich wurde das Gebirge in diesem Bereich durch den Sicherheitsstollen drainiert.

Ab Tm N 4183 war bis zur Einstellung des Vortriebes bei Tm N 4198,6 zuerst ein teilweiser, dann ein vollständiger Brustverzug notwendig. Im Sondierstollen begann, gleich wie im östlich gelegenen Sicherheitsstollen, von Osten her Wasser einzusickern. Am 13. September 1972 wurden bei Tm N 4198,6 ca. 4 m³ Material eingeschwemmt.

Der Vortrieb wurde eingestellt, da zu jenem Zeitpunkt die Injektion im Sicherheitsstollen Tm N 4205 beendet war. An der Brust wurden mehrere Drainagebohrungen ausgeführt. Da das Gebirge nach einiger Zeit zu drücken begann, wurde der Einbau nachträglich im März 1973 mit einer massiven Holzspriessung versehen.

Sondierstollen ab Schacht Hospental

Nachdem die Unternehmung glaubte bei Tm N 4205 des Sicherheitsstollens auf "unüberwindliche" Schwierigkeiten gestossen zu sein, verlangte sie horizontale Sondierbohrungen bis in den Bereich des Schachtes Hospental zur Abklärung der Felsverhältnisse.

Aufgrund von ergänzenden Studien über den Bereich des Mesozoikums, insbesondere die geologisch-geotechnischen Verhältnisse im entsprechenden Abschnitt des Bahntunnels, konnte gezeigt werden, dass die schlechten geotechnischen Verhältnisse – der Prognose entsprechend – nicht bis zum Schacht Hospental reichen, sondern auf die Übergangszone Mesozoikum/Permokarbon beschränkt sind.

Um die noch bestehenden Unsicherheiten vollständig zu eliminieren, ordneten Bauherr und Bauleitung anstelle von Sondierbohrungen einen Sondierstollen vom Schacht Hospental aus an. Dieser wurde im September 1972 in der Achse des Sicherheitsstollens mit gleichem Querschnitt begonnen. Am 7. Juni 1973 erfolgte bei Tm N 4598 der Durchschlag zum Vortrieb von Göschenen aus. Trotz der bescheidenen Installationen ging der Vortrieb regelmässig und ohne besondere Schwierigkeiten vor sich. Als Nebeneffekt wirkte er sich stimulierend auf den ebenfalls im September 1972 wieder aufgenommenen normalen Vortrieb des Sicherheitsstollens von Norden her aus.

Tunnelvortrieb

Das Geschehen in der "Mesozoikums-Strecke" war relativ komplex, da sie aus terminlichen Gründen von beiden Seiten her in Angriff genommen wurde. Nach dem Auflaufen des normalen Kalottenvortriebes auf die Mesozoikumsstrecke wurde dieser unter Umfahrung des Mesozoikums fortgesetzt. Eine detaillierte Schilderung des ganzen Geschehens hat BOURQUIN (1974) publiziert. Einen Überblick über die verschiedenen Vortriebe gibt die Figur 13, Seite 43. Die Ausbruchsphasen sind aus der Figur 12 ersichtlich.

Das Verhalten in den verschiedenen Vortrieben und Gesteinsserien entsprach im wesentlichen den Erwartungen aufgrund der im Sicherheitsstollen gemachten Erfahrungen. Es war aber gesamthaft gesehen deutlich günstiger als in letzterem.

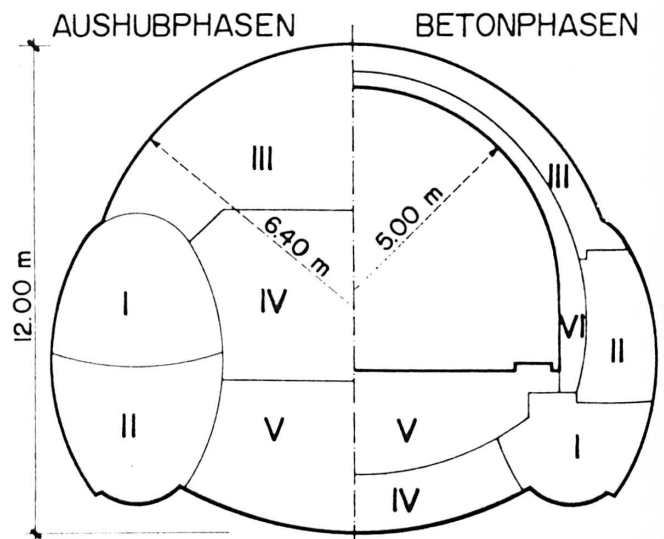


Fig. 12: Ausbruchsphasen (links) und Betonierungsetappen (rechts) im Bereich der Mesozoikums-Strecke. Ausbruchsphasen: I Sohlstollen oben, II Sohlstollen unten, III Kalotte, IV Kern, V Sohlgewölbe

Grössere Unterbrüche als Folge von Niederbrüchen gab es nicht mehr und ein Brustverzug war nur noch teilweise notwendig. Dies dürfte nicht zuletzt auf die Einführung des Dreischichtenbetriebes mit Schichtwechsel vor Ort zurückzuführen sein. Beim Vortrieb des Sicherheitsstollens wurde nämlich ein vollständiger Brustverzug häufig nur vor dem Unterbruch beim Schichtwechsel gesetzt. Zudem entstand ein Teil der Schwierigkeiten anlässlich von Arbeitsunterbrüchen (Niederbrüche bei Schichtwechseln und an Wochenenden). Der stete Vortrieb während der Woche wirkte sich somit günstig aus.

Der einzige grössere Niederbruch ereignete sich ausserhalb der eigentlichen Mesozoikums-Strecke im Bereich der nördlichen Erschliessung. Dort lösten sich zwischen Tm N 4446–4451 im Permokarbon ohne Vorwarnung rund 25 m³ unterhalb einer flachen Kluft. Innerhalb der Mesozoikums-Strecke kam es lediglich zu kleineren Niederbrüchen von bis zu 5 m³, deren Lage aus dem Anhang 5 hervorgeht.

Beim *Sohlstollenvortrieb* ergaben sich die grössten Vortriebs-Schwierigkeiten im Sohlstollen Ost zwischen Tm N 4196–4221, weil hier trotz Drainagebohrungen Wasser zusickerte. Im Sohlstollen West erstreckte sich die entsprechende ungünstige Strecke von Tm N 4208–4235.

Im Permokarbon war in den beiden Sohlstollen zwischen Tm N 4339–4350 (Ost) resp. 4349–4361 (West) durchgehend ein partieller Brustverzug notwendig. In den von Süden her vorgetriebenen oberen Sohlstollen wurden durch den Druck die Sohlsprengrer deformiert und mussten ausgewechselt werden (Sohlstollen Ost Tm N 4344–4360, Sohlstollen West Tm N 4354–4376). Später wurde in dieser Zone streckenweise auch der Einbau deformiert. Mit wenigen Ausnahmen wurden anschliessend aufgrund dieser Erfahrungen bis zum Durchschlag der Sohlstollen gewölbte Sohlsprengrer angewendet. Im ganzen Abschnitt zwischen Trias und Tm N 4375 wurde der Einbau der oberen Sohlstollen für die Zeit zwischen Ausbruch und Betonarbeiten mit einer Holzspriessung verstärkt.

Beim *Kalottenvortrieb* wurde das Ausbruchprofil mit hydraulischen, einzeln vorgeschobenen Lanzen laufend abgedeckt. Der Abbau des Gesteins erfolgte mit einem schweren Abbau-

hammer. Der Vortrieb ging relativ problemlos vor sich und zwar auch in jenen Zonen zwischen Tm N 4200–4220, die beim Vortrieb der Sohlstollen grosse Schwierigkeiten bereiteten. Das Gebirge war durch die beiden Sohlstollen weitgehend drainiert worden. Ein Brustverzug war trotz der grösseren Ausbruchfläche nur in ganz vereinzelten Fällen notwendig. In der unmittelbar auf die Trias folgenden Zone (Tm N 4284–4293) wurden die Kalottenbogen nachträglich deformiert.

Der Abbau des Kerns und des Sohlgewölbes stiess auf keine speziellen Schwierigkeiten.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Entscheid zu Gunsten der Deutschen Bauweise richtig war. Der Bauvorgang war zwar komplex und aufwendig, aber wesentlich kostengünstiger und rascher als der von der Unternehmung vorgeschlagene Schildvortrieb (Beschaffungs- und Installationszeit). Grössere Niederbrüche mit entsprechend langen Arbeitsunterbrüchen konnten vollständig vermieden werden.

5.3.5 Bergschlagartige Abschalungen

In den granitischen Gesteinen, d.h. im Aare-Granit, im Gamsboden-Granitgneis und im Rotondo-Granit, bildeten sich lokal bergschlagartige Abschalungen. Dabei handelt es sich nicht um Bergschlag im Sinne von plötzlich schlagartig und mit einem Knall abspringenden Platten. Die Abschalungen begannen z.B. im Aare-Granit einige Zeit nach dem Vortrieb und konnten sich über Wochen fortsetzen. Bei stillegtem Vortrieb war manchmal ein Knistern im Fels zu hören. Die Abschalungen entstanden jedoch, analog zum eigentlichen Bergschlag, durch Spannungumlagerungen, die nach dem Ausbrechen eines Hohlraumes in einem vorher unverritzten Gebirge immer stattfinden.

Im Aare-Granit traten Abschalungen in zwei Zonen auf; einerseits in der Portalzone bis ca. Tm N 750, andererseits im südlichen Teil des Aare-Granites zwischen Tm N 2500–3100. Im Sicherheitsstollen, in dem langfristige Beobachtungen möglich waren, konnte zudem beobachtet werden, dass diese Erscheinungen auf bestimmte Bereiche des Profils beschränkt waren (Figur 14).

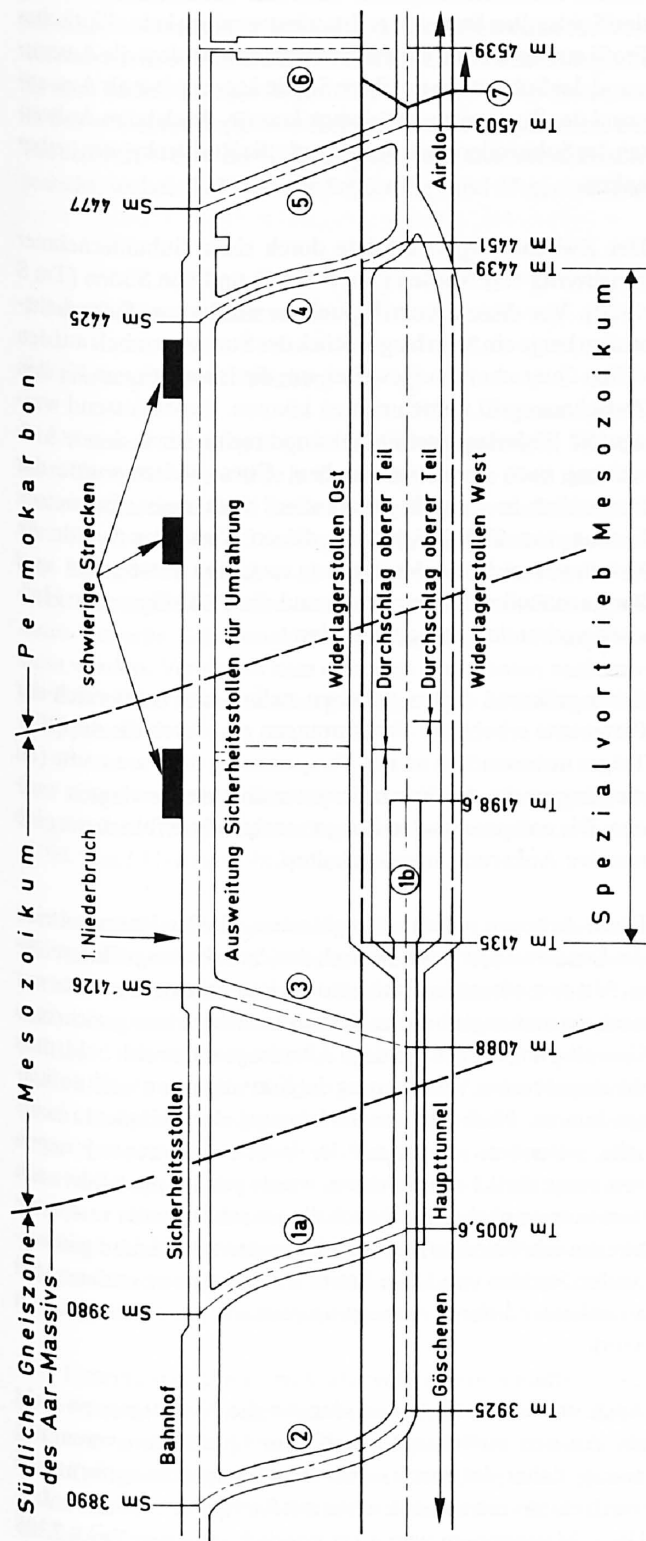


Fig. 13: Arbeiten und Vortriebe im Bereich der "Mesozoikums-Strecke"

1a) Querschlag für den Vortrieb des Sondierstollens (1b)

1. Zwischenangriff
2. Zwischenangriff Herbst 1973
3. Umfahrung Nord
3. Zwischenangriff Winter 1974
5. Umfahrung Süd
6. Querschlag für Ventilation
7. Kalottenvortrieb Richtung Süd

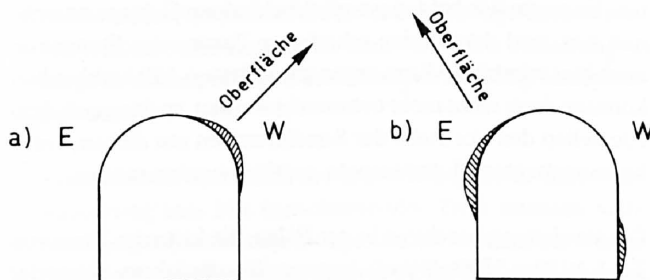


Fig. 14: Lage der bergschlagartigen Abschalungen in Aare-Granit. Sicherheitsstollen, Blick in Vortriebsrichtung

a) Portalzone

b) Südlicher Abschnitt Aare-Granit ca. Tm N 3000

In beiden Streckenabschnitten besteht eine geometrische Beziehung der Abschalungsstellen zur Oberfläche. Die Erscheinungen traten vorwiegend in dem gegen die Oberfläche gerichteten Teil der Kalotte oder des Kämpfers auf. Dies lässt auf Hauptspannungsrichtungen schliessen, die nicht lotrecht und waagrecht sondern räumlich schief gegen die Oberfläche ausgerichtet sind.

Im Nordteil des Tunnels können die für die Abschalungen notwendigen Spannungen mit der relativ rezenten Durchtalung des Granitkörpers und den sich dabei ergebenden Spannungsspitzen in Oberflächennähe erklärt werden. Die innere Zone mit Abschalungen liegt im Bereich mit der grössten Überlagerung unter dem Bätzberg.

Da sich die Ablösungen erst einige Zeit hinter dem Vortrieb bemerkbar machten, hatten sie keine unmittelbaren Auswirkungen auf die Sicherungsmassnahmen im Vortriebsbereich (Ausbruch in den Ausbruchsklassen I und II). Sie führten jedoch zu einem gewissen nachträglichen Mehraufwand (Nachsicherungen, Säuberung der als Kopfschutz angebrachten Netze, Auflad des Nachfalls).

In massigen Bereichen des *Gamsboden-Granitgneises* lösten sich Platten z. T. bereits einige Stunden nach dem Durchörtern und fielen meistens im Bereich des Wandfusses auf die Sohle (so z. B. zwischen Tm N 7205–7211 aus dem rechten Kämpfer). Das Phänomen erforderte keine speziellen Sicherungsmassnahmen. Zwischen Tm S 6450–6870 und 7185–7260 konnten auf der Südseite vor allem im Sicherheitsstollen beinahe durchgehend bergschlagartige Ablösungen festgestellt werden. In den kurzen *Rotondo-Granitstrecken* waren die Abschalungen ebenfalls ausgeprägt.

5.3.6. Zwischenangriff Los Süd (*Guspis-Zone*)

Nachdem beim Durchfahren der Paragneise und Schiefer der Guspis-Zone im Sicherheitsstollen, insbesondere bei Tm S 4960 druckhafte Partien mit deutlichen Konvergenzen aufgetreten waren, musste für den Ausbruch des Strassentunnels mit grösseren Schwierigkeiten gerechnet werden. Bei Tm S 4800 wurde daher ein Sondierstollen angesetzt, der vom Sicherheitsstollen abzweigte und bei Tm S 4840 die Axe des Strassentunnels erreichte. In dieser Axe wurde er auf dem Niveau der zukünftigen Tunnelsohle nach Norden vorgetrieben, wobei ab Tm S 4950 ganz erhebliche Schwierigkeiten auftraten. Es zeigte sich bald, dass mit druckhaftem Gebirge zu rechnen war, und dass in den schiefriigen Partien der Paragneise auch hier erhebliche Konvergenzen auftraten. Mit Stahleinbau konnten diese nicht mehr beherrscht werden, so dass nach dem Einstellen des Vortriebs der Sondierstollen mit dicken, vertikal eingebauten Holzstempeln gestützt werden musste.

Die Bauleitung beschloss in der Folge, die kritische Zone von Tm S 4920–5300 als Zwischenangriff aufzufahren, bevor der Vortrieb des Strassentunnels die kritische Zone erreichte. Diese Massnahme war nötig, um die erforderlichen Teilausbrüche mit anschliessenden Einbauten ohne Zeitdruck ausführen zu können, bzw. um nicht beim Erreichen dieser Zone

mit dem Hauptvortrieb das ganze Vortriebssystem ändern oder stillsetzen zu müssen.

Für den Zwischenangriff wurde die Deutsche Bauweise gewählt, ähnlich der Mesozoikumsstrecke im Los Nord. Die beiden Sohlstollen links und rechts wiesen jedoch kein elliptisches Profil auf, sondern ein quasi-rechteckiges, so dass die Aussenwand der Sohlstollen mit ihren Stahlträgern später als Aussenwand des Strassentunnels dienen konnte. Auch beim Aufweiten der Sohlstollen nach oben wurde die Rechtecksform beibehalten.

Der Zwischenangriff erfolgte durch einen Subunternehmer gleichzeitig von Norden (Tm S 5300) und von Süden (Tm S 4920). Vor diesen Angriffspunkten wurde vom Sicherheitsstollen her je ein 80 m langes Stück des Strassentunnels auf den vollen Querschnitt aufgeweitet, um die Installationen für den Zwischenangriff aufnehmen zu können. Anschliessend wurden die Widerlagerstollen links und rechts sowie deren Aufweitung nach oben vorgetrieben. Etwas später wurde der Firststollen in Angriff genommen. Nach dem stückweisen Einbau von DIN-Trägern in diesen Vorstollen wurde im Kalottenbereich die Verbindung zwischen Firststollen und Paramentstollen ausgebrochen und die Stahlträger zum Hufeisen verbunden und einbetoniert.

Schon während diesen Arbeiten stellten sich im Bereich der Paramente erhebliche Verformungen ein, durch die die DIN-Träger insbesondere an der Verspriessung der Paramente (an die Gegenseite der Vorstollen) wie Bananen verbogen wurden. Die entsprechenden Zonen wurden daraufhin durch eine massive Ankerung zurückgehalten.

Diese Arbeiten waren abgeschlossen, als der Hauptvortrieb des Strassentunnels den Bereich des Zwischenangriffs erreichte. Mit den schweren Geräten des Hauptvortriebs musste nur noch der stehengebliebene Kern unter dem bereits gesicherten Gewölbe abgetragen werden. Allerdings zeigte sich bald, dass die eingebrachte Verankerung die Konvergenzen nicht aufhalten konnte. Nachdem die Verformung der Paramente beidseits, besonders jedoch auf der E-Seite Grössenordnungen von mehr als 0,5 m erreichten, wurde ein knappes Jahr nach dem ursprünglichen Ausbruch die am schlimmsten verformte Strecke rekonstruiert, indem die Paramentverkleidung in vertikalen Streifen von 1,5 m Breite abschnittsweise entfernt und anschliessend durch Armierung verstärkt wieder eingezogen wurde.

Auch im Sicherheitsstollen klangen die Konvergenzen nicht ab. An den Stellen mit erheblicher Querschnittsverengung musste daher der Stahleinbau (Hufeisenprofil) entfernt und durch einen verstärkten Einbau mit Kreisprofil ersetzt werden. Diese Massnahmen waren erforderlich zwischen Tm S 5205 und 5228 sowie zwischen Tm S 5028 und 5048.

5.3.7. Portalzone Südportal

Aufgrund mehrerer Sondierbohrungen war zur Zeit der Ausschreibung bekannt, dass im Portalbereich Lockergesteine in Form von Moräne und Trias in Gestalt von Rauhwacke zu er-

warten war. Beides sind geotechnisch recht ungünstige Gesteine, die einen aufwendigen Vortrieb in der Ausbruchsklasse VI erfordert hätten. Die geringe Überdeckung und das nur landwirtschaftlich genutzte Land ermöglichten es, einem schwierigen bergmännischen Vortrieb mit einem offenen Voreinschnitt auszuweichen. Während im Sicherheitsstollen der Vortrieb bereits in der Trias einsetzte, erstreckte sich die Baugrube für den Tunnel bis zum Beginn der Tremola-Serie. Sie wurde im Schutze einer doppelten Bohrpfahlreihe ausgehoben. Die Tunnelröhre wurde im Tagbau erstellt und anschliessend eingedeckt, wobei die Höhe der Schüttung rund 17 m erreichte.

5.3.8 Schächte und Zentralen

Schacht und Zentrale Bätzberg

Die *Zentrale Bätzberg* liegt im südlichen gneisigen Teil des Aare-Granites. Sie wurde in drei Etappen von oben nach unten ausgebrochen. Eine Stelle im Bereich einer steilstehenden Grosskluft wurde mit 3 m langen Ankern, Armierungsnetzen und Spritzbeton gesichert. Im übrigen konnten sowohl die Zentrale wie die Nebenausbrüche im standfesten Granitgneis ohne spezielle Schwierigkeiten geologischer Art ausgebrochen werden. Vereinzelt kam es in den Paramenten nach einiger Zeit zu den erwähnten bergschlagartigen Ablösungen von Felsplatten.

Das Vorgehen beim Ausbruch des *Schachtes Bätzberg* und die Disposition der Schachanlage wurden von SCHATZMANN (1980) und HENKE (1980) beschrieben.

Der Schacht wurde maschinell gefräst. Dabei wurde zuerst ein Pilotschacht mit einem Durchmesser von 3,0 m von unten nach oben aufgeföhren und dieser anschliessend von oben nach unten auf 6,64 m ausgeweitet. Im *Pilotschacht* wurden mittlere Nettobohrgeschwindigkeiten von vorwiegend 0,3–0,6 m/h erreicht. Bei der *Ausweitung* lag die Nettobohrgeschwindigkeit vorwiegend zwischen 0,1–0,3 m/h. Sie zeigt keine eindeutig feststellbare Abhängigkeit von den Trennflächenverhältnissen, dagegen war die Bohrbarkeit der glimmerreicheren Gneise des sogenannten "Schöllenen-Syenites" spürbar besser. Im übrigen wirkten sich andere Faktoren, wie z. B. das Auswechseln von Rollenmeisseln, stärker auf den Bohrfortschritt aus als die geologischen Einflussfaktoren.

Der Granitgneis erwies sich als weitgehend standfest. Nur ganz vereinzelt war in der Ausweitung das Versetzen von Ankern notwendig. Der geringe Sicherungsaufwand ist neben der Standfestigkeit des Granitgneises auch auf das statisch günstige Kreisprofil und das gebirgsschonende Ausbruchverfahren zurückzuführen.

Schacht und Zentrale Hospental

Der Schacht und die Zentrale Hospental liegen vorwiegend in feinkörnigen Serizitschiefern bis Chlorit-Serizitschiefern des Permokarbons. Das Gestein ist dünnplattig bis dünn gebankt. Das Einfallen der Schieferung schwankt zwischen 80–100°.

Der *Schacht Hospental* mit einer Tiefe von 310 m und einem Ausbruchsdurchmesser von 6,8 m wurde mit einem konventionellen Ausbruchverfahren von oben nach unten abgeteuft. Die technischen Einrichtungen für den Schachtbau wurden von SCHAUWECKER (1974), das Projekt und die Bauausführung von DIETHELM & SCHATZMANN (1972) beschrieben.

Nachdem sich die angetroffenen geotechnischen Verhältnisse als günstiger als erwartet erwiesen, wurde der Unternehmung erlaubt, die nicht ausgekleidete Stosslänge von 2 m auf maximal 2 Ausbaustrecken à 10 m zu verlängern. Der Wechsel erfolgte in ca 80 m Tiefe. Die provisorische Sicherung bestand aus einem einbetonierten Zwischenfundament, einem Maschendrahtnetz als Steinschlagschutz und Perfoankern. Die letzteren wurden je nach Bedarf angebracht. Notwendig waren sie vor allem dort, wo die Schieferungsflächen tangential zum Schachtumfang verliefen.

Das Abteufen ging im allgemeinen ohne spezielle Schwierigkeiten vor sich. Zweimal wurde eine Störung durchfahren. Die zweite, zwischen Kote 1253 und 1244 zwang zu einem sofortigen Verbau. Das verlehmt Gestein konnte in diesem Bereich z. T. ohne Sprengen abgebaut werden.

Die *Zentrale Hospental* wurde in mehreren Etappen ausgebrochen. Sämtliche definitiven Ausbruchflächen wurden bis zum Zeitpunkt der Betonierung mit einem armierten Spritzbeton gesichert. Die lokal vorhandene Tendenz von Schieferplatten im untersten Wanddrittel auszuknicken, erforderte örtlich eine erhöhte Ankerdichte. Beim Kalottenausbruch entstand im nördlichsten Zentralenteil im Bereich einer Störung ein Überprofil.

Schacht und Zentrale Guspisbach

– Schacht

Der vertikale Lüftungsschacht Guspisbach wurde durch eine Schachtbaufirma abgeteuft, die dazu die im Bergbau entwickelten Geräte und Verfahren zum Einsatz brachte. Von einer aufgehängten Arbeitsbühne aus erfolgte das Sprenglochbohren mit einer Bohrlaffette und das Schüttern mit einem Greifer. Für den Transport des Ausbruchsmaterials dienten Kübel mit Bodenentleerung.

Bis auf wenige Ausnahmen war der durchörterte Gamsbodengranit standfest, so dass grosse Stosslängen von 6–10 m zugelassen werden konnten. Die wenigen, stärker zerklüfteten Zonen wurden nebst der durchgehenden provisorischen Sicherung durch eine verstärkte Ankerung so lange gesichert, bis die Beton-Ringverkleidung nachgezogen war.

Erschwerend wirkte sich der erwartungsgemäss hohe Wasserzudrang aus. Mit fortschreitender Tiefe mussten mehrere Pumpstationen zwischengeschaltet werden, um das anfallende Bergwasser zu fördern. Die Endtiefe des Schachtes wurde erreicht, als der Sicherheitsstollen noch weit vom Fusspunkt entfernt war. Die Pumpen wurden nach Beendigung der Ausbruchs- und Verkleidungsarbeiten entfernt und der Schacht geflutet.

– Zentrale

Nachdem der Sicherheitsstollen den Bereich der Zentrale Guspisbach erreicht hatte, wurde durch einen Stichtunnel der Schacht angefahren. Aus ca. 10 m Entfernung erfolgten zunächst Entlastungsbohrungen, um den vollständig gefüllten Schacht zu entleeren. Anschliessend erfolgte der Durchschlag zum Schachtfuss.

Der erwähnte Stichtunnel querte die spätere Lüftungskaverne, die in verschiedenen Etappen ausgebrochen und betoniert wurde. Der Kalottenausbruch erfolgte grösstenteils vorgängig vom Sicherheitsstollen aus.

Schacht und Zentrale Motto di Dentro

– Schacht

Der Lüftungsschacht Motto di Dentro ist als Schrägschacht ausgebildet. Er wurde in einer ersten Phase mit steigendem Vortrieb als Pilotstollen ausgebrochen und zwar durch eine vollmechanische Tunnelvortriebsmaschine (Typ Wirth). Die Maschine war mit einer kreuzweisen Abspannung versehen, die durch eine besondere Rückfallsicherung ergänzt war.

Im Bereich dünnplattiger Schiefer war nach dem Bohrkopfdurchgang stellenweise ein Aufblättern der Schichten festzustellen, das sich nach dem Anpressen und wieder Entlasten der Verspannplatten erheblich verstärkte. Die darauf zurückzuführenden Deformationen waren an mehreren Orten so gross, dass das ausgebrochene Profil für das Nachziehen der Rückfallsicherung nicht mehr genügte. Die aufgeblätternen Schiefer mussten von Hand mit einem Abbaupfropfen entfernt werden.

Bei Meter 580 ab Schachtfuss wurde eine stark geklüftete Zone von ca. 30 m Länge angetroffen. Dies äusserte sich zunächst in einer sehr starken Leistungssteigerung der Vortriebsmaschine, doch erfolgten kurz darauf jeweils beim Zurückziehen des Bohrkopfes im Zuge des Umsetzens der Verspannung mehrere Einbrüche vor dem Bohrkopf, was zu einem längeren Stillstand der Maschine führte. Die Klüftzone wurde gegen oben durch eine Verwerfung begrenzt, an der ein Gesteinswechsel von Glimmerschiefer zu Amphibolit erfolgte.

Die Vortriebsleistung betrug ca. 0,2–0,8 m/h. Zunächst wurde mit Warzenmeisseln gefahren, anschliessend (ab Meter 200) mit Diskenmeisseln und schliesslich ab Meter 650 wiederum mit Warzenmeisseln. Besonders in den Amphiboliten erwiesen sich die Diskenmeissel wegen zu hohem Verschleiss als ungeeignet.

Nach Erreichen der Schachtmündung wurde der Schrägschacht durch eine Erweiterungsmaschine von 3 m auf einen Durchmesser von 6,6 m von oben nach unten aufgeweitet. Dabei erfolgte der Abtransport des Ausbruchsmaterials in einer Schwemmrinne nach unten zur Kaverne Motto di Dentro. Kurz nach Beginn der Ausweitungsarbeiten bildete das Ausbruchsmaterial im untersten Schachtbereich einen Pfropfen, der nach kurzer Zeit sogar

das nachfliessende Wasser im Pilotschacht zurückstaute. Dieser füllte sich in kurzer Zeit mit Wasser und wurde dadurch zu einer erheblichen Gefahr für die im Strassentunnel im Bereich Motto di Dentro beschäftigten Personen. Man versuchte daher zunächst sorgfältig im Pfropfen wenigstens ein Entlastungsbohrloch anzubringen, was jedoch misslang. Durch schwache Sprengungen mit Knallzündschnur wurde weiterhin versucht, das Wasser zum Abfliessen zu bringen. Nachdem mehrere Versuche misslungen waren, entleerte sich der Schacht plötzlich von selbst mit einer Flutwelle durch den Tunnel. Dies erfolgte glücklicherweise während einer Arbeitspause, als sich niemand im gefährdeten Bereich aufhielt.

Beim Ausweiten des Schachtes waren infolge des grösseren Durchmessers auch die Aufblätternungen der Schiefer grösser, so dass sie über weite Strecken mit Ankern provisorisch gesichert werden mussten. Das Betonieren erfolgte anschliessend von unten nach oben.

– Zentrale

Für die Baustelleneinrichtungen am Schachtfuss wurden vorgängig im Bereich der späteren Kaverne grössere Ausbrüche vorgenommen. Dabei wurde eine bedeutende Mineralkluft mit mehreren Kubikmetern Kalzit und etwas Nadelquarz angefahren. In der Kaverne selbst erfolgte stirnseits, also etwa parallel zu den Schieferungsflächen, einige Niederbrüche, die nachgeankert werden mussten. Abgesehen davon bereitete der in Etappen erfolgte Kavernenausbruch keine besonderen Schwierigkeiten, obschon der Kavernenbereich von mehreren Klüften und Rutschelzonen durchzogen wird.

5.4 Felsmechanische Versuche, geotechnische Kennziffern

5.4.1 Übersicht

Felsmechanische Kennziffern von Gesteinen aus dem Bereich des Strassentunnels waren vor dessen Bau in Zusammenhang mit Steinbrüchen sowie dem Projekt der Urseren-Kraftwerke bestimmt worden (SONDER 1948). Sie beziehen sich durchwegs auf feste, bautechnisch günstige Gesteine. Der Ingenieur benötigte jedoch im Falle des Strassentunnels auch Daten für Modellrechnungen in den bautechnisch ungünstigeren Gesteinsserien, für die in der Literatur keine Angaben zu finden waren. Sie mussten daher während dem Bau an Proben aus dem Sicherheitsstollen, teilweise auch aus den Sohlstollen des Mesozoikums, ermittelt werden. Die Versuche zur Bestimmung der felsmechanischen Kennziffern wurden auf der Nordseite grösstenteils vom Laboratoire de géotechnique der EPUL (heute EPFL) durchgeführt. Im Vordergrund standen die Scherfestigkeitsparameter (Reibungswinkel Φ' , Kohäsion c'). Je nach der Konsistenz des Materials gelangten folgende Versuchstypen zur Anwendung:

- Direkte Scherung längs den interessierenden Trennflächen (kompaktes Gestein, das die Entnahme von Probekörpern erlaubt, die die zu untersuchende Trennfläche enthalten).

Eine Beschreibung der entsprechenden Apparatur und des Versuchsablaufes findet sich in den Publikationen von LOMBARDI & DAL VESCO (1967) sowie LOCHER (1968).

- Direkte Scherung im Apparat nach Casagrande (bei Entnahme von stark gestörten Proben, z. B. Lehm aus Ruschelzonen).
- Triaxiale Druckversuche (verlehnte Ruschelzonen und verlehntes Gestein, das die Entnahme mit einem geschlagenen Kernrohr ermöglichte).

In weichen, tonigen Gesteinen war auch das Quellverhalten der Gesteine von Interesse.

Weitere Untersuchungen über das felsmechanische Verhalten des Gebirges, wurden durch die Ingenieurgesellschaft z. T. in Zusammenarbeit mit dem ISETH, Zürich, durchgeführt. Die Resultate haben LOMBARDI (1976) und RECHSTEINER (1980) teilweise publiziert. Vollständig sind sie in einem abschliessenden Bericht der Ingenieurgesellschaft (Nr. 163-R-530 von 1982) zusammengestellt. Es handelt sich um:

- Verformungsmessungen mittels Extensometern in Bohrungen vom Sicherheitsstollen aus.
- Messungen des natürlichen Spannungszustandes.
- Deformationsmessungen in Form von Konvergenzmessungen.
- Bestimmung der Beanspruchung von Einbaubogen in der "Mesozoikums-Strecke".

Auf diese von der Ingenieurseite durchgeführte Messungen wird im folgenden nicht näher eingegangen.

5.4.2 Festigkeitsbestimmungen

Scherfestigkeiten

Sämtliche mit den verschiedenen Methoden erzielten Versuchsergebnisse sind in der Tabelle 12, Seite 48, zusammengestellt. Zu den verschiedenen Versuchen ist folgendes zu bemerken.

Bei der direkten Scherung an Aare-Granitproben wurden die Proben mit konstanter Geschwindigkeit bei elastischer Lagerung bezüglich der Normalkraft zuerst in die eine, dann in die andere Richtung geschoben. Die Werte für den Hin- und den Rückweg weichen z. T. stark voneinander ab. So wurden z. B. bei der Schieferung zu Beginn des Versuchs Reibungswinkel von 38–40°, beim Zurückschieben solche von 14–25° erhalten. Als mittleren Reibungswinkel errechnete das ausführende Labor den Mittelwert aus minimalem und maximalem Wert. Den natürlichen Verhältnissen (z. B. Grenzwinkel bei Felsrutschen) entsprechen jedoch eher die Bedingungen zu Versuchsbeginn, d. h. der aus den oberen Kurven des N-T-Diagrammes ermittelte Wert.

Von geotechnischer Bedeutung ist die festgestellte starke Reduktion der Scherfestigkeit von 28° auf 21°, die eine Probe aus dem Permokarbon bei Durchnässung erlitt. Auch die feuchte und verlehnte Kluftfläche im Aare-Granit wies mit 23° einen deutlich niedrigeren Reibungswinkel auf als die übrigen Proben.

Druck- und Zugfestigkeiten, Elastizitäts- und Verformungsmodul

Alle diesbezüglichen Versuchsergebnisse sind in der Tabelle 13, Seite 49, zusammengestellt. Die grösste Zahl von Versuchen wurde im Zusammenhang mit dem mechanischen Vortrieb im Schacht Motto di Dentro ausgeführt. Auffallend ist die niedrige Druckfestigkeit von 2 Proben aus dem Aare-Granit, die dem Bereich der Unterfahrung des Bahntunnels entnommen wurden. Dies obwohl die Proben relativ ungestört durch Kernbohrungen gewonnen wurden. Möglicherweise machten sich der Einfluss des Sprengvortriebes (Mikrorisse) sowie eventueller Spannungumlagerung bemerkbar. Die eine höhere Druckfestigkeit aufweisenden Proben aus dem Schacht Bänzberg stammen aus dem gebirgsschonend geätzten und statisch ein günstigeres Profil aufweisenden Schrägschacht.

Die Verformungsmoduli, die in einem Bohrloch des Juras bestimmt wurden, sind sehr niedrig und lassen auf ein deutlich anisotropes Verformungsverhalten schliessen. Die Werte sind möglicherweise durch den Bohrvorgang und das dadurch gestörte Gebirge noch zusätzlich herabgesetzt worden.

5.4.3 Quellversuche

Untersucht wurde die Quellfähigkeit von verlehnten Gesteinsproben aus dem Bereich der "Mesozoikums-Strecke", d. h. jenem Abschnitt mit stellenweise deformiertem Einbau, in dem auch das quellfähige Mineral Montmorillonit vorkommt. Bestimmt wurden der Quelldruck und die relative Quellung bei verschiedenen Belastungen.

Quelldrucke

Befriedigende Resultate wurden erst erreicht, nachdem die Proben vor Versuchsbeginn mit 30 kg/cm² oder 70 kg/cm² kompaktiert worden waren. Dadurch konnte der Effekt der beim Vortrieb und der Probenentnahme eingetretenen Auflockerung durch Entlastung wieder aufgehoben werden. Gemessen wurden die in der Tabelle 14 zusammengestellten Quelldrucke.

Werden Montmorillonitgehalte und Quelldruck einander gegenübergestellt, so ergibt sich keine Korrelation zwischen diesen Daten. Proben mit 30–50% Montmorillonit in der Tonfraktion wiesen mit 0,2–0,24 kg/cm² niedrigere Quelldrucke auf als eine direkt anschliessende Zone mit 5–15% Montmorillonit und Quelldrucken von 0,4–0,75 kg/cm². Ebenso besteht keine Beziehung zwischen Quelldrucken und Strecken mit deformiertem Einbau.

Die grössten Quelldrucke wurden in den tektonisierten Tonschiefern des Juras und im Übergang Jura/Permokarbon mit verlehnten mylonitisierten Gesteinen gemessen. Im Gips fand erwartungsgemäss keine Quellung statt.

Tabelle 12 Scherfestigkeiten

 ϕ' = Winkel der inneren Reibung c' = scheinbare Kohäsion

Gesteinsserie	Versuchsart	Art der Trennfläche, Probenmaterial	Sireubreite ϕ' (°)	Sireubreite (Mittel) c' (kg/cm ²)
Aare-Granit	direkter Scherversuch	Schieferungsflächen Kluftflächen z.T. chloritbelegt	27 – 32 30 – 33	0,4 – 1,3 0 – 2,4
	direkter Scherversuch erzwingene Scherung	Kluftflächen verlehmt, feucht Harnischfläche Harnischfläche, Mylonitzone verquarzt	23 26 28 – 31	0,5 0,7 2,0 – 4,8*
Südliche Gneiszone	direkter Scherversuch Triaxiale Scherfestigkeit	Schieferungsflächen verlehmt verlehnte Ruschelzone	25 – 29 32	0 0
Südgrenze Aar-Massiv	Triaxiale Scherfestigkeit	weisser verlehmt Mylonit	30	0
Mesozoikum, Jura	direkter Scherversuch	Schichtfläche Kalk	27,5	0
	direkter Scherversuch erzwingene Scherung modifizierter Apparat nach Casagrande Scherbüchse nach Casagrande Triaxiale Scherfestigkeit	Schichtfläche Kalk Tonschiefer z.T. tektonisiert feinplattige Kalke mit Tonschiefern, zerbrochen Tonschiefer	30,5 29 – 30 22 – 41 26 – 30	9,5 – 0 – 0,43 0
Mesozoikum, Trias	direkter Scherversuch modifizierter Apparat nach Casagrande	Schichtfläche Gips Gips mit tonigem Material	32 30 – 35	0 –
Permokarbon	direkte Scherung (18 Proben) erzwungene Scherung modifizierter Apparat nach Casagrande Scherbüchse nach Casagrande	Schieferungsflächen Schieferungsflächen Serizitschiefer z.T. verlehmt – verlehnte Schiefer – Ruschelzone erdfeucht – Ruschelzone nass	22 – 30 25 – 27 28 – 31 32 – 33 28 21 33 – 37 29	0 12 – 25* – – 0,3 0,2 0 0,7
	Triax (1 Versuch, Annahme $c' = 0$) Triax (konstruierte Tangente an Spannungskreise)			
Guspi-Zone (N-Rand)	direkte Scherung Casagrande-Apparat		29 – 35 34 – 37	
Fibbia-Granitgneis	direkte Scherung Casagrande-Apparat	Kluftflächen Kluftflächen	25 – 31,5 17 – 25	0,1
Rotondo-Granit	direkte Scherung	Kluftflächen	29 – 30,5	
Sorescia-Gneis	direkte Scherung	Schieferungsflächen Mittel Verwerfungsflächen (1) Kluftflächen Mittel	22 – 30,5 26,7 30,0 29,5 – 34,5 31,9	
Tremola-Serie	direkte Scherung	Schieferungsflächen Mittel Verwerfungsflächen Mittel Kluftflächen Mittel künstl. Fläche, gesägt	21 – 32 27,8 28,5 – 32 30,2 28,5 – 36 32,4 30,0	

* echte Kohäsion

Tabelle 13 Druck- und Zugfestigkeiten, Elastizitäts- und Verformungsmodul

Entnahmeort	Gesteinstyp oder Trennfläche	Bestimmte Kennzahl, Versuchsart	Versuchsergebnis (kg/cm ²)
Aare-Granit			
GSN 1000	massiger-flaseriger Granit	einachsige Druckfestigkeit \rightarrow S 30 - 50°	$\sigma_c = 630$
GSN 1027.8	gneisiger Granit	einachsige Druckfestigkeit	$\sigma_c = 610$
GSN 1028.8	massiger-flaseriger Granit	einachsige Druckfestigkeit	$\sigma_c = 1110$
Schacht Bätzberg	gneisiger Granit Proben aus Kalotte	einachsige Druckfestigkeit Mittelwert	$\sigma_c = 1876$
Schacht Bätzberg	gneisiger Granit Proben aus Brüst	einachsige Druckfestigkeit Mittelwert	$\sigma_c = 1987$
GSN 1019.3	stark verquarzte und rekristallisierte Mylonitzone	Zugfestigkeit, Brasilianer Test	$\sigma_{t \perp S} = 39$
GSN 1022.8	Schieferungsfläche gneisiger Granit	Zugfestigkeit, Brasilianer Test	$\sigma_{t \perp S} = 39$
GSN 2265	gneisiger-grobgebankter Granit	Elastizitätsmodul	E = 500'000
Mesozoikum der Urseren-Zone			
GSN 4080	graue bis hellgraue Kalke des Jura	einachsige Druckfestigkeit	$\sigma_c = 570$
		Elastizitätsmodul	E = 23'000
GSN 4230	feinplattige zerbrochene Kalke mit Tonschiefer- zwischen-schichten	Verformungsmessungen mit Dilatometer in Bohrloch Extensometer 1 Extensometer 2 Extensometer 3	E = 1'930 E = 635 - 1'265 E = 2'230
Permokarbon der Urseren-Zone			
GTN 4575	Serizitschiefer	einachsige Druckfestigkeit	$\sigma_c = 813$
		Elastizitätsmodul	E = 352'000
Schacht Hospental Kote 1364 m ü.M.	biotitführender Karbonat-Chlorit-Serizitschiefer feinlagig	einachsiger Druckversuch Elastizitätsmodul Zugfestigkeit Zugfestigkeit	$\sigma_c // S = 176$ E = 90'000 $\sigma_{t \perp S} = 12$ $\sigma_{t // S} = 60$
Sorescia-Gneis			
GSS 3480	Chlorit-Biotitgneis	Elastizitätsmodul	E = 275'000
Tremola-Serie			
Schacht Motto di Dentreo	Amphibolite Hornblendegneise Biotitgneise Serizitschiefer	einachsige Druckfestigkeit (Mittel) einachsige Druckfestigkeit (Mittel) einachsige Druckfestigkeit (Mittel) einachsige Druckfestigkeit (Mittel)	$\sigma_c = 1'403$ $\sigma_c = 1'227$ $\sigma_c = 1'168$ $\sigma_c = 1'480$
	Amphibolite Hornblendegneise Biotitgneise Serizitschiefer	Zugfestigkeit (Brasil-T., Mittel) Zugfestigkeit (Brasil-T., Mittel) Zugfestigkeit (Brasil-T., Mittel) Zugfestigkeit (Brasil-T., Mittel)	$\sigma_t = 87$ $\sigma_t = 91$ $\sigma_t = 105$ $\sigma_t = 115$
	Amphibolite Hornblendegneise Biotitgneise Serizitschiefer	Elastizitätsmodul Elastizitätsmodul Elastizitätsmodul Elastizitätsmodul	E = 399'000 E = 373'000 E = 388'000 E = 670'000

GSN = Sicherheitsstollen Nordseite, Zahl = Tm N GTN = Tunnel Nordseite GSS = Sicherheitsstollen Südseite, Zahl = Tm S

Tabelle 14 Quelldrucke bei verhinderter Deformation							
Gestein	P_K	Proben- zahl	Wassergehalt		Montmorillonitgehalt (Gew. %)		Quelldruck (kg/cm ²)
			W_0	W_1	Tonfraktion	Gesamtgestein	
Tonschiefer und Kalke, Jura	70	3	0,4 - 0,6	-	< 5 - 10	< 5	1,1 - 4,0
verlehmter Uebergang Jura/Trias	0	1	0,8	-	15	5	6,2
Gips, Trias	0	2	0 - 0,5	-	0	0	0
Zersetzte Serizitschiefer Permo- karbon	0	2	0,9 - 9,4	9,6 - 10,4	} 5 - 50	≤ 5	0,15 - 0,24
idem	30	6	< 0,5	12,8 - 14,8			0,25 - 0,75
idem	70	5	< 0,5 - 2	12,7 - 15,7			0,2 - 0,8

P_K = Kompaktierungsdruck W_0 = Wassergehalt Versuchsbeginn W_1 = Wassergehalt Versuchsende

Tabelle 15 Relative Quellung bei verschiedenen Belastungen (Angabe der Spannweiten)							
Gesteinsserie	P_K (kg/cm ²)	W_0 (%)	W_1 (%)	relative Quellung (%) bei Belastungsstufen P_1 (kg/cm ²)			
				0,011	0,5	1	5
Jura	0	0,6	1,1	0,3	0,1	0,1	0
	0	4,1 - 14,8	10,8 - 15,0	3,0 - 7,45	0,65 - 2,05	0,45 - 1,25	0 - 0,1
	70	2,8 - 3,8	4,4 - 7,5	0,2 - 13,5	0,05 - 4,25	0,05 - 2,8	0 - 0,6
Trias	0/70	1,0 - 9,8	1,5 - 12,4	0,2 - 0,35	0 - 0,2	0 - 0,15	0
Permokarbon	0	< 0,5 - 0,9	8,8 - 19,6	1,4 - 6,95	0,5 - 1,1	0,3 - 0,7	0 - 0,1
	0	3,2 - 6,9	4,2 - 8,2	-0,05 - 5,0	-0,95 - 0,35	-1,05 - 0,1	-0,2 - 0
	70	< 0,5 - 1,0	13,1 - 15,6	0,35 - 4,55	0,1 - 1,1	0,1 - 0,75	0 - 0,1

P_K = Kompaktierungsdruck

W_0 = Wassergehalt Versuchsbeginn

$P_K = 0$ = natürlicher Zustand

W_1 = Wassergehalt Versuchsende

P_1 = Laststufe

Bestimmung des Quellmasses

Um die Quellung zu bestimmen wurden die meisten Proben ebenfalls vorgängig kompaktiert, dann zuerst belastet, entlastet, wieder belastet und vor der erneuten Entlastung Wasser zugegeben (HUDER & AMBERG 1970).

Bestimmt wurde die relative Quellung als Differenz der Entlastungskurven von der trockenen und der durchnässten Probe. Bei der Wasserzugabe, die beim Maximaldruck von 8 bis 12,5 kg/cm² erfolgte, kam es hauptsächlich bei den nicht vorbelasteten Proben zu erheblichen Schrumpfung. Sie hatten zur Folge, dass bei Versuchsende als Gesamtergebnis teilweise eine Schrumpfung vorlag.

Die Versuchsergebnisse sind in der Tabelle 15 zusammengefasst, wobei die Aufgliederung nach Gesteinsserien und innerhalb diesen nach Kompaktierungsdruck und Anfangswassergehalt erfolgte. In Bezug auf die Stützmassnahmen beim Tunnel ist die Tatsache wichtig, dass bei den Proben aus dem Permokarbon der Quelldruck sehr stark absinkt, falls kleine Deformationen zugelassen werden, und dass bei der Mehrzahl der Proben bei einem Druck von mehr als 1 kg/cm² bereits eine Setzung stattfindet.

Werden Quellmass und Quelldruck miteinander verglichen, so zeigen die Proben aus dem Permokarbon keine gegenseitige Beziehung. Einzig im Jura tritt die für Mergel typische Erscheinung auf, dass Proben mit grösserer Quellung auch einen höheren Quelldruck erzeugen.

Der Versuchsablauf zeigte im übrigen, dass es im Bereich der Mesozoikums-Strecke nicht möglich war, einigermaßen ungestörte Proben zu entnehmen. Die Versuche sind aber insofern auf den Tunnel anwendbar, als der gestörte Probenzustand den im gestörten Auflockerungsbereich um den Tunnel effektiv vorhandenen Verhältnissen entspricht.

5.5 Ausbruchsklassenverteilung

5.5.1 Übersicht

Die Ausbruchsklassen sind in den Ausschreibungsunterlagen anhand des Sicherungsaufwandes, der für die Zeit bis zum Einbringen des definitiven Einbaus notwendig ist, klar definiert (Anhang 2). Im Sicherheitsstollen konnte dieses

Ausbruchsklassensystem problemlos während der ganzen Bauzeit angewendet werden. Auf der Nordseite führte die im Tunnel vorgenommene Umstellung auf einen Kalottenvortrieb bei Tm N 2312 zu einer Auseinandersetzung zwischen Unternehmung und Bauleitung, über die anzuwendenden und zu bezahlenden Ausbruchsklassen.

Sie führte zu einer Zweiteilung der Ausbruchsklassen, nämlich in jene aufgrund der effektiven Sicherungsmassnahmen beim Kalottenvortrieb und jene für die Bezahlung des gesamten Tunnelausbruches (Details siehe III. Teil des Schlussberichtes). Die letztere ist in die entsprechende Zeile des geotechnischen Horizontalschnittes, Beilage 4a, eingetragen. Für geologisch-geotechnische Fragestellungen bleibt jedoch die Erstere massgebend, da sie sich auf die effektiv notwendigen Sicherungsmassnahmen in der für die Standfestigkeit des Tunnels massgebenden Kalotte bezieht, der ursprünglichen Definition entspricht und einen Vergleich mit der Prognose erlaubt. Im folgenden werden daher nur diese effektiven Ausbruchsklassen gemäss Definition berücksichtigt.

Zuerst wird auf einige allgemeine Tendenzen hingewiesen, die sich in Bezug auf die Ausbruchsklassen nicht nur beim Gotthard-Strassentunnel sondern auch beim Seelisbergtunnel abzeichnen. Anschliessend wird auf die Ausbruchsklassenverteilung eingegangen, wobei diese im Aare-Granit aufgrund des Wechsels vom Vollausbuch zum Kalottenvortrieb speziell behandelt wird.

5.5.2 Allgemeine Tendenzen

Die Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (SUVA) verlangt in nicht verkleideten unterirdischen Ausbruchsstrecken (= Ausbruchsklasse I) von mehr als 3 m Höhe einen *Steinfallschutz* (engmaschiges Netz oder gleichwertige Massnahme). Die Erfahrungen hatten nun gezeigt, dass der Kopfschutz in Form eines leichten mit Felsnägeln befestigten Maschendrahtnetzes sich nicht bewährte. Das Herunterfallen von Steinen konnte zwar verhindert werden, doch mussten bei tatsächlichem Nachfall die Netze periodisch aufgeschnitten, gesäubert und anschliessend wieder angebracht resp. ersetzt werden. Aus diesem Grunde gelangte diese Art von Steinfallschutz auf der Nordseite nach der Umstellung auf den Kalottenvortrieb nicht mehr zur Anwendung. Ein Übergang zu einem Gunitauftrag als Kopfschutz bedeutete jedoch nach der Definition der Ausbruchsklassen, eine Zuteilung in die Klassen II oder III.

Das Problem der Sicherheit der Vortriebssequipen ist weitgehend auch ein Installationsproblem. Sowohl der Vergleich zwischen dem Nordteil und dem Südteil des Gotthard-Strassentunnels wie auch mit dem Seelisbergtunnel zeigt, dass ein direkter Zugang zur frischen Ausbruchfläche grosses Gewicht hat. Er ermöglicht das Säubern von losen angeschoenen Felspartien aus nächster Nähe. Auf der Südseite war dies von der auf dem Sliding Floor verschiebbaren Sicherungsbühne aus möglich. Auf der Nordseite bestand diese Möglichkeit ausserhalb des Bereiches der Ladeschaufel

des Baggers nicht. Die Säuberung der Kalotte erfolgte teilweise mittels schlecht zu handhabenden 4 m langen Eisenstangen (!) vom Schutterhaufen aus. Als unrealistisch erwies sich angesichts der im Vortriebsbereich naturgemäss dauernd wechselnden Verhältnisse auch das auf der Nordseite gewählte starre Sicherungskonzept mit den auf dem Bohrwagen 8 m hinter der Brust fest montierten Ankerbohrflaffetten. Diese erlaubten es z. B. nicht, direkt im Vortriebsbereich zu sichern. Aus diesem Grunde hielt die SUVA bei der Diskussion über den Übergang zu einem Kalottenvortrieb fest, dass mit den damals auf dem Platz vorhandenen Installationen und der damals vorhandenen Qualität der Vortriebssequipen ein Teil- ausbruch die richtige Lösung sei.

Die Erfahrungen haben ferner gezeigt, dass mit der *Ausbruchsklasse III* ein sehr breites Spektrum von Interventionsmöglichkeiten vorhanden ist. Dieses reicht von einem einfachen sofortigen Gunitauftrag, im Falle von leicht gebrächem Fels, bis zu einem armierten Spritzbetongewölbe mit Ankern, Spritzbeton und Netzen in gebrächem Gebirge.

Vor allem vermag der armierte Spritzbeton häufig die Aufgabe des Stahleinbaus zu übernehmen, so z. B. im Falle von nicht allzu ausgedehnten Einzelstörungen oder von Strecken mit leicht gebrächem bis gebrächem Fels.

Hat sich ein gewisser *Arbeitsrhythmus* bei einem bestimmten Vorgehen einmal *eingespielt*, so ist eine deutliche Tendenz vorhanden, diesen beizubehalten. So zeigt sich insbesondere eine gewisse Trägheit beim Abgehen von der relativ sicheren Klasse III.

Im Grunde genommen gehört auch die Zusammenfassung der geotechnisch schwierigen Strecken im Übergang Mesozoikum/Permokarbon zu einer einheitlichen "Mesozoikums-Strecke" zur Tendenz ständige Umstellungen des Arbeitsablaufes möglichst zu vermeiden.

Wird noch das im nächsten Abschnitt beschriebene Bestreben nach möglichst weitgehendem Verzicht auf Stahleinbau hinzugenommen, so ergibt sich, dass in neueren Tunnels sowohl von der leichten Ausbruchsklasse I wie auch von der schweren Ausbruchsklasse IV her, eine Verschiebung zu den mittleren Klassen II und III erfolgt.

5.5.3 Einbaustrecken

Das Stellen von Stahleinbaubogen ist in grossen Querschnitten mühsam, zeitraubend und damit auch kostspielig, falls nicht spezielle Installationen für die Montage vorhanden sind. In einem Gebirge mit vorwiegend standfestem bis leicht gebrächem Fels, in dem nur mit kurzen Einbaustrecken zu rechnen ist, lohnt sich das Anschaffen spezieller Montagevorrichtungen nicht. Da bei einer Umstellung auf Einbau erfahrungsgemäss jedesmal viel, nicht einprogrammierte, Zeit verloren geht, wird die Klasse IV (= Einbau vor Ort) in grösseren Tunnels möglichst vermieden. In Stollen mit kleinen Querschnitten ist das Stellen von Stahlrahmen noch gebräuchlicher, da es leichter zu bewältigen ist.

Tabelle 16 Einbaustrecken		SiSto = Sicherheitsstollen Tu = Tunnel	
Strecke (Tm)		Schichtserie	Einbaugrund, Bemerkungen
SiSto	Tu		
Nordseite (Tm N)			
(-12) - 82	0 - 162	Lockergestein Uebergang Fels	kohäsionsloses Lockergestein Uebergangszone Lockergestein/Fels, Tu = Teilausbruch deutsche Bauweise
	1014 - 1056	Aare-Granit	Unterfahrung Bahntunnel, Einbau Kalotte (System Bernold)
	1391 - 1394,5	Aare-Granit	Einbau nach 6 Monaten, schiefriger Lamprophyr mit Nässe
	1476,7 - 1491,7	Aare-Granit	Einbau nach 6 Monaten, schiefriger Lamprophyr
	1968,0 - 1995,5	Aare-Granit	1. Unfallstelle, ungünstige Verschneidung, Lamprophyr, flach südfallende Kluft
	2026,85 - 2037,2	Aare-Granit	verlehnte Ruschelzone
	2046,2 - 2053,1	Aare-Granit	schiefriger Lamprophyr
	2079,85 - 2088,1	Aare-Granit	schiefriger Lamprophyr mit stark geklüftetem Begleitgestein
	2125,2 - 2128,7	Aare-Granit	schiefriger Lamprophyr
	2204,2 - 2236,2	Aare-Granit	mehrere Lamprophyre, kleinklüftiger Granit
	2287,0 - 2330,8	Aare-Granit	Lamprophyr gefolgt von hydrothermal zersetztem Granit, 2. Unfallstelle, ab Tm 2312,4 Einbau System Bernold in Kalotte
Umstellung auf Kalottenvortrieb			
	3384 - 3403	Südliche Gneiszone	Schar von verlehnten 10 - 30 cm mächtigen Ruschelzonen
	3494 - 3506	Südliche Gneiszone	Schar von schieferungsparallelen verlehnten Ruschelzonen
	3646 - 3655	Südliche Gneiszone	1 m mächtige Mylonitzone in entfestigten Glimmerschiefern
4934 - 4046	4051,5 - 4076,75	Grenze Aar-Massiv/ Urseren-Zone	tektonischer Kontakt Aar-Massiv/Urseren-Zone mit mehre- ren verlehnten Myloniten
4142 - 4359,5 4392 - 4421	4128 - 4452	Mesozoikum/ Permokarbon	"Mesozoikumsstrecke" Tonschiefer und Wechsellagerung Tonschiefer/Kalke mit Wasserandrang im Jura; verlehnte Phyllite im Permokarbon
5296,5 - 5315,7	5305,6 - 5331	Permokarbon	Serizitschiefer bis Phyllite z.T. verlehmt, 3 m mächtige Störung
6296,8 - 6303		Paragneise	4 - 5 m mächtige, durchnässte Störzone
6835,3 - 6840,7	6853,8 - 6862,5	Paragneise	20 - 50 cm mächtige verlehnte Ruschelzonen
Südseite (Tm S)			
3 - 53		Trias	Rauhwarke, zuckerkörniger Dolomit, SiSto Bernold-Bleche
53 - 252 369 - 403	0 - 506	Tremola-Serie	Portalbereich, offene Klüfte, Wasser
544 - 552 742 - 751	560 - 728 773 - 783 798 - 808	Tremola-Serie	Schar paralleler Klüfte, Wasser, Ruschelzonen
1172 - 1178	1127 - 1153	Tremola-Serie	Gneis stark verschiefert
1591 - 1621 1665 - 1673 1722 - 1728 1810 - 1819	1598 - 1893	Tremola-Serie	offene Klüfte, Wasser Ruschelzone Gneis stark verschiefert Gneis stark verschiefert
2195 - 2202		Tremola-Serie	Mylonit in stark zerbrochenem Quarzit
	2275 - 2350	Tremola-Serie	Gewölbeaufweitung Lüftungszentrale
3379 - 3388	3348 - 3361	Sorescia-Gneis	Ruschelzone in Aplit, Wasser
3471 - 3478 3533 - 3545	3428 - 3513	Sorescia-Gneis	Uebergang zu Rotondo-Granit
3915 - 3919	3876 - 3939	Fibbia-Granit	Mylonit, 2 Lamprophyre
4197 - 4207 4231 - 4256 4284 - 4291 4335 - 4346	4164 - 4328	Fibbia-Granit	Ruschelzonen Ruschelzone, Zerrkluft, Wasser flachliegende Klüfte flachliegende Klüfte
4726 - 4733	4727 - 4844	Guspis-Zone	Paragneise verschiefert
4936 - 4939 4963 - 4984 5047 - 5247 5264 - 5270 5284 - 5302	4921 - 5298	Guspis-Zone	Paragneise z.T. druckhaft
5346 - 5352	5326 - 5339	Guspis-Zone	Mylonite
5411 - 5418 5609 - 5613 5768 - 5784 5818 - 5824 5862 - 5866 6332 - 6340 6374 - 6381 7082 - 7093 7291 - 7305		Gamsboden-Granit Gamsboden-Granit Gamsboden-Granit Gamsboden-Granit Gamsboden-Granit Gamsboden-Granit Gamsboden-Granit Gamsboden-Granit Gamsboden-Granit	Mylonit, Klüfte, Wasser Kataklasit hydrothermal gelöster Granit Kluft, Wasser Kluft, Wasser Ruschelzone, Wasser Ruschelzone zwischen 2 Lamprophyren, Wasser 2 offene Klüfte, Wasser blockig, Wasser

Aus der Tabelle 16, Seite 52, und den Anhängen 4a und 4b geht hervor, dass auf der Nordseite der Hauptanteil der Einbaustrecken auf 3 Abschnitte beschränkt ist:

- die Lockergesteinsstrecke beim Nordportal (deutsche Bauweise)
- die Zone mit Lamprophyren im Aare-Granit
- die Mesozoikums-Strecke (deutsche Bauweise).

Die zunehmende Tendenz vom Einbau ab- und zu einem armierten Spritzbeton überzugehen, wird bei einem Vergleich petrographisch ähnlicher Serien deutlich. Wurden in der südlichen Gneiszone des Aar-Massivs noch 4 Strecken eingebaut, so waren es im Permokarbon und in der nördlichen Paragneiszone des Gotthard-Massivs noch je eine, dies obwohl sich die geotechnischen Verhältnisse nicht wesentlich unterscheiden.

5.5.4 Ausbruchsklassen im Aare-Granit (Vollausbruch/Teilausbruch)

In der etwas mehr als 3 km langen Aare-Granitstrecke wurde auf der Nordseite von *Vollausbruch* zu *Teilausbruch* (Kalotte/Strosse) übergegangen. Die beiden tödlichen Unfälle im Aare-Granit waren Anlass zu dieser Umstellung. Der erste Unfall bei Tm N 1990 hatte zur Folge, dass die Weisung an die Unternehmung erging, in Zukunft jede kritische Störung (Ruschelzone, Lamprophyre) einzubauen (Ausbruchsklasse IV). Nach dem zweiten Unfall bei Tm N 2309 erklärte sich die Unternehmung "ausserstande die Verantwortung, den Tunnel im Vollausbruch weiter vorzutreiben, zu übernehmen". Sie schlug vor, auf einen zweiphasigen Ausbruch (Kalotte/Strosse) überzugehen. Oberbauleitung und Bauleitung stimmten dieser Umstellung auf Zusehen hin zu.

Um zu überprüfen welcher Zusammenhang zwischen Ausbruchsklassenverteilung im Aare-Granit gemäss effektiven Sicherungsmassnahmen und der Geologie besteht, kann dieser aufgrund der geotechnischen Homogenbereiche gegliedert werden. (Tabelle 17a, Seite 54). Noch krassere Unterschiede bezüglich Ausbruchsklassenverteilung zeigt eine Aufteilung nach dem Baugeschehen (Tabelle 17b, Seite 54).

Aufgrund der effektiv ausgeführten Sicherungsarbeiten ergibt sich eindeutig, dass diese südlich von Tm N 2331 der Ausbruchsklasse II entsprechen. Dies nicht zuletzt auch im Hinblick auf die SUVA-Vorschriften hinsichtlich Steinfallschutz. Die Umstellung auf einen Kalottenvortrieb kann somit eindeutig nicht auf geologisch-geotechnische Gründe zurückgeführt werden.

5.5.5 Ausbruchsklassenverteilung im Tunnel

Die Längenanteile der Ausbruchsklassen in den verschiedenen Gesteinsserien geht aus der Tabelle 18, Seite 55, hervor. Sie

zeigt, dass auf der Nordseite im Tunnel nach der Umstellung auf den Kalottenvortrieb kein Ausbruch mehr in die Ausbruchsklasse I fiel. Ferner ist aus ihr ersichtlich, dass im Bereich der Ausbruchsklassen II und III ein gewisser Interpretationsspielraum vorhanden ist. So wurde im Gamsboden-Granitgneis der Bereich nördlich des Durchschlages bei Tm N 8182,4 (Los Murer) in der Ausbruchsklasse II, jener südlich davon (Konsortium Süd) in der Ausbruchsklasse III abgerechnet, obwohl zwischen den beiden Strecken in geologisch-geotechnischer Hinsicht kein Unterschied besteht. Die Tabelle spricht weitgehend für sich. Folgende Punkte bedürfen jedoch einer Erläuterung:

- Im *Mesozoikum* wurde im *Sicherheitsstollen* die gesamte Einbaustrecke zu Gunsten der Unternehmung zusammenfassend in Klasse VI abgerechnet. Die Verzugsbleche wurden durchwegs von vorne her eingelegt und nicht nach Marciavantiart geschlagen (Bedingung für Ausbruchsklasse VI). Dagegen ist die zweite Bedingung einer Zuordnung aufgrund des Brustverzuges wenigstens teilweise gegeben (siehe auch Anhang 5).
- Im *Permokarbon* gilt das gleiche für die auf die Trias folgende Zone bis Tm N 4347 des Sicherheitsstollens, die ebenfalls der Klasse VI zugeordnet wurde, obwohl ein vollständiger Brustverzug nur an Wochenenden gesetzt wurde.
- in der "*Mesozoikums-Strecke*" des Tunnels wurde der Abschnitt bis Tm N 4385 der Ausbruchsklasse VI zugeordnet. Das sogenannte "*Mesozoikum Süd*", in dem wesentlich günstigere Verhältnisse angetroffen wurden, dagegen der Ausbruchsklasse V zugeteilt.

Im Los Süd installierte die Unternehmung eine Vortriebsrichtung, die die Felsklassenverteilung im Tunnel mitbeeinflusste. Auf einem sogenannten "Sliding Floor" waren zwei parallele Gleise fest auf einer Grundplatte montiert. Diese konnte in 5 Segmenten mittels hydraulischer Pressen auf der Tunnelsohle nach vorn geschoben werden. An den Längskanten war ein zusätzliches Schienenpaar befestigt, auf dem ein Schutzdach längsverschiebbar aufgesetzt war. Das Schutzdach diente gleichzeitig als Arbeitsbühne für Sicherungsarbeiten in der Tunnelkalotte. Anker und Drahtnetze konnten daher rasch und sicher eingebracht werden.

Die Granitstrecken wurden daher im Südlos, wo immer möglich, im Vollausbruch aufgefahren. Beim Kalottenvortrieb musste der Sliding Floor jeweils zurückgelassen werden, für Sicherungsarbeiten stand das Schutzdach dann jeweils nicht mehr zur Verfügung. Die Umstellung auf Kalottenvortrieb erfolgte daher nur dort, wo die Standfestigkeit des Gebirges absolut keinen Vollausbruch erlaubte. Dies betrifft hauptsächlich Störungszonen in denen neben dem Ausbruchprofil insbesondere auch die Ortsbrust instabil war (Ausbruchsklassen V und VI).

Tabelle 17 Ausbruchsklassenverteilung im Aare-Granit beim Tunnel			
a) Ausbruchsklassenverteilung in den verschiedenen Homogenbereichen des Aare-Granites (%)			
Ausführungs- klasse	geotechnische Homogenbereiche		
	Tm N 135 - 1387	Tm N 1387 - 2386	Tm N 2386 - 3238
I	83,2	76,4	-
II	14,6	9,4	100
III	-	6,6	-
IV	-	5,8	-
V	1,8 [*]	1,8 ^{**}	-
VI	0,4 [*]	-	-
b) Ausbruchsklassenverteilung bei Unterteilung der Aare-Granitstrecke anhand des Baugeschehens (%)			
Ausbruchs- klasse	Tm N 162 - 1968 (1. Unfall)	Tm N 1968 - 2330,8 (1. Unfall - 2. Unfall)	Tm N 2330,8 - 3238 (2. Unfall - Süd- grenze Aare-Granit)
	Abschnittslänge 1806 m	Abschnittslänge 362,8 m	Abschnittslänge 907,2 m
I	88,2	58,8	-
II	11,8	2,2	100
III	-	18,0	-
IV	-	15,9	-
V	-	5,1 ^{**}	-
VI	-	-	-

^{*} Übergangszone Lockergestein/Fels

^{**} gemäss Vereinbarung Bauleitung AGN ohne Rücksicht auf Definition der Ausbruchsklassen

Tabelle 18 Ausbruchsklassenverteilung

Gesteinsserie	Längenanteile der verschiedenen Ausbruchsklassen, Befund (im Tunnel effektiv gemäss Definition Ausschreibungsunterlagen resp. Vertrag, d.h. Kalottenvortrieb Nordseite = Sicherungsmassnahmen in Kalotte)												
	Ausbruchsklassenlängen (m)						Prozentualer Anteil (%)						
	I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI	
Tunnel	Lockergestein	-	-	-	-	-	135	-	-	-	-	-	100
	Aare-Granit	1805,3	1129,2	65,5	57,6	40,15	5,25	58,2	36,4	2,1	1,8	1,3	0,2
	Südliche Gneiszone	-	635	138,5	57,5	-	-	-	76,4	16,7	6,9	-	-
	Mesozoikum	-	-	50,0	16,0	-	152,0	-	-	22,9	7,4	-	69,7
	Permokarbon	-	419	765,7	38,5	54	98	-	30,5	55,7	2,8	3,9	7,1
	Paragneise Gotthard-Massiv	-	971,6	409,7	8,7	-	-	-	69,9	29,5	0,6	-	-
	Gamsboden-Granitgneis Nords.	-	1080,4	100,6	-	-	-	-	91,5	8,5	-	-	-
	Gamsboden-Granitgneis Süds.	-	-	2612	-	-	-	-	-	100	-	-	-
	Guspis-Zone	-	37,5	357,6	3,5	118,9	383,5	-	4,1	39,7	0,4	13,2	43,6
	Fibbia- und Rotondo-Granit	-	353,25	380,75	-	206,45	23,6	-	36,6	39,5	-	21,4	2,5
Sicherheitsstollen	Sorescia-Gneis	-	271,35	132,7	-	78,4	24,5	-	53,5	26,2	-	15,5	4,8
	Tremola-Serie	98,3	243,9	1497,05	76,8	926,95	132	3,3	8,2	50,3	2,6	31,2	4,4
	Total Tunnel	1903,6	5141,2	6510,1	258,6	1424,85	953,85	11,8	31,7	40,2	1,6	8,8	5,9
	Lockergestein	-	-	-	-	-	85	-	-	-	-	-	100
	Aare-Granit	3097,9	29,5	-	0,8	-	6,8	98,8	0,95	-	0,03	-	0,22
	Südliche Gneiszone	648,1	37,0	145,9	-	-	-	78,0	4,45	17,55	-	-	-
	Mesozoikum	-	-	94,5	-	-	121,5	-	-	43,8	-	-	56,2
	Permokarbon	895,0	181,5	233,9	29,1	-	94,5	62,4	12,7	16,3	2,0	-	6,6
	Paragneise Gotthard-Massiv	1216,8	69	86,2	-	-	-	88,7	5,0	6,3	-	-	-
	Gamsboden-Granitgneis Nords.	939	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-
Sicherheitsstollen	Gamsboden-Granitgneis Süds.	2562,9	210,2	40,9	54,9	-	22,1	88,6	7,3	1,4	1,9	-	0,8
	Guspis-Zone	303,1	138,7	185,25	167,9	-	99,05	33,9	15,5	20,7	18,8	-	11,1
	Fibbia- und Rotondo-Granit	376,2	435,7	78,1	34,6	-	15,4	40,0	46,4	8,3	3,7	-	1,6
	Sorescia-Gneis	386,8	96,3	19,0	17,65	-	8,25	73,3	18,2	3,6	3,3	-	1,6
	Tremola-Serie	1740,2	679,6	236,95	209,3	-	92,95	58,8	23,0	8,0	7,1	-	3,1
	Trias	-	-	-	44	-	12	-	-	-	78,6	-	21,4
	Total Sicherheitsstollen	12166,0	1877,5	1120,7	558,25	-	557,55	74,7	11,6	6,9	3,4	-	3,4

* ohne Zentrale Hospental (49,8 m)

** Beginn bergmännischer Vortrieb 3 m ausserhalb theoretischem Portal

5.6 Vergleich Prognose – Befund

Die Schwierigkeiten

- in der Lockergesteinszone Nord
- in der Mesozoikums-Strecke

wurden durch einen entsprechenden Anteil an Ausbruchsklasse VI klar prognostiziert und waren die Hauptursache für die Verkürzung des Loses Nord. Diese "geotechnischen Schwierigkeiten" waren somit keine Überraschung.

Nicht prognostiziert waren jedoch Fälle wie der hydrothermal zersetzte Granit. Gesamthaft gesehen war die Prognose im Falle des Gotthard-Strassentunnels eher zu pessimistisch.

Das Verhalten der Gesteine des Permokarbons beim Ausbruch des Gotthard-Strassentunnels darf als positive Überraschung bezeichnet werden, wurde doch in der Prognose für den 715 m langen Nordteil der Permokarbons mit 75% Einbau in den Klassen IV – VI, für den 625 m langen Südteil mit 35% Einbau in der Klasse IV gerechnet. In der rund 1400 m langen Permokarbonstrecke stehen einem prognostizierten Anteil der Ausbruchsklassen mit sofortigem Einbau (IV – VI) von 56,4% lediglich 13,8% effektiv notwendiger Einbau gegenüber.

Deutlich ungünstiger als prognostiziert ist dagegen die Ausbruchsklassenverteilung im Mesozoikum. Im Sicherheitsstollen fallen die Ausbruchsklassen I und II ganz weg und die Einbaustrecke (56,2%) wurde vollständig der Ausbruchsklasse VI zugeordnet. Im Tunnel hat die Zusammenfassung zur einheitlich ausgebrochenen Mesozoikums-Strecke zur Folge, dass nicht wie prognostiziert vorwiegend Klasse IV und V zur Anwendung gelangte, sondern weitaus der grösste Teil in die Klasse VI fällt.

Aber selbst im Mesozoikum stimmen Prognose und Befund in der Grössenordnung überraschend gut miteinander überein, wenn die Strecken mit Einbauklassen jenen ohne Einbauklassen gegenüber gestellt werden (Tabelle 19).

Ausbruchsklassen	Sicherheitsstollen		Tunnel	
	Prognose	Befund	Prognose	Befund
ohne Einbau (I – III)	50	43,8	25	22,9
mit Einbau (IV – VI)	50	56,2	75	77,1

Ein Vergleich zwischen Prognose und Befund wird erleichtert, wenn die leichten Ausbruchsklassen I und II zusammengefasst werden. Dies, weil im Tunnel nach der Umstellung auf den Kalottenvortrieb durchwegs eine Sicherung mit Gunit vorgenommen wurde (Ausbruchsklasse II) und folglich die

Ausbruchsklasse I faktisch nicht mehr existierte. Wird die gesamte Tunnelstrecke der Nordseite aus diesem Gesichtswinkel als Ganzes betrachtet und nach dem geotechnischen Schwierigkeitsgrad aufgeschlüsselt, so ergibt sich die in Tabelle 20 zusammengestellte prozentuale Verteilung.

geotechnischer Schwierigkeitsgrad	Sicherheitsstollen		Tunnel	
	Prognose	Befund	Prognose	Befund
leicht, Sicherung hinter der Vortriebszone (Ausbruchsklassen I und II)	76,5	88,8	69,3	73,3
mittelschwer, Sicherung im Bereich der Vortriebszone (Ausbruchsklasse III)	8,7	7,0	10,8	18,6
schwer, sofortiger Einbau (Ausbruchsklassen IV – VI)	14,8	4,2	19,9	8,1

Die Vergleiche zeigen, dass gesamthaft, d.h. über die ganze Tunnellänge gesehen Prognose und Befund bezüglich des geotechnischen Schwierigkeitsgrades gut miteinander übereinstimmen, dass aber gerade in Bezug auf die schweren, zeitraubenden und kostspieligen Ausbruchsklassen IV – VI die geotechnischen Verhältnisse günstiger waren als prognostiziert. Dies gilt sowohl für den Sicherheitsstollen wie für den Tunnel.

Einzig in der allerdings aufwendigsten und kostspieligsten Ausbruchsklasse VI ist auf der Nordseite im Tunnel der Anteil mit 4,7% rund doppelt so gross als prognostiziert (2,3%). Mindestens teilweise ist dies allerdings der Zusammenfassung der geotechnisch schwierigen Strecken im Bereiche des Übergangs Mesozoikum/Permokarbon zuzuschreiben.

Im Los Süd entspricht im Sicherheitsstollen der Hauptanteil des Ausbruchs (Klasse I) recht genau der Prognose. Klasse II trat nur auf 10% der Strecke auf, wobei 16% prognostiziert waren. Die Klassen III, IV und VI traten häufiger auf als vorgesehen. Die Abweichungen von der Prognose waren in keiner Klasse grösser als 7% (absolut). Es kann somit festgehalten werden, dass die im Sicherheitsstollen angetroffenen Ausbruchsklassen weitgehend der Prognose entsprachen.

Im Strassentunnel kam die Ausbruchsklasse I – obwohl mit 66% prognostiziert – praktisch nicht zur Anwendung. Wegen der grossen Firsthöhe war fast überall ein verstärkter Kopfschutz in der Kalotte nötig, oft sogar eine massivere Systemankerung. Daher wurden schliesslich 54% in Klasse III und 24% in Klasse II abgerechnet. Die Klassen V (14%) und VI (4%) sind wesentlich stärker vertreten als im voraus angenommen. Ein Teil der Klasse V entfällt, wie im Kapitel 5.2.10, Seite 35, dargelegt, auf die Klasse V* und ist somit nicht direkt geologisch bedingt. Gesamthaft gesehen waren die im Strassentunnel im Los Süd angetroffenen Verhältnisse deutlich schlechter als prognostiziert.

6. BERGWASSER

6.1 Hydrogeologische Übersicht

Gebirgsdurchlässigkeit

Als Folge der alpinen Epimetamorphose im Gotthardgebiet ist das Gestein im Handstückbereich dicht. Das Gebirge ist dagegen auf Klüften und Störungen durchlässig. Stärker geklüftet und damit durchlässiger sind alle rigiden Gesteine, d.h. Kalke, helle quarz-feldspatreiche Gneise und granitische Gesteine. Schlecht durchlässig sind alle schiefrigen Gesteinstypen wie Glimmerschiefer, verschiefterte Gneise, Lamprophyre, Tonschiefer des Jura. Vollkommen dicht ist der homogene Gips der Trias.

Erhöht ist auch die Durchlässigkeit in Ruschelzonen resp. jüngeren Störungen ohne lehmige Matrix sowie teilweise im Begleitgestein schiefriger Lamprophyre, das stärker zerbrochen ist.

Da im grossen gesehen die besser durchlässigen mit den weniger gut durchlässigen Gesteinsserien wechseln und zudem die Schieferung mit den zahlreichen parallel zu ihr verlaufenden Störungen als Trennflächenelement dominiert, ist das Gebirge anisotrop bezüglich der Wasserdurchlässigkeit. Es ist gut durchlässig in Richtung der Schieferung und der Gesteinszüge, dagegen schlecht durchlässig quer zu dieser Richtung.

Grundwasserbecken von Andermatt

Unter dem Talboden von Andermatt ist ein tiefgreifendes lockergesteinsgefülltes Grundwasserbecken vorhanden, dessen Tiefstes das Tunnelniveau nahezu erreicht. Das Trasse des Strassentunnels weicht diesem Grundwasserbecken gegen Westen aus. Das dazwischenliegende Gestein besteht aus relativ dichtem Permokarbon.

Hydrogeologische Situation des Strassentunnels, Prognose

Der Wechsel von schlecht durchlässigen mit gut durchlässigen Gesteinen bei vertikaler Schichtlage konnte in den tiefer als die natürlichen Vorfluter liegenden Tunnel zur Folge haben, dass sich in klüftigen Gesteinen gespeichertes Wasser in den Tunnel entleert. Diese hydrogeologisch ungünstige Situation führte z.B. in den Stollen der Transitgas-Leitung und im Furka-Basistunnel zu einem erheblichen Wasseranfall.

Beim Bau des Bahntunnels erwies sich jedoch die Wasserführung im Aar-Massiv als vorwiegend gering, was auch für

den Strassentunnel vermutet wurde. Im Gegensatz dazu wurde ein erhöhter Wasseranfall ganz allgemein im Gotthard-Massiv, speziell jedoch in der Tremola-Serie erwartet.

6.2 Der Wasseranfall im Tunnel

Die Bergwasserführung, wie sie sich aufgrund der geologischen Aufnahmen ergibt, ist im Anhang 7 zusammenfassend dargestellt.

Wasseranfall in der Lockergesteinsstrecke

Während der Wasseranfall im Sicherheitsstollen gering blieb, strömten dem Tunnel im groben Blockschutt im Mai 1970 bis zu 20–55 l/s zu. Ein Vergleich zwischen Witterung und Wasseranfall im Tunnel zeigte eindeutig, dass dieser hohe Wasseranfall auf das unglückliche zeitliche Zusammentreffen von intensiver Schneeschmelze mit dem Tunnelvortrieb zurückzuführen war. Der Effekt der relativ spät einsetzenden Schneeschmelze, die zwischen Mitte April und Anfangs Mai durch erneute Schneefälle unterbrochen wurde, wurde durch einen Wärmeeinbruch mit Niederschlägen nach einer Föhnlage verstärkt. Die in den Ausschreibungsunterlagen gestellte Prognose, dass "der Tunnelvortrieb abgesehen von einsickernden Niederschlägen und Schmelzwasser trocken sei" trifft somit trotz des hohen Wasseranfalls zu, indem der Wasseranfall mit abklingender Schneeschmelze auf weniger als 1 l/s zurückging und erst nach Niederschlägen wieder anschwell, also eindeutig auf von oben einsickerndes Meteorwasser zurückzuführen war. Bei einem Vortrieb durch die Lockergesteinsstrecke ausserhalb der Periode Mai/Juni 1970 wäre es grösstenteils bei einem Wasseranfall von weniger als 1 l/s geblieben.

Bergwasserführung in den einzelnen Gesteinsserien

Die Bergwasserführung in den einzelnen Gesteinsserien geht aus der Tabelle 21, Seite 58, hervor. Zu bemerken ist, dass in Bezug auf die Zahl Austrittsstellen und die anfallende Wassermenge kein wesentlicher Unterschied zwischen Sicherheitsstollen und Tunnelröhre festzustellen war. Dies obwohl der Vortrieb des Sicherheitsstollens jenem des Tunnels weit vorauselte. Das Gebirge wurde somit durch den Sicherheitsstollen nur in geringem Ausmass drainiert, resp. die Drainagewirkung des nur 2,6–3 m breiten kleinen Stollens wurde durch die grössere Zahl von angeschnittenen wasserführenden Klüften im 10–11 m breiten Tunnel aufgehoben.

Tabelle 21 Bergwasserführung in den verschiedenen Gesteinsserien

Gesteinsserie	Abschnitt (Tm)	Bergwasserführung	Max. Erguss pro Austritt (l/s)
Nordseite			
Aare-Granit	Tm N		
	SiSto 82 - 2400 Tu 135 - 2400	gering, vorwiegend Einzelaustritte, streckenweise erhöht (z.B. Portalzone, hydrothermal zersetzter Granit im Tu)	0,02
	SiSto 2400 - 3217 Tu 2400 - 3238	stärker durchnässt bei geringem Gesamterguss, zahlreiche kleine Quellen ($< 0,1$ l/s)	0,5
	Schacht Bätzberg	durchnässt gegen Felsoberfläche, sonst gering, total < 1 l/s	$< 0,01$
Südliche Gneiszone des Aar-Massivs	SiSto 3217 - 4048 Tu 3238 - 4069	gering, Tropf und Nässe z.T. diffus, sehr wenig Quellen	0,02
Mesozoikum, Jura	SiSto 4048 - 4252 Tu 4069 - 4269	Tonschiefer beim Anfahren trocken, später Durchnässung Kalke wasserführend, Wasserandrang stärker von Tm 4150-4228 SiSto resp. 4180-4220 Tu. Dem Vortrieb folgend 1 - 3 l/s im Vortriebsbereich. Drainagebohrungen. Total geschätzt 2 - 6 l/s.	0,25*
Mesozoikum, Trias	SiSto 4252 - 4264 Tu 4269 - 4287	trocken	0
Permokarbon	SiSto 4264 - 4335 Tu 4287 - 4368	beim Anfahren trocken, nach einigen Tagen Durchnässung auf Ostseite (Talseite)	sehr gering
	SiSto 4335 - 4778 Tu 4368 - 4796	häufig Tropf und Feuchtigkeit spez. Quarzlinsen	$< 0,01$
	SiSto 4778 - 5289 Tu 4796 - 5321	praktisch trocken (ganz vereinzelt geringfügige Austritte)	sehr gering
	SiSto 5289 - 5698 Tu 5321 - 5712	erhöht, Wechsel von stärker durchnässen mit relativ trockenen Abschnitten, sehr wenig Quellen, Gesamterguss gering	$< 0,01$
	Schacht Hospental	gering, total ca 0,2 l/s	$< 0,01$
Paragneise Gotthard-Massiv	SiSto 5698 - 7070 Tu 5712 - 7102	Tropf und Nässe verbreitet, Quellen sehr selten, streckenweise stärker durchnässt, Gesamterguss geschätzt 1 l/s	0,03
Gamsboden-Granitgneis	SiSto 7070 - 8009 Tu 7102 - 8283	Tropf und Nässe verbreitet, zahlreiche kleine Quellen, mässiger Gesamterguss (1 - 3 l/s pro 500 m Strecke)	0,1
Südseite			
Gamsboden-Granitgneis	Tm S		
	SiSto 5377 - 8262 Tu 5376 - 7988	Sicherheitsstollen sehr nass, die meisten Klüfte wasserführend. Deutliche Drainagewirkung des Stollens: Der Tunnel führt erheblich weniger Wasser, hauptsächlich als konzentrierte Austritte	150 (!)
	Schacht Guspisbach	stark wasserführend, oft erhebliche Behinderung des Vortriebs durch Wasser	1,5
Guspis-Zone	SiSto 4483 - 5377 Tu 4475 - 5376	i.a. trocken, Grenzflächen bei Gesteinswechsel gelegentlich wasserführend, Wassereintrich bei Tm 4825	10
Fibbia-Granitgneis	SiSto 3659 - 4483 Tu 3652 - 4475	ziemlich trocken, gelegentlich Kluftwasser	$< 0,1$
Sorescia-Gneis	SiSto 3596 - 3644 Tu 3583 - 3625	Tunnel ziemlich trocken, gelegentlich Tropf im SiSto	$< 0,1$
	SiSto 3015 - 3543 Tu 3004 - 3511	2 Quellen am Nordrand gegen Rotondo-Granit	1,8
Tremola-Serie	SiSto Tu 1200 - 3004	Gelegentliche Quellen, Tropf v.a. im SiSto	$< 0,1$
	SiSto Tu 600 - 1200	Quellen häufig, gelegentlich Wassereintriche, Wasserandrang über lange Zeit konstant	6,0
	SiSto Tu 120 - 600	häufig starker Tropf, besonders bei Schneeschmelze Wassereintrich bei Tm 412	60
	SiSto Tu 35 - 120	Portalbereich stark durchnässt	6,0
	Schacht Motto di Dentro	Oberflächennah wasserführend, sonst weitgehend trocken	$< 0,1$

* Drainagebohrung SiSto = Sicherheitsstollen Tu = Tunnelröhre

Gesamthaft gesehen waren in der Felsstrecke der *Nordseite* unzählige kleine Wasseraustrittsstellen in Form von Nässe, Tropf und kleinen Quellen vorhanden. Die Ergiebigkeit der Einzelaustritte überschritt jedoch 0,1 l/s nur selten und die Gesamtmenge blieb ebenfalls relativ gering. Sie wurde von der Bauleitung am Ende der Bauzeit auf 20 l/s geschätzt. Während des ganzen Vortriebes auf der Nordseite kam es nie zu Wasser-einbrüchen.

Bei ca. Tm N 1800 wurde die Reuss in einem Abstand von nur 170 m unterfahren. Bemerkenswerterweise blieb der Wasserandrang im gut geklüfteten und relativ gut durchlässigen Aare-Granit davon unbeeinflusst.

Einzelne kurze (10–40 m lange) trockene Abschnitte kamen in praktisch allen Gesteinsserien vor, längere zusammenhängende praktisch trockene Strecken fanden sich dagegen nur im Permokarbon nördlich des Schachtes Hospental.

Auf der *Südseite* war die Drainagewirkung des Sicherheitsstollens deutlicher, betrug doch z.B. in der Tremolaserie der Wasseranfall im Tunnel nur noch 45% desjenigen im Stollen. Auch im Gamsboden-Granitgneis wurde die drainierende Wirkung des Sicherheitsstollens bemerkt.

Grössere Wassereinbrüche erfolgten im Sicherheitsstollen bei Tm S 82 (61/s), Tm S 412 (601/s), Tm S 4816–4825 (101/s), 6311–6365 (150 l/s), im Tunnel bei Tm S 930 (6 l/s).

Die Nachkontrollen im fertig ausgekleideten Tunnel zeigten, dass die offenen Ringfugen als Drainage des Gebirges recht gut funktionierten.

6.3 Einfluss des Tunnels auf Oberflächenquellen und Grundwasser

Die auf der Urner-Seite während 10 Jahren (1968–1978) durchgeführten Messungen aller Oberflächenquellen im möglichen Einflussbereich des Gotthard-Strassentunnels haben gezeigt, dass weder genutzte Quellen noch das Grundwasser des Beckens von Andermatt durch den Tunnelvortrieb beeinflusst wurden.

6.4 Chemismus des Bergwassers

Nachdem im Aare-Granit bei Tm N 870 unerwarteterweise ein hoher Sulfatgehalt und damit ein stark betonaggressives Bergwasser festgestellt worden war, wurden auf der Nordseite alle grösseren Wasseraustritte auf betonschädigende Stoffe hin überprüft. Die Entnahmeorte der Wasserproben sind aus dem Anhang 7 ersichtlich, in dem auch die wichtigsten Analysenergebnisse graphisch dargestellt sind. Im Vordergrund stehen im vorliegenden Fall der Sulfatgehalt und die Wasserhärte. Beide Faktoren sind in der Tabelle 22 für die verschiedenen Gesteinsserien zusammengefasst.

Tabelle 22: Betonschädigende Faktoren im Bergwasser

Gesteinsserie	Sulfatgehalt (Streuweite) mg/SO ₄ /l	Gesamthärte (Streuweite) F°
Aare-Granit nördlich Tm 1850	45 – 935	4,7 – 63,0
Aare-Granit Tm 1850 – 3070	0,1 – 206	0,2 – 8,5
Aare-Granit südlich Tm 3070	131 – 298	2,0 – 5,0
Südliche Gneiszone des Aar-Massivs	22 – 865	2,5 – 44,3
Urseren-Zone, Jura	560 – 761	8,7 – 27,6
Permokarbon der Urseren-Zone	365 – 3494	3,4 – 171,1
Paragneise des Gotthard-Massiv	0,1 – 3	0,4 – 0,6
Gamsboden-Granitgneis Nordseite	31 – 63	0,6 – 0,8
Gamsboden-Granitgneis Südseite	26 – 36	1,2 – 12,0
Guspis-Zone	–	–
Fibbia-Granitgneis	68	8,0
Sorescia-Gneis	20 – 80	0,3 – 1,6
Tremola-Serie	20 – 45	0,4 – 12,8
betonaggressiv falls	> 200	< 9

Der *Sulfatgehalt* zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Petrographie der wasserführenden Gesteine wie die Figur 15, Seite 60, zeigt. Aufgrund des Sulfatgehaltes sind selbst in den kristallinen Serien des Aare-Granites und der südlichen Gneiszone lokal betonaggressive Wässer vorhanden. Durchwegs sehr stark betonaggressiv ist das Wasser aus dem Mesozoikum und mit wenigen Ausnahmen auch jenes des Permokarbons. Der ausserordentlich hohe Sulfatgehalt des Bergwassers aus dem Permokarbon überschreitet die Löslichkeit von Gips oder Anhydrit. Er ist nur mit dem zusätzlichen Vorhandensein von Natriumsulfat zu erklären. In ergänzenden Analysen konnte tatsächlich reichlich Natrium (bis 1113 mg/l) nachgewiesen werden. Eine einzige Quelle (Tm N 870 des Sicherheitsstollens) führt Sulfid, das ebenfalls betonaggressiv ist.

Praktisch alle Wässer mit niedrigem Sulfatgehalt sind sehr weich und können in undichtem Beton den Kalk (Kalziumhydroxyd) des Zementsteins lösen. In gutem Beton wirken jedoch auch sehr weiche Wässer kaum aggressiv. Der im Bereich der Eisenaggressivität liegende Chloridgehalt (bis 159 mg/l) eines Teils der Proben aus dem Aare-Granit wirkt sich nicht negativ aus, da Einbauten in diesem Abschnitt fehlen.

Es stellt sich die Frage, woher der hohe Sulfatgehalt stammt. Der mit zunehmender Schachttiefe zunehmende Sulfatgehalt im Schacht Hospental lässt darauf schliessen, dass die Lösungen beim Durchsickern durch das Gestein angereichert wurden. Als Lieferant kommt in diesen Serien Gips und Anhydrit in Frage. Beide Mineralien kommen im Gestein auf Trennflächen oder in der benachbarten Trias vor. Im Aar-Massiv wurde andernorts ebenfalls Gips und Anhydrit vermutlich aus deszendenden Lösungen in Klüften ausgefällt (SCHNEIDER 1965).

Das in Form von Pyrit vorhandene wasserunlösliche Eisensulfid kann bei Zutritt von Luftsauerstoff und Feuchtigkeit allmählich zu Sulfaten und freier Schwefelsäure oxidiert werden. Das Mineral Pyrit tritt in allen Gesteinen auf und ist im Permokarbon sogar reichlich vorhanden. Auch dies ist somit ein möglicher Grund für den erhöhten Sulfatgehalt des Bergwassers.

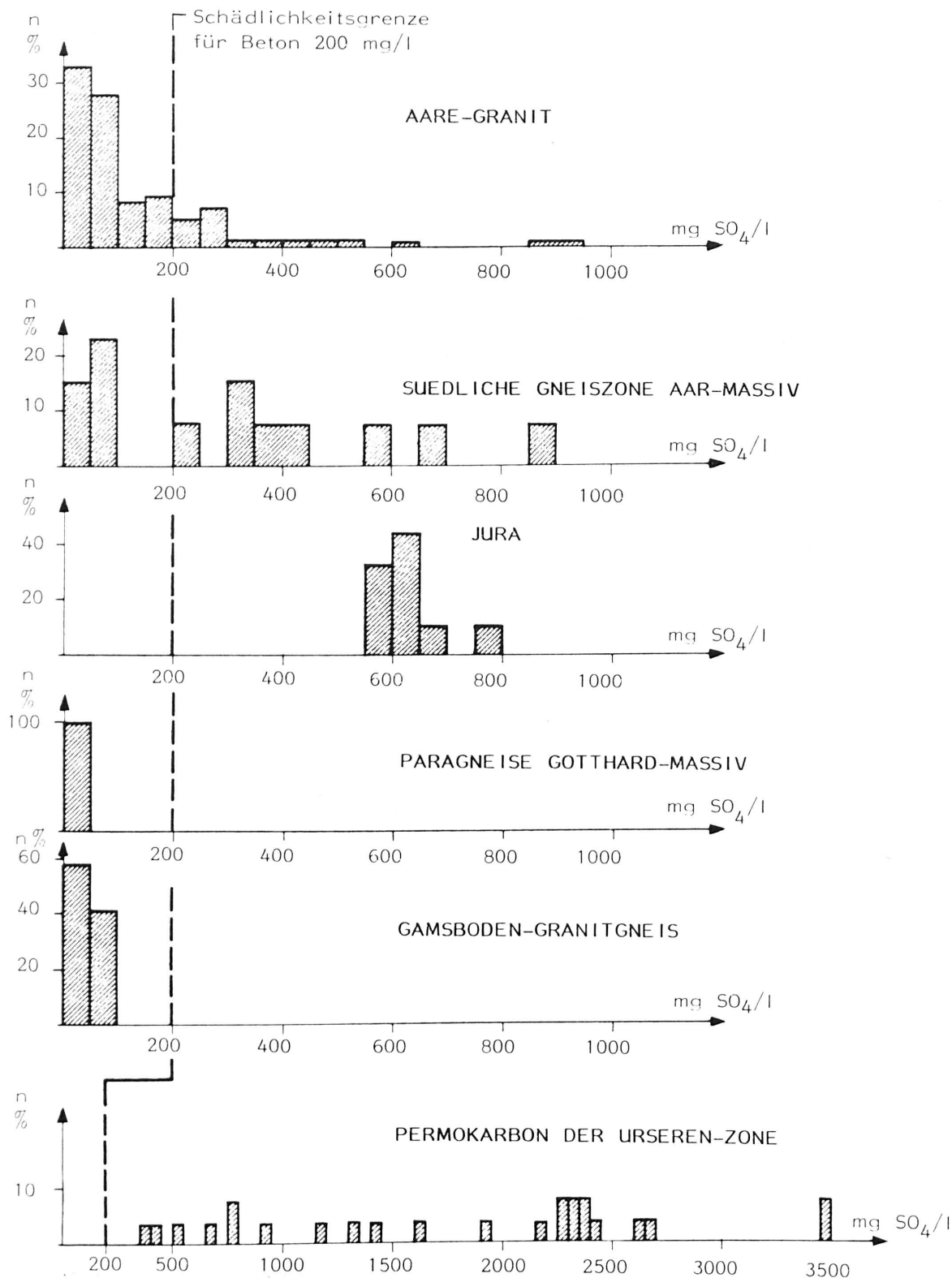


Fig. 15: Häufigkeitsverteilung der Bergwasser-Sulfatgehalte in den verschiedenen Gesteinsserien der Nordseite.
n = relative Probenhäufigkeit (%) pro Gesteinsserie

Temperatur des Bergwassers

Die Bergwassertemperatur entspricht weitgehend der Fels-temperatur (siehe Figur 16, Seite 62). Deren Verlauf, wie er im Anhang 7 wiedergegeben ist, bildet die Überlagerungshöhe über dem Tunnel in abgeschwächter, d.h. ausgeglichener Form ab. Sie steigt etwas südlich des Bätzberges, gegenüber der Topographie leicht verschoben, auf 21–22° C an und erreicht am Ende des Nordteils bei Tm N 7875 27,6° C.

Auf der Südseite erreichten die Wassertemperaturen in der Nähe des Schachtes Guspisbach die höchsten Werte. Zwischen Tm S 7085–7298 wurden im Sicherheitsstollen 32,3–32,4° C gemessen. Auch in diesem Falle ist das Temperaturmaximum gegenüber der höchsten vertikalen Überlagerung leicht gegen Norden verschoben.

7. FELSTEMPERATUREN

7.1 Einleitung, Messmethode

Mitarbeiter der örtlichen Bauleitungen massen im Prinzip alle 50 m die Felstemperatur mit einem elektrischen Thermistor-Gerät. Die Messungen unterstanden der Leitung von Dr. G. Berset (Zentralschweizerisches Technikum Luzern), der auch die Messgeräte entwickelt hatte. Die Messempfindlichkeit beträgt bei dieser Methode $\pm 0,01^\circ \text{C}$. Gemessen wurde, nachdem sich der Temperatursausgleich eingestellt hatte, in eigens für diesen Zweck ausgeführten 2 m tiefen wassergefüllten Bohrlöchern im Parament. Die Messungen erfolgten normalerweise hinter dem Vortriebsbereich, d.h. rund 50–100 m hinter der Ortsbrust und damit etwa 5–10 Tage nach dem Auffahren.

7.2 Resultate, Temperaturverlauf

Der Felstemperaturverlauf ist im Anhang 8 dargestellt. Er widerspiegelt im grossen und ganzen den Verlauf der Topographie. Allerdings ist das relative Temperaturmaximum von $21,6^\circ \text{C}$ bei Tm N 3350 gegenüber dem Bözberg nach Süden verschoben. Das Temperaturmaximum des Tunnels liegt südlich des Schachtes Guspisbach und ist gegenüber der grössten direkten Überlagerung beim Monte Prosa deutlich, d.h. um rund 3 km, gegen Norden verschoben.

Das Temperaturmaximum dürfte etwa 32°C betragen. Eine gewisse Unsicherheit besteht deshalb, weil die zuletzt ausgeführten Messungen auf der Südseite ab Tm S 6250 bis zum Durchschlag mit einem Quecksilberthermometer gemessen wurden und zwar in unregelmässigen zeitlichen Abständen hinter dem Vortrieb. Die starke Streuung der Messwerte (siehe Anhang 8) und die aberranten Punkte von $32,9^\circ \text{C}$ bei Tm S 6350 und $33,9^\circ \text{C}$ bei Tm S 7750 sind daher vermutlich auf Messfehler zurückzuführen.

Im Schacht Guspisbach stieg die Felstemperatur von $7,9^\circ \text{C}$ in 50 m Tiefe ziemlich geradlinig auf $31,4^\circ \text{C}$ in 520 m Tiefe. Im Schacht Hospental wurde ein unregelmässiger Verlauf gemessen, die Felstemperatur betrug in 96,5 m Tiefe $9,2^\circ \text{C}$, in 300 m Tiefe $16,5^\circ \text{C}$. Dies ergibt einen mittleren Gradienten (Temperaturzunahme) von $5,0^\circ \text{C}$ auf 100 m im Falle des Schachtes Guspisbach und von $3,6^\circ \text{C}$ pro 100 m im Falle des Schachtes Hospental. Der hohe Gradient bei Guspisbach (geothermische Tiefenstufe = 20 m pro $^\circ \text{C}$!) und die verschobenen Maxima sind auf den dreidimensionalen Temperatursausgleich und die damit verbundene enge Scharung der Isothermen unter der tief eingeschnittenen Passfurche zurück-

zuführen. Der Effekt der Topographie kann nach einem von BODMER et al. (1979) entwickelten Computerprogramm korrigiert werden. Zusätzlich können auch noch geologische Einflüsse wie Hebung der Alpen, Erosion und Anisotropie eliminiert werden. Die beiden Berechnungen führen nach Rybach (Schlussbericht V. Teil) zu folgenden Resultaten:

	Gradient 1	Gradient 2
Nordteil (0–5200 m ab NP)	$25,6^\circ \text{C/km}$	$20,5^\circ \text{C/km}$
Mittelteil (5200–10470 m)	$22,8^\circ \text{C/km}$	$18,0^\circ \text{C/km}$
Südteil (10470–16270 m)	$28,5^\circ \text{C/km}$	$19,2^\circ \text{C/km}$

Gradient 1 = nur "topographischer" Effekt korrigiert

Gradient 2 = "topographischer" und "geologischer" Effekt korrigiert

7.3 Vergleiche mit der Prognose und den Wassertemperaturen

Auf die Ausarbeitung einer speziellen Temperaturprognose für den Strassentunnel war verzichtet worden, weil der unweit östlich durchführende Bahntunnel eine grössere Überlagerung aufweist und dort die maximale Wassertemperatur nur rund 30°C erreichte (STAPFF 1880). Für den Strassentunnel wurden ähnliche thermische Verhältnisse event. sogar etwas geringere Temperaturen erwartet. Ein Vergleich zwischen den beiden Tunnels zeigt, dass der Temperaturverlauf im Bahntunnel, bedingt durch die gleichmässiger verteilte durchschnittlich grössere Überlagerung etwas ausgeglichener ist. Die Felstemperatur betrug über eine längere Strecke rund 30°C .

Die Bergwasserführung ist im Gotthard-Strassentunnel gesamthaft gesehen, verglichen mit anderen Tunnels, relativ gering und beeinflusste den Temperaturverlauf kaum. Dies etwa im Gegensatz zum Simplontunnel, wo grosse Wassermengen (bis 1000 l/s) sich auf die Felstemperaturen deutlich auswirkten (NIETHAMMER 1910).

Ein Vergleich zwischen den elektrisch gemessenen Felstemperaturen und den mit einem Quecksilberthermometer bestimmten Wassertemperaturen zeigt, dass eine gute Korrelation vorliegt (Figur 16, Seite 62); die gemessene Wassertemperatur ist jedoch systematisch etwa $1/2^\circ \text{C}$ höher. Möglicherweise liegt ein systematischer Messfehler vor. Die gute Übereinstimmung bestätigt aber die prinzipielle Richtigkeit der Angaben von STAPFF (1877, 1880) aus dem Bahntunnel, der die Felstemperaturen ausschliesslich aus den beobachteten Wassertemperaturen ableitete.

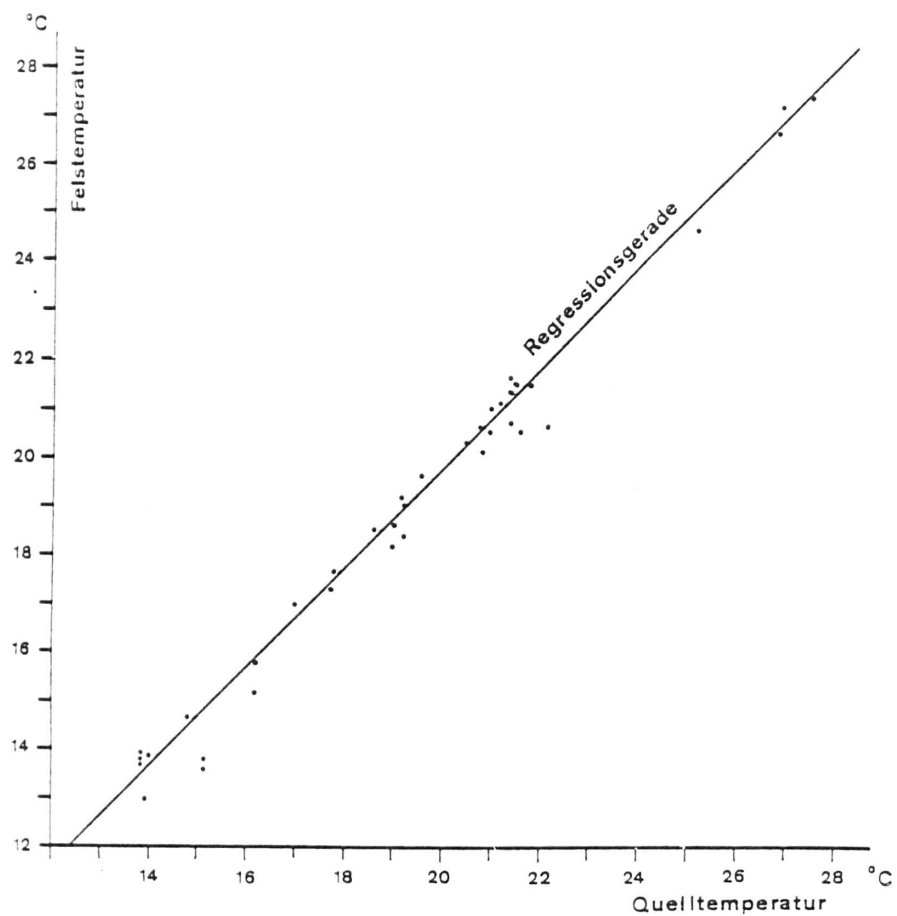


Fig. 16: Vergleich von Fels- und Quelltemperatur im Sicherheitsstollen der Tunnelnordseite

Regressionsgerade: Steigung 1,017
 Korrelation 0,994
 Konstantenglied $-0,68^{\circ}\text{C}$
 Anzahl Punkte 39

8. GESTEINSRADIOAKTIVITÄT

8.1 Einleitung, durchgeführte Untersuchungen

Die Gesteinsradioaktivität wurde durch Mitarbeiter des Institutes für Geophysik der ETH, Zürich, im Rahmen des Arbeitsausschusses für die Untersuchung schweizerischer Mineralien und Gesteine auf Atombrennstoffe und seltene Elemente unter Leitung von Prof. Dr. L. Rybach bestimmt. Gemessen wurde im Sicherheitsstollen alle 10 m mit einem Szintillometer die Gamma-Aktivität (Mittelwert aus 3 Punkt-messungen). Zusätzlich entnahm die Messequipe alle 50–200 m Gesteinsproben, deren Pulver im Labor gamma-spektrometrisch auf Uran, Thorium und Kalium untersucht wurde (siehe RYBACH 1971).

8.2 Resultate

Sämtliche Resultate sind im Anhang 9 dargestellt. Angegeben sind die Werte der Messungen im Tunnel in cps (counts per second = Zählimpuls pro Sekunde) und für die Laborproben in cphs/g (Zählimpulse pro 100 Sekunden und Gramm Probenmaterial). Publiziert wurden die Resultate durch LABHART & RYBACH (1980) sowie RYBACH et al. (1982).

Tabelle 23 Mittlere Gesteinsradioaktivität						
Gesteinsserie	Gesteinsradioaktivität					
	Messung im Tunnel			Labormessung		
	M (cps)	S (cps)	n	M(cphs/g)	S (cps)	n
Aare-Granit	263.3	1.9	312	4.05	0.08	37
Südliche Gneiszone	256.3	7.5	77	4.67	0.40	5
Mesozoikum der Urseren-Zone	63.5	2.6	21	—	—	—
Permokarbon der Urseren-Zone	172.5	6.2	145	2.76	0.28	13
Paragneise	128.5	2.2	135	2.37	0.23	10
Gamsboden-Granitgneis	232.9	1.2	376	3.56	0.11	48
Guspis-Zone	85.7	3.6	86	1.22	0.38	11
Fibbia-Granitgneis	207.2	2.8	85	3.42	0.13	6
Sorescia-Gneis	164.8	2.0	56	2.42	0.06	2
Prato-/Tremola-Serie	78.1	1.7	290	1.28	0.25	13

M = Mittelwert, S = Standardabweichung, n = Anzahl Messungen

Der Zusammenhang zwischen Petrographie und Gesteinsradioaktivität (siehe Anhang 9) ist augenfällig. An Gesteinsgrenzen wechselt die Gesteinsradioaktivität meist sprunghaft. Eine Gegenüberstellung der mittleren Gesteinsradioaktivitäten in den Gesteinsserien gibt die Tabelle 23.

Generell gesehen ist die Gesteinsradioaktivität in allen Paragneisen inkl. Tremola-Serie sowie im Mesozoikum niedriger als in den granitischen Gesteinen.

Im Einzelnen ist noch folgendes zu den Messresultaten zu bemerken. Im *Aare-Granit* nimmt die Radioaktivität innerhalb der Zone mit den Lamprophyren deutlich zu und ist in der alpin vergneisten südlichen Varietät am höchsten, d.h. in jenem Gestein mit dem höchsten Anteil an alpin neugebildeten Mineralien. Einzelne aberrant tiefe Punkte sind Lamprophyren zuzuschreiben. In der *südlichen Gneiszone* widerspiegelt die starke Streuung der Messresultate die petrographische Vielfalt. Im *Permokarbon* streuen die Werte südlich des Schachtes Hospental wiederum den grossen lithologischen Wechseln entsprechend stärker. Die Radioaktivität ist z.T. deutlich höher, wobei sich diese Zone erhöhter Radioaktivität regional sowohl gegen Osten wie gegen Westen weiter verfolgen lässt. Im *Gamsboden-Granitgneis* ist die Streuung gering. Der mit 450 cps aus dem Rahmen fallende Wert bei Tm S 7090 liegt unmittelbar neben einer Störung bei Tm S 7086, bei der maximal 500 cps festgestellt wurde. In der *Guspiszone* und in der *Prato-Serie* wurden bei starken Streuungen z.T. sehr tiefe Werte gemessen.

Die Aktivitäten, die aus der Gammaskpektrometrie der Gesteinsproben berechnet wurden, bestätigen das Radioaktivitätsprofil der Messungen am Gestein im Tunnel. Ein erhöhte Radioaktivität ist vor allem auf eine Zunahme von Uran und Thorium zurückzuführen. Als höchste Gehalte an radioaktiven Elementen wurden 4,5% Kalium (im Fibbia-Granitgneis bei km S 4,15), 25,9 ppm Uran (im Gamsboden-Granitgneis bei km N 7,7) und 37,5 ppm Thorium (bei km N 3,3 in der südlichen Gneiszone des Aar-Massivs) bestimmt. Wesentliche Anomalien konnten keine entdeckt werden.

LITERATURVERZEICHNIS

Anhang 1

- AMBERG, W. (1980): Fortschritte in der Felsmechanik im Zusammenhang mit dem Gotthard-Strassentunnel. - Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 36/80.
- AMBÜHL, E. (1929): Petrographie und Geologie des zentralen Gotthardmassivs südlich Andermatt. - Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 9, 265.
- ANDREAE, C. (1958): La prévision des températures souterraines. Ann. des ponts et chaussées 1958/1.
- BAGGIO, P. & MALARODA, R. (1962): Il traforo del Monte Bianco, prime osservazioni geologiche sul tratto dalla progressiva 2500 alla progressiva 3700 (parte italiana). Estratto del fasc. 3-4, Serie VIII, vol XXXIII. Ferie - Settembre - Ottobre 1962, Accademia Nazionale dei Lincei Roma.
- BAMBAUER, H. U. & BERNOTAT, W. H. (1982): The Microcline/Sandine transformation isograd in metamorphic regions. I. Composition and structural state of alkali feldspars from granitoid rocks of two N-S traverses across the Aar Massif and Gotthard "Massif", Swiss Alps. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 62, 185.
- BARGÄHR, H. (1980): Die Baugeschichte des Gotthard-Strassentunnels (Nord-Seite). Schweiz. Journal, Heft 8/1980.
- BERNOTAT, W. H. & BAMBAUER, H. U. (1980): Die Mikroklin/Sandine-Isograde in Aar- und Gotthard-Massiv. Eclogae geol. Helv. 73/2, 559.
- BERNOTAT, W. H. & BAMBAUER, H. U. (1982): The Microcline/Sandine transformation isograd in metamorphic regions. II. The region of Lepontine metamorphism, Central Swiss Alps. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 62, 231.
- BODMER, PH., ENGLAND, P. C., KISSLING, E. & RYBACH, L. (1979): Correction of subsurface temperature measurements for the effects of topographic relief. Part II: Application to temperature measurements in the Central Alps In: V. Cermak and Rybach (Editors): Terrestrial Heat Flow in Europe. Springer-Verlag Berlin - Heidelberg - New York, pp. 78-87.
- BOURQUIN, M. (1972): Le plus long tunnel routier du monde en construction sous le Gotthard - Chantiers, Heft 10, 1972.
- BOURQUIN, M. (1974): Saint-Gotthard 1974 travaux du lot Nord - Chantiers, Heft 10, 1974.
- BOURQUIN, M. (1975): Le franchissement de la zone du mésozoïque par le tunnel routier du Saint-Gotthard. Tunnels et ouvrages souterrains, Heft Sept./Okt. 1975.
- BRIDEL, G. (?): Bau des grossen Gotthardtunnels, Druckpartie km 2766 - 2830 Abschrift.
- BRÜCKNER, W. & NIGGLI, E. (1954): Bericht über die Exkursion zum Scheidnössli bei Erstfeld, in die Urserenmulde vom Rhonegletscher bis Andermatt und ins westliche Tavetscher Zwischenmassiv. Eclogae geol. Helv. 47/2, 383.
- BUXTORF, A. (1911): Gutachten über die geologischen Verhältnisse des im Bau befindlichen Furkatunnels.
- BUXTORF, A. (1912): Über die geologischen Verhältnisse des Furkappasses und des im Bau befindlichen Furkatunnels. Eclogae geol. Helv. 12, 176.
- CENSI, E. & SCHATZMANN, A. (1985): "Der Gotthard-Strassentunnel" Tagebuch der Bauarbeiten 5.5.70 - 5.9.80. Grassico Publicita SA, Bellinzona.
- DAL VESCO, E. & SCHNEIDER, T. R. (1970): Der Gotthard-Strassentunnel, Geologie. Sonderdruck Rivista Tecnica, Bellinzona, Mai 1970.
- DIETHELM, W., GALLATI, F. & HENKE, A. (1980): Darstellung des Projektes. Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 36/80.
- DIETHELM, W. & SCHATZMANN, A. (1972): Der Lüftungsschacht Hospental. Schweiz. Bauzeitung, Heft 36, 1972.
- DOLEZALEK, C. (1882): Der Ausbau des Gotthard-Tunnels. Zeitschrift Arch. Ing. Verein Hannover, Bd. 27, Heft 2.
- ECKARDT, P. M. (1957): Zur Talgeschichte des Tavetsch, seine Bruchsysteme und jungquartären Verwerfungen. Diss. Universität Zürich.
- ECKARDT, P. M. (1974): Untersuchung von rezenten Krustenbewegungen an der Rhein-Rhône-Linie. Eclogae geol. Helv. 67/1, 233.
- ECKARDT, P., FUNK, H. & LABHART, T. (1983): Postglaziale Krustenbewegungen an der Rhein-Rhône-Linie. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 2.
- ESCHER, E. & JÄCKLI, H. (1946): Zur Kenntnis des gotthardmassivischen Permokarbons der Urseren-Zone im Gebiet südwestlich Realp. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 26, 1.
- FEHR, W. (1922): Injektions- und Intrusionserscheinungen im zentralen Teil der südlichen Gneise des Aarmassivs. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 2/3-4, 331.
- FEHR, W. (1926): Geologische Karte der Urseren-Zone 3:100'000 (Geologische Spezialkarte Nr. 110). Schweiz. geolog. Kommission.
- FRANKS, G. D. (1968): A Study of Upper paleozoic Sediments and Volcanics in the northern Part of Eastern Aar Massif. Eclogae geol. Helv. 61/1, 49.
- FREY, M., BUCHER, K., FRANK, E. & SCHWANDER, H. (1982): Margarine in the Central Alps. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 62, 21.
- GRÜNENFELDER, M., HOFMÄNNER, F. & GRÖGLER, N. (1964): Heterogenität akzessorischer Zirkone und die petrogenetische Deutung ihrer Uran/Blei-Zerfallsalter. II. Präkambrische Zirkonbildung im Gotthardmassiv. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 44/2, 543.
- HAFNER, ST. (1958): Petrographie des südwestlichen Gotthardmassivs. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 38, 2.
- HAFNER, ST. & LOIDA, A. (1980): Origin and variation of the microcline triclinicity in granitic bodies of the Central Alps. Eclogae geol. Helv. 73/2, 563.

- HENKE, A. (1980): Massnahmen gegen Sickerwasser im Tunnel und in den Lüftungsschächten. Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 36/80.
- HOFMÄNNER, F.J. (1964): Petrographische Untersuchung der granitoiden Gesteine zwischen Gotthard- und Witenwasserrennens. Diss. Universität Zürich.
- HUBER, M. H. (1943): Physiographie und Genesis der Gesteine im südöstlichen Gotthard-Massiv. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 23.
- HUBER, W. (1948): Petrographisch-mineralogische Untersuchungen im südöstlichen Aarmassiv. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 28/2, 555.
- HUDER, J. & AMBERG, G. (1970): Quellungen in Mergel, Opalinuston und Anhydrit. Schweiz. Bauzeitung 88. Jg., Heft 43, p. 975.
- INGENIEURBÜRO DR. LOMBARDI/ELEKTROWATT INGENIEURUNTERNEHMUNG AG (1970): Das Projekt des Gotthardstrassentunnels. Strasse und Verkehr, Heft 3, 1970.
- INGENIEURGEMEINSCHAFT GOTTHARD-STRASSENTUNNEL (1970): N2 – Der Gotthard-Strassentunnel. Sonderdruck Rivista Tecnica, Bellinzona, Mai 1970.
- JÄCKLI, H. (1951): Verwerfungen jungquartären Alters im südlichen Aarmassiv bei Somvix-Rabus (Graubünden). Eclogae geol. Helv. 44, 332.
- JÄCKLI, H. (1965): Pleistocene Glaciation of the Swiss Alps and Signs of Postglacial Differential Uplift. Geol. Soc. Amer. Special Paper 84.
- JEANRICHARD, F. (1972): Contributions à l'étude du mouvement vertical des Alpes. Boll. Geodesia sci. aff. 31/1, 17.
- KELLER, F. & SCHNEIDER, T. R. (1982): Geologie und Geotechnik des Furka-Basistunnels. Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 24/82.
- KÖNIGSBERGER, J. & THOMA, E. (1910): Versuche über primäre und sekundäre Beeinflussung der normalen geothermischen Tiefenstufe und über die Temperaturen im Albula-, Arlberg-, Simplon-, Ricken-, Tauern- und Bosrucktunnel. Eclogae geol. Helv. Vol. X.
- LABHART, T. (1976): Radioaktivitätsprofile durch den Zentralen Aaregranit im Bereich der Schweizer Geotraverse. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 56/3.
- LABHART, T. P. (1977): Aarmassiv und Gotthardmassiv. Sammlung geologischer Führer Nr. 63, Gebr. Bornträger, Berlin.
- LABHART, T. P. & RYBACH, L. (1980): Radiometrische Stollenprofile durch zentralmassivische Granite im Bereich der Schweizer Geotraverse. Eclogae geol. Helv. 73, 571–582.
- LIECHTI, H. (1933): Recherches pétrographiques et tectoniques dans la vallée de Göschenen. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 13, 491.
- LOCHER, H. G. (1968): Some results of direct shear tests on rock discontinuities. Intern. symposium rock mechanics, Madrid.
- LOIDA, A. (1979): Die Kristallchemie von Granat und die Triklinität der Alkalifeldspäte als petrogenetische Indikatoren in Verbindung mit der Kristallisationsgeschichte granitischer Gesteine des Gotthard-Massivs. Diss. Universität Marburg.
- LOMBARDI, G. (1972): Aus der Projektierung des Gotthard-Strassentunnels. Schweiz. Bauzeitung, Heft 28, 1972.
- LOMBARDI, G. (1976): Felsmechanische Probleme am Gotthard. Rock Mechanics, Suppl. 3, 1974.
- LOMBARDI, G. (1976): Gebirgsdruckprobleme beim Bau des Gotthard-Strassentunnels. Schweiz. Bauzeitung, Heft 13, 1976.
- LOMBARDI, G. & DAL VESCO, E. (1967): Die experimentelle Bestimmung der Reibungskoeffizienten für die Felswiderlager der Staumauer Contra (Verzasca). Sitzungsberichte I. Kongress Intern. Ges. Felsmechanik, I. p. 571.
- LUSSMANN, L. (1980): Die Mineralienaufsicht im Gotthardstrassentunnel-Nord. In: Die Mineralien des Gotthardbahntunnels und des Gotthardstrassentunnels. Repof Gurtneilen.
- MERCOLLI, I., SCHENKER, F. & STALDER, H. A. (1984): Geochemie der Veränderungen von Granit durch hydrothermale Lösungen (Zentraler Aare-Granit). Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 64.
- MILLOT, G. (1970): Geology of Clays. Springer Verlag New York.
- NIETHAMMER, G. (1910): Die Wärmeverteilung im Simplon. Eclogae geol. Helv. 11, 96–120.
- NIGGLI, E. (1944): Das westliche Tavetscher Zwischenmassiv und der angrenzende Rand des Gotthardmassivs. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 24, 58.
- NIGGLI, P. & STAUB, W. (1914): Neue Beobachtungen aus dem Grenzgebiet zwischen Gotthard- und Aarmassiv. Beitr. geol. Karte Schweiz, neue Folge. 14. Lief.
- PFISTER, R. (1976): Excavation Methods for Long Highway Tunnels and Ventilation Shafts in the Swiss Alps. Proceedings Rapid Excavation and Tunnelling Conference, Las Vegas, Juni 1976.
- RECHSTEINER, G. F. (1980): Mesures de mécanique des roches. Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 36/80.
- RUCKLI, R. (1970): Die N2 im schweizerischen Nationalstrassennetz. Sonderdruck "Der Gotthard-Strassentunnel" der Rivista Tecnica, Bellinzona.
- RYBACH, L. (1971): Radiometric Techniques. In: Wainerdi + Uken (Editors): Modern Methods of Geochemical Analysis Plenum Press, New York/London.
- RYBACH, L., BODMER, PH., WEBER, R. & ENGLAND, C. (1982): Heat flow and heat generation in the new Gotthard tunnel, Swiss Alps (preliminary results). In: Cermak V. + Hänel R. (Editors): Geothermics and geothermal energy. E. Schweinebart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, p. 63–69.
- RYBACH, L. & HAFNER, ST. (1962): Radioaktivitätsmessungen an Gesteinen des St. Gotthard-Profiles. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 42/1.
- RYBACH, L., HAFNER, ST. & WEIBEL, M. (1962): Die Verteilung von U-Th, Na, K und Ca im Rotondogranit. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 42/2.
- RYBACH, L. & LABHART, T. P. (1973): Regelmässigkeiten der Radioaktivitätsverteilung in granitischen Gesteinskörpern (Beispiele aus den Schweizer Alpen). Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 53/3.
- SCHÄR, J.-P. & JEANRICHARD, F. (1974): Mouvements verticaux anciens et actuels dans les Alpes Suisses. Eclogae geol. Helv. 67/1, 101.
- SCHÄR, J.-P., REIMER, G. M. & WAGNER, G. A. (1975): Actual and ancient uplift rate in the Gotthard Region, Swiss Alps: A comparison between precise levelling and fission-track apatite age Tectonophysics 29/1-4, 293.
- SCHÄRLI, U. (1980): Methodische Grundlagen zur Erstellung eines Wärmeleitfähigkeit-Kataloges schweizerischer Gesteine. Diplomarbeit an der Abteilung X der ETH Zürich, deponiert im Sekretariat des Institutes für Geophysik der ETH Zürich.

- SCHATZMANN, A. (1980): Der Bau der Schrägschächte. Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 36/80.
- SCHAUWECKER, E. (1974): Der Lüftungsschacht Hospental. Strasse und Verkehr 3/74.
- SCHNEIDER, A. (1912): Der Diallag/Peridotit und seine Umwandlungsprodukte auf Gigestaffel südlich Andermatt. Diss. Universität Zürich.
- SCHNEIDER, T.R. (1965): Zwei eigenartige Sulfatvorkommen. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 45, p. 153.
- SCHNEIDER, T.R. (1979): Baugeologische Erfahrungen mit Erkundungsstollen bei der Projektierung grosser Strassentunnel. Rock Mechanics, Suppl. 8, 1979.
- SCHNEIDER, T.R. (1980): Der Gotthard-Strassentunnel als geologisches Problem. Schweizer Journal, Heft 8.
- SCHNEIDER, T.R. (1980): Vergleich der Ausbruchsklassen im Sicherheitsstollen und im Strassentunnel, Los Nord Gotthard-Strassentunnel. Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 36/80.
- SCHWEIZ. BUNDESRAT: Offizielle Berichte zum Bau des Gotthard-Bahntunnels. Mémoire du Département fédéral des chemins de fer sur la construction du chemin de fer du St.-Gotthard, Bern 1887. - Rapports trimestriels du Conseil Fédéral Suisse sur la marche des travaux du St.-Gotthard (1.8.1875 – 30.6.1877). - Rapports mensuel du Conseil Fédéral Suisse sur l'état des travaux de la ligne du St.-Gotthard, Nr. 35 (Okt. 1875) – Nr. 56 (Juli 1877). - Rapport final du Conseil Fédéral Suisse sur la construction du chemin de fer du St.-Gotthard, Planches, Bern 1883.
- SICHER, V. (1980): Die Baugeschichte des Gotthardstrassentunnels. In: Die Mineralien des Gotthardbahntunnels und des Gotthardstrassentunnels. Repof Gurtneilen.
- SONDER, R.A. (1948): Gefügeregelung, Druckschieferung und Druckverformung von Gesteinen. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 28, 362.
- STALDER, H. A. (1964): Petrographische und mineralogische Untersuchung im Grimselgebiet. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 44, 187.
- STALDER, H. A. (1980): Die Mineralien des Gotthardstrassentunnels. In: Die Mineralien des Gotthardbahntunnels und des Gotthardstrassentunnels. Repof Gurtneilen.
- STALDER, H. A. (1980): Fluide Einschlüsse in den Kluftquarzen. In: Die Mineralien des Gotthardbahntunnels und des Gotthardstrassentunnels. Repof Gurtneilen.
- STALDER, H. A. & SCHENKER, F. (1980): Chemische und mineralogische Veränderungen des Kluftnebengesteins. In: Die Mineralien des Gotthardbahntunnels und des Gotthardstrassentunnels. Repof Gurtneilen.
- STALDER, H. A. & LUSSMANN, L. (1980): Fundverzeichnis der Mineralien im Gotthardstrassentunnel. In: Die Mineralien des Gotthardbahntunnels und des Gotthardstrassentunnels. Repof Gurtneilen.
- STAPFF, F.M. (1875): Kopien der Originale an die Centralbauleitung der Gotthardbahn aus dem Gotthard-Archiv. Monatsberichte (Okt. 1875 – Juli 1877).
- STAPFF, F.M. (1877): Studien über die Wärmeverteilung im Gotthard, I. Teil. Der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft zu ihrer 60. Jahresversammlung in Bex gewidmet. Bern, Verlag der J. Dap'schen Buch- und Kunsthandlung (U. Schmid).
- STAPFF, F.M. (1878): Schichtenbau des Urserenthales. Verh. schweiz. natf. Ges., 227.
- STAPFF, F.M. (1880): Geologisches Profil des St. Gotthard in der Axe des grossen Tunnels (während des Baues [1873 – 1880] aufgenommen), 1:25'000.
- STAPFF, F.M. (1880): Repartition de la température dans le grand Tunnel du Saint-Gotthard Annexe au vol. VII des Rapports trimestriels du Conseil fédéral suisse sur la marche des travaux du chemin de fer du Saint-Gotthard, Berne.
- STAPFF, F.M. (1882): Geologische Tabellen und Durchschnitte über den grossen Gotthardtunnel. Spezialbeilage zu den Berichten des Schweizerischen Bundesrates über den Gang der Gotthardbahn-Unternehmung.
- STECK, A. (1968): Die alpidischen Strukturen in den Zentralen Aaregraniten des westlichen Aarmassivs. Eclogae geol. Helv. 61/1, 19.
- STEIGER, R.H. (1962): Petrographie und Geologie des südlichen Gotthard-Massives zwischen St. Gotthard- und Lukmanierpass. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 42.
- STUDIENGRUPPE GOTTHARDTUNNEL (1963): Wintersichere Strassenverbindung durch den Gotthard. Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, Bern, Sept. 1963.
- STUDIENSYNDIKAT URSERENKRAFTWERKE (1947): Zusammenfassender Bericht über die Verhältnisse im Gotthardtunnel Mai 1947.
- VOLL, G. (1976): Recrystallisation of quartz, biotite and feldspars from Erstfeld to the Leventina Nappe, Swiss Alps and its geological significance. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 56, 401.
- WANNER, W.J. (1975): Einsatz von Tunnelvortriebsmaschinen im kristallinen Gebirge. Abhängigkeit des Vortriebes von geologisch-petrographischen Bedingungen. Diss. ETH, Zürich.
- WEISS, R. (1974): Unterfahrung des Bahntunnels. Strasse und Verkehr 3/74.
- ZBINDEN, P. (1949): Geologisch-petrographische Untersuchungen im Bereich südlicher Gneise des Aarmassivs. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 29/2, 221.

DEFINITION DER AUSBRUCHSKLASSEN

Anhang 2

Die Ausbruchsklassen sind ausschliesslich bestimmt durch die erforderlichen technischen Massnahmen für die Felssicherung am vollen Umfange des profilgerecht ausgebrochenen Hohlraumes, ausgenommen an der Sohle. Felssicherungsmassnahmen im Innern des Profils bei Teilausbruch werden für die Klassenzuordnung nicht berücksichtigt. Ebenso sind Schichtung, Schieferung, Klüftung, Verbandsfestigkeit, Wasserführung usw. des Gebirges für die Klassierung unerheblich.

Die Klassenzuordnung gilt jeweils für den ganzen Ausbruchquerschnitt, gleichgültig ob ein Voll- oder Teilausbruchverfahren angewendet wird.

Die sechs beim konventionellen Ausbruchverfahren (Sprengvortrieb) zur Anwendung gelangenden Ausbruchsklassen sind wie folgt definiert:

Ausbruchsklasse I

gilt dann als vorhanden, wenn die Voraussetzungen zur Einordnung in die Klassen II bis VI nicht gegeben sind.

Ausbruchsklasse II

erfordert

- entweder das Versetzen von Felsankern innerhalb von 20 m ab Ortsbrust im Ausmass von mehr als 0,4 Anker/m² auf einer Länge von mindestens 10 m, event. gleichzeitig das Versetzen von Drahtnetzen oder streifenhaften Abdeckungen,
- oder/und Gunit- oder Spritzbetonauftrag auf mindestens 1/3 des Profilumfanges – exkl. Sohle – über eine Länge von mindestens 10 m und mehr als 20 m, höchstens aber 500 m von der Ortsbrust entfernt,
- oder/und Stahl-, event. Holzeinbau mindestens 20 m, höchstens aber 500 m von der Ortsbrust entfernt.

Ausbruchsklasse III

erfordert, allenfalls zusammen mit Felsankern am Umfang des Ausbruchprofils,

- entweder das Versetzen von Felsankern an der Ortsbrust, im Ausmass von mehr als 0,2 Anker/m², jedoch jeweils mindestens 10 Stück,
- oder/und Gunit- oder Spritzbetonauftrag auf mindestens 1/3 des Profilumfanges – exkl. Sohle – über eine Länge von mindestens 10 m, innerhalb von 20 m ab Ortsbrust ausgeführt,
- oder/und Stahl-, event. Holzeinbau, innerhalb von 20 m ab Ortsbrust, jedoch nicht unmittelbar nach jedem Abschlag ausgeführt.

Ausbruchsklasse IV

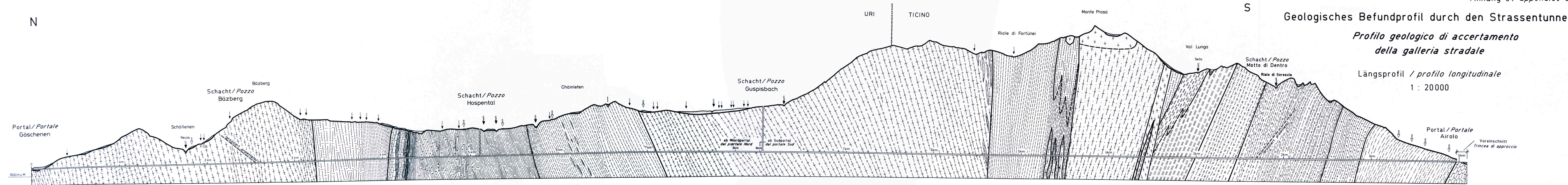
erfordert unmittelbar nach jedem einzelnen Abschlag vor Ort Stahl- oder event. Holzeinbau, allenfalls zusammen mit Felsankern, mit Gunit- oder Spritzbetonauftrag oder mit eingelegten Verzugsbrettern (nicht nach Marciavanti-Art vorgetrieben).

Ausbruchsklasse V

erfordert unmittelbar nach jedem einzelnen Abschlag vor Ort Stahl- oder event. Holzeinbau usw. wie Klasse IV, jedoch in Strecken, in welchen der hierfür vorgesehene Vollausbuch aus ausschliesslich geologischen Gründen nicht mehr anwendbar und Kalottenausbruch oder ein ähnliches Verfahren notwendig ist.

Ausbruchsklasse VI

erfordert während des Vortriebes im Voll- oder im Teilausbruch die Verwendung von geschlagenen oder eingepressten Marciavanti oder marciavantiähnlicher Abdeckungen am Profilumfang (wie Messer), event. das Abstützen der Ortsbrust.



Kilometrierung		Chilometraggio																																				
ab Nordportal		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	16.271	dal Nord																			
ab Südportal		16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	dal Sud																			
Gesteinsserie	Lockergesteine Detriti	Aare - Granit		Zone mit Lamprophyren Zona con Lamprophiri		Südliche Gneisszone Zona gneissica meridionale		Mesozoikum Mesozoico		Nordteil / parte nord Permokarbon Permocarbonifero		Südteil / parte sud		Nördliche Paragneis-Zone Zona di paragneis settentrionale			Gamsboden - Granitgneis Gneis Granitico del Gamsboden			Guspis-Zone Zona di Guspis		Fibbia-Granitgneis Gneis Granitico della Fibbia		Sorescia-Gneis Gneis di Sorescia		Prato-Serie Serie del Prato		Pontino-Zone Zona del Pontino		Sasso-Rosso-Zone Zona del Sasso-Rosso		Nelva-Zone Zona di Nelva		Tremola-Serie / Serie della Tremola		Trias Triassico Moräne Morena		Unità geologica
Tektonische Einheit	Quartär Quaternario	Aar - Massiv Massiccio dell'Aar				Urseren-Zone Zona d'Orsera				G o t t h a r d — M a s s i v M a s s i c c i o d e l S a n G o t t a r d o												Nufenen-Zone Zona di Nuvola		Quartär Quaternario		Unità tettonica												

Quartär



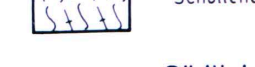
Aare-Granit



flaserige bis massige Varietät



flaserige biotitreiche Varietät



gneisige bis stark gneisige Varietät



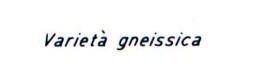
Quaternario



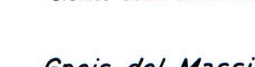
Granito dell'Aar



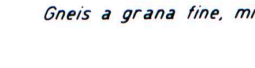
Varietà lenticolare a massiccia



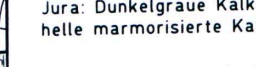
Varietà lenticolare, ricca di biotite



Varietà gneissica



Mesozoikum der Urseren-Zone



Jura: Dunkelgraue Kalke, helle marmorisierte Kalke, Marmore



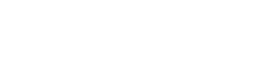
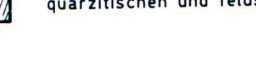
Jura: Tonschiefer mit feinen Kalkschichten



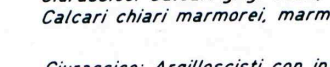
Jura: Feinplattige Kalke z. T. mit Tonschieferzwischenlagen



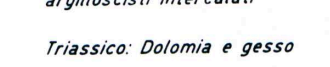
Trias: Dolomit und Gips



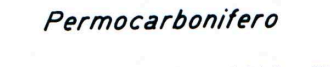
Mesozoikum der Zona d'Orsera



Giurassico: Calcarei grigi scuri, Calcarei chiari marmorei, marmi



Giurassico: Argilloscisti con intercalazioni di calcari



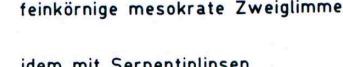
Giurassico: Calcarei scistosi, parzialmente con argilloscisti intercalati



Triassico: Dolomia e gesso



Nördliche Paragneis-Zone



feinkörnige mesokrate Zweiglimmergneise



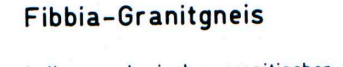
idem mit Serpentinlinsen



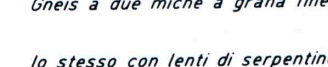
idem mit Linsen und Bändern aus Amphibolit



idem mit Linsen und Bändern aus Amphibolit



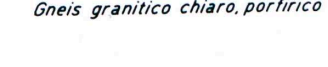
Paragneis del Massiccio del S. Gottardo



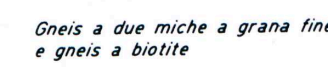
Gneis a due miche a grana fine



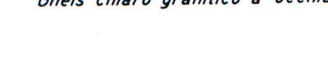
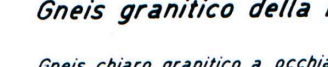
lo stesso con lenti di serpentine



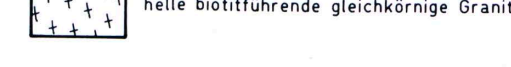
lo stesso con lenti e letti d'amfibolite



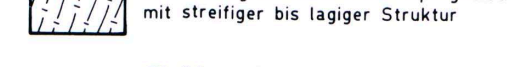
lo stesso con lenti e letti d'amfibolite



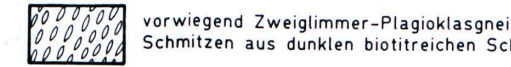
Rotondo-Granit (Monte Prosa-Granit)



helle biotitführende gleichkörnige Granite



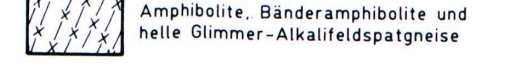
helle biotitführende gleichkörnige Granite



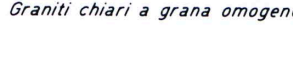
helle biotitführende gleichkörnige Granite



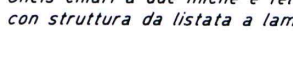
helle biotitführende gleichkörnige Granite



Granito del Rotondo (e del Monte Prosa)



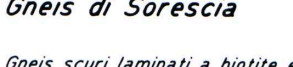
Graniti chiari a grana omogenea



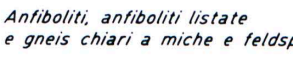
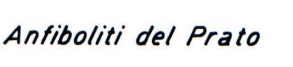
Graniti chiari a grana omogenea



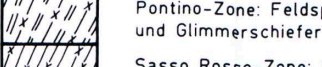
Graniti chiari a grana omogenea



Graniti chiari a grana omogenea



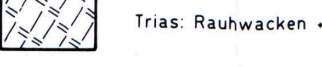
Tremola-Serie



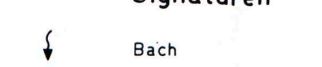
Pontino-Zone: Feldspatreiche Glimmergneise, Hornblendeschiefer, alternante con scisti ad orneblenda e micascisti



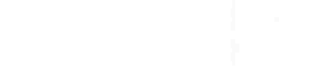
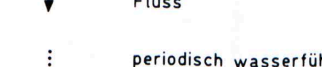
Sasso Rosso-Zone: Hornblendeführende Chlorit-Glimmerschiefer und -Gneise sowie Hornblendeschiefer



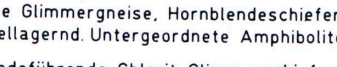
Nelva-Zone: Vorwiegend granatführende Zweiglimmergneise



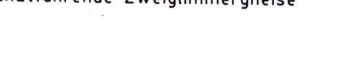
Nelva-Zone: Vorwiegend granatführende Zweiglimmergneise



Nufenen-Zone



Trias: Rauhwacken + Dolomite



Trias: Rauhwacken + Dolomite



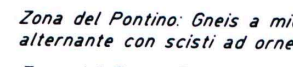
Trias: Rauhwacken + Dolomite



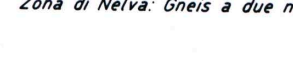
Trias: Rauhwacken + Dolomite



Scisti della Tremola



Zona del Pontino: Gneis a miche ricchi di feldspato, alternante con scisti ad orneblenda e micascisti



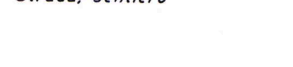
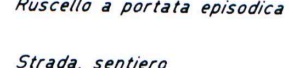
Zona del Sasso Rosso: Micascisti e gneis cloritici con orneblenda, scisti ad orneblenda



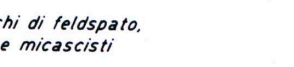
Zona di Nelva: Gneis a due miche e granato prevalente



Zona di Nelva: Gneis a due miche e granato prevalente



Zona della Novena



Triassico: Dolomia cariata e dolomie



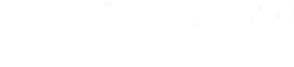
Triassico: Dolomia cariata e dolomie



Triassico: Dolomia cariata e dolomie



Triassico: Dolomia cariata e dolomie



Segni convenzionali



Torrente



Fiume



Ruscello a portata episodica

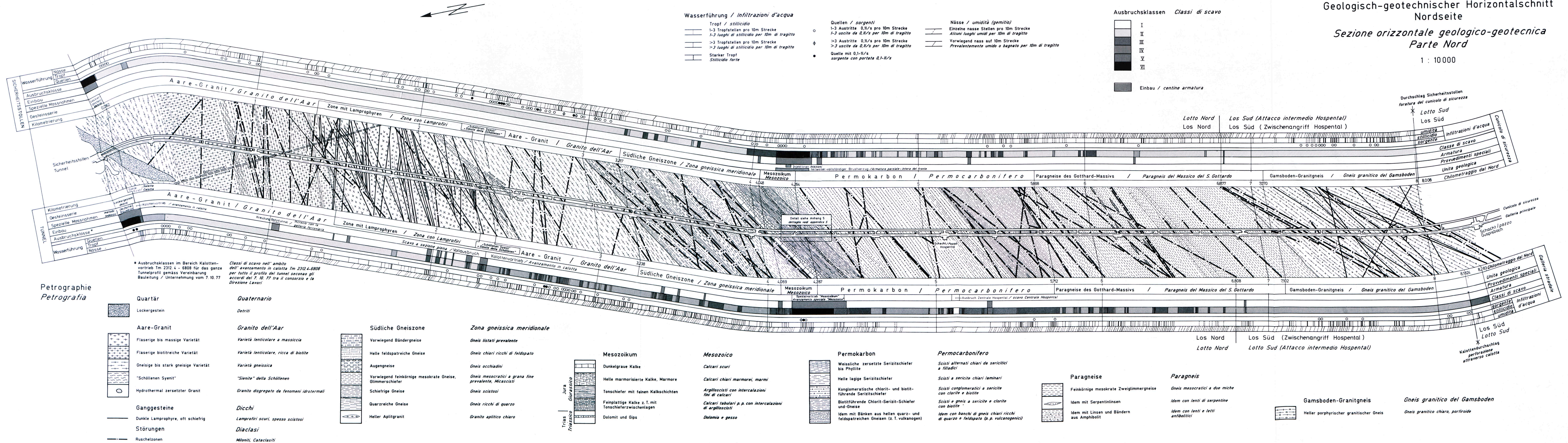


Strada, sentiero



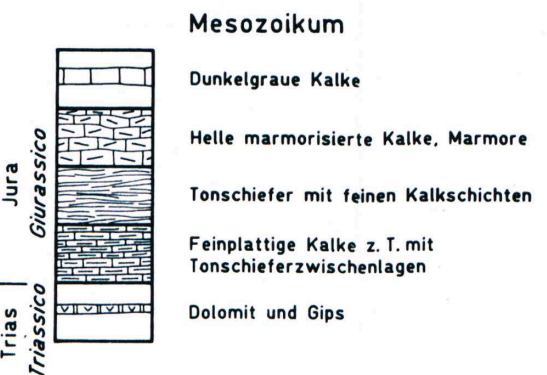
Geologisch-geotechnischer Horizontalschnitt
Nordseite
Sezione orizzontale geologico-geotecnica
Parte Nord

1 : 10000



Petrographie
Petrografia

Quartär	Quaternario		
Lockergestein	Detriti		
Aare-Granit	Granito dell'Aar	Südliche Gneisszone	Zona gneissica meridionale
Flaserige bis massive Varietät	Varietà lenticolare a massiccia	Vorwiegend Bändergneise	Gneis listati prevalente
Flaserige biotitreiche Varietät	Varietà lenticolare, ricca di biotite	Helle feldspatreiche Gneise	Gneis chiari ricchi di feldspato
Gneisige bis stark gneisige Varietät	Varietà gneissica	Augengneise	Gneis occhiadini
"Schöllenen Syenit"	"Sienite" della Schöllenen	Vorwiegend feinkörnige mesokrate Gneise, Glimmerschiefer	Gneis mesocratici a grana fine prevalente, Micascisti
Hydrothermal zersetzter Granit	Granito disgregato da fenomeni idrotermali	Schiefrige Gneise	Gneis scistososi
		Quarzreiche Gneise	Gneis ricchi di quarzo
Ganggesteine	Dicchi	Heller Aplitgranit	Granito aplitico chiaro
Dunkle Lamprophyre, oft schiefbrig	Lamprofir scuri, spesso scistososi		
Störungen	Diaclasi		
Ruschelzonen	Miloniti, Cataclasiti		



Mesozoikum	Mesozoico
Dunkelgraue Kalke	Calcarei scuri
Helle marmorisierte Kalke, Marmore	Calcarei chiari marmorei, marmi
Tonschiefer mit feinen Kalkschichten	Argilloscisti con intercalazioni fini di calcari
Feinplattige Kalke z. T. mit Tonschieferzwischenlagen	Calcarei tabulari p.p. con intercalazioni di argilloscisti
Dolomit und Gips	Dolomia e gesso

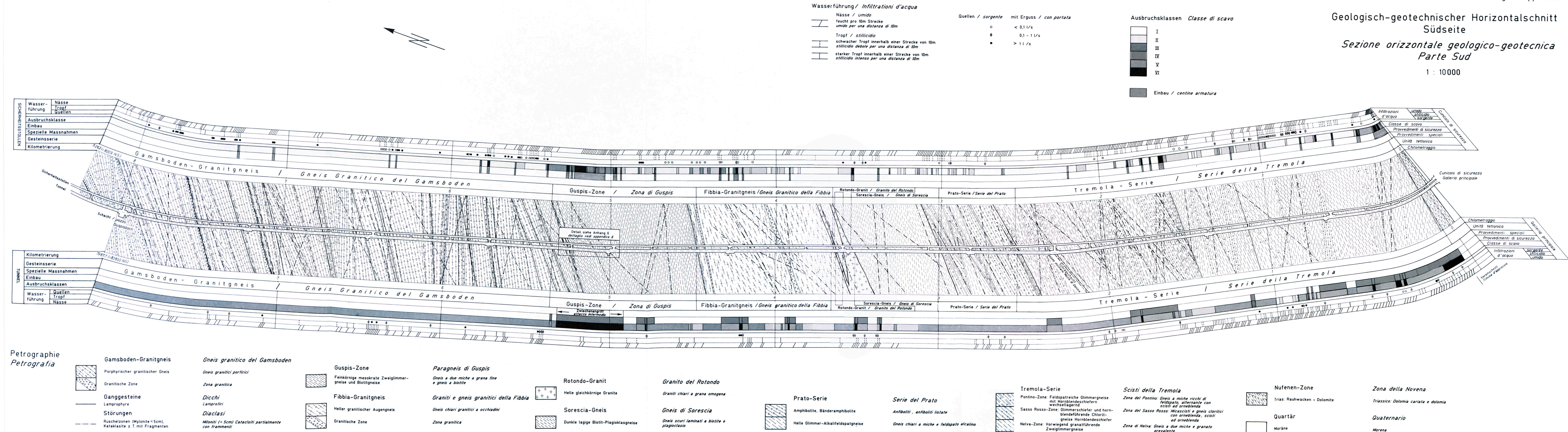
Permokarbon	Permocarbonifero
Weissliche zersetzte Serizitschiefer bis Phyllite	Scisti alternati chiari da sericitici a filladici
Helle lagige Serizitschiefer	Scisti a sericite chiari laminari
Konglomeratische chlorit- und biotit-führende Serizitschiefer	Scisti conglomeratici a sericite con clorite e biotite
Biotitföhrnde Chlorit-Serizit-Schiefer und-Gneise	Scisti e gneis a sericite e clorite con biotite
Idem mit Bänken aus hellen quarz- und feldspatreichen Gneisen (z. T. vulkanogen)	Idem con banchi di gneis chiari ricchi di quarzo e feldspato (p. p. vulcanogenici)

Paragneise	Paragneis
Feinkörnige mesokrate Zweiglimmergneise	Gneis mesocratici a due miche
Idem mit Serpentinlinsen	Idem con lenti di serpentine
Idem mit Linsen und Bändern aus Amphibolit	Idem con lenti e letti anfibolitici

Gamsboden-Granitgneis	Gneis granitico del Gamsboden
Heller porphyrischer granitischer Gneis	Gneis granitico chiaro, porfiroide

Geologisch-geotechnischer Horizontalschnitt
Südseite
*Sezione orizzontale geologico-geotecnica
Parte Sud*

1 : 10 000



„Spezialvortrieb Mesozoikum“ Tm 4135–4439

Geologischer Horizontalschnitt durch die Sohle
der oberen Widerlagerstollen

1 : 400

Mesozoikum

Jura

- 1 feinsplattige Kalk-, grau oder hellgrau
z.T. mit feinen Tonschieferzwischenlagen
- 2 feine Wechsellagerung von mousgrauen Tonschiefern
mit grauen Kalken
idem., mit Quarz- und Kalzitlinsen
- 3 dünnstriefrige Kalk- und Tonschiefer
idem., mit Quarzlinsen

Jura + Trias verschuppt

- 4 Dolomit mit Tonschiefern und Kalken,
häufig mit Quarzlinsen,
meist verlehmt

Trias

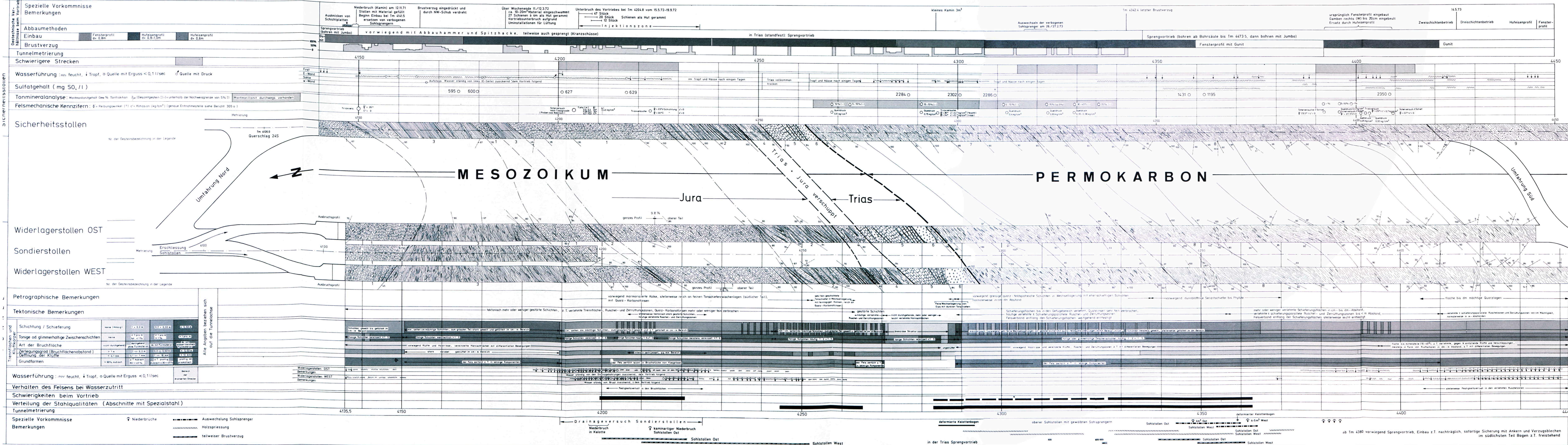
- 5 Dolomit mit Gips und Tonschieferzwischenlagen
brekziös aussehend
idem., reich an Gips und Tonschiefern
- 6 massiger Gips (z.T. mit Spuren von Anhydrit)
z.T. brekziös aussehend

Permokarbon

- 7 weisse, zersetzte, verlehnte, verschieferte und
mylonitisierte Serizitgneise, z.T. mit ausgezogenen Augen
idem., mit Quarzlinsen
- 8 helle Serizitschiefer bis Phyllite
idem., mit Quarzlinsen
- 9 biotitführende Chlorit- Serizitschiefer
idem., mit Augen und Knoten aus Quarz und Feldspat

Trennflächen

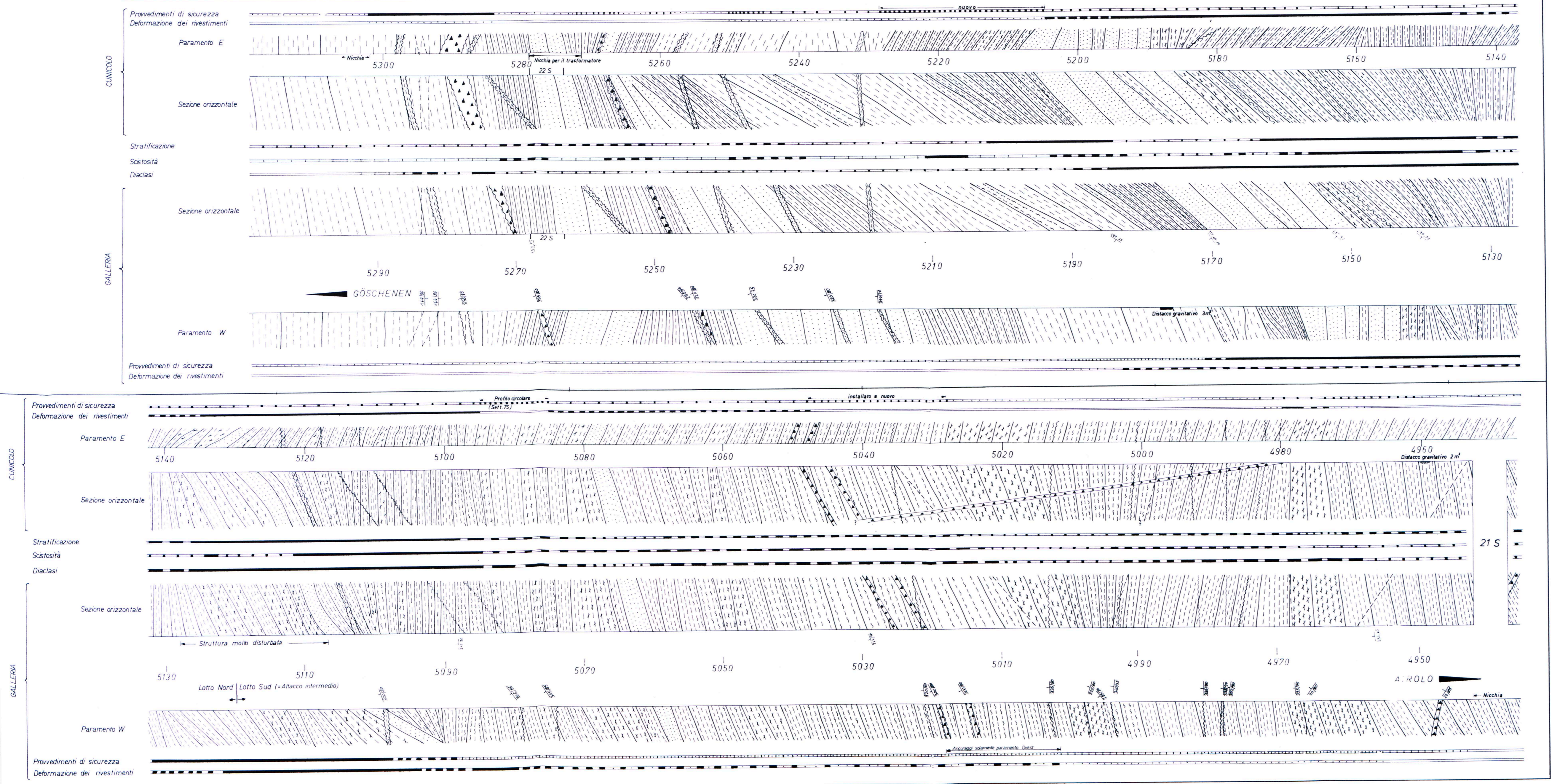
- interpolierte stratigraphische und tektonische Grenzen
- interpolierte petrographische und lithologische Grenzen
(Grenzen z.T. rel. unsicher)
- allgemeine Orientierung der Schichtungs-/Schieferungsflächen
- allgemeine Orientierung der Klüftung
- Zahl = Fallwinkel (100° Teilung)



Zona di Guspis, attacco intermedio

Rilevamenti geologico - geotecnici
dal m 4950 al m 5300

1 : 400



LEGGENDA

Segni convenzionali per petrografia, stratificazione, diaclasi eccetera, vedi anche leggenda generale dei rilevamenti geologici.

PROVVEDIMENTI DI SICUREZZA NEL CUNICOLO

- Spruzzatura di calcestruzzo
- Centine di ferro, distanza 100 cm
- " " " " 75 cm
- " " " " 50 cm

PROVVEDIMENTI DI SICUREZZA NELLA GALLERIA STRADALE

- Spruzzatura di calcestruzzo
- Centine di ferro, distanza 75 cm + 1 ancoraggio per centina
- " " " " " " +2 (reciprocamente)
- " " " " " " +2

DEFORMAZIONE VISIBILE DEI RIVESTIMENTI

- debole
- media (5-10 cm)
- intensa

Bergwasser (Wasserführung und Chemismus)
Infiltrazioni d'acqua e chimismo

Längsprofil / profilo longitudinale
1 : 20 000

Wasserführung / Infiltrazioni d'acqua
geologische Aufnahme / Rilevamento geologico

Tropf / stillicidio
1-3 Tropfstellen pro 10m Strecke / 1-3 luoghi di stillicidio per 10m di tragitto
>3 Tropfstellen pro 10m Strecke / >3 luoghi di stillicidio per 10m di tragitto
starker Tropf / stillicidio forte

Quellen / sorgenti
O < 0.1 l/s
● 0.1 - 1 l/s
● ≥ 1 l/s

Nässe / umidità
einzelne nasse Stellen pro 10m Strecke / Alcuni luoghi umidi per 10m di tragitto
vorwiegend nass auf 10m Strecke / Prevalentemente umido o bagnato per 10m di tragitto

nach Auskleidung / dopo il rivestimento

Ringfluten:
feucht / umido
Tropf / stillicidio
Fließwasser / acqua di scorrimento

Chemismus / Chimismo
Sulfat- und Chloridgehalt / Tenore in solfato e cloruro
1 mmol = 1 mg/l
Sulfat / solfato
Chlorid / cloruro
200 mg / Grenze für Betonaggressivität / 200 mg / limite di aggressività per cemento

Gesamthärte / Durezza totale
sehr weich 7,1 / molto dolce
weich 14,3 / dolce
mittelhart 21,4 / mediamente dura
ziemlich hart 32,1 / abbastanza dura
hart 59,6 / dura
sehr hart / molto dura

Erdalkalien / Terre alcaline
10 mg/l
100 mg/l
1000 mg/l

Legende Petrographie
siehe Anhang 3

Wasserführung

zur Zeit der geologischen Aufnahme
Tunnel Tropf Quellen Nässe
Sicherheitsstollen Tropf Quellen Nässe

Tunnel nach erfolgreicher Auskleidung
nach Auskleidung vor Wandplattenmont

Chemismus

ph-Wert

Sulfatgehalt
Chloridgehalt

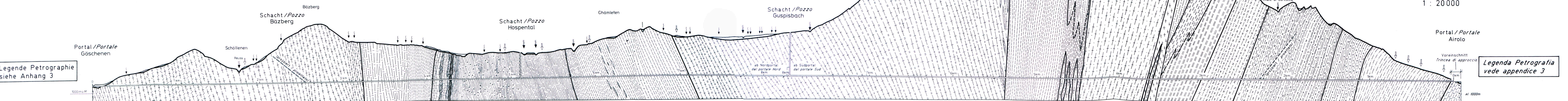
Gesamthärte (°franz)

Erdalkalien

Bemerkungen

Wassertemperatur (°C)

Sicherheitsstollen
Tunnel
Temperaturverlauf

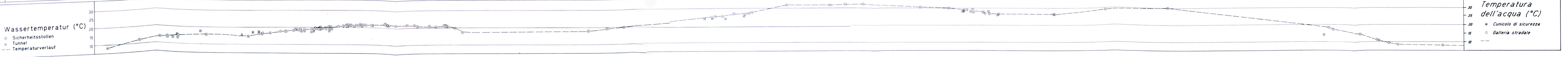


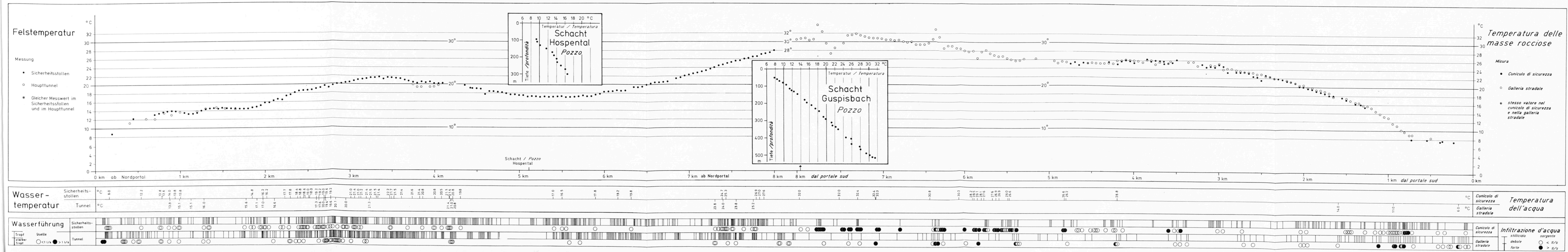
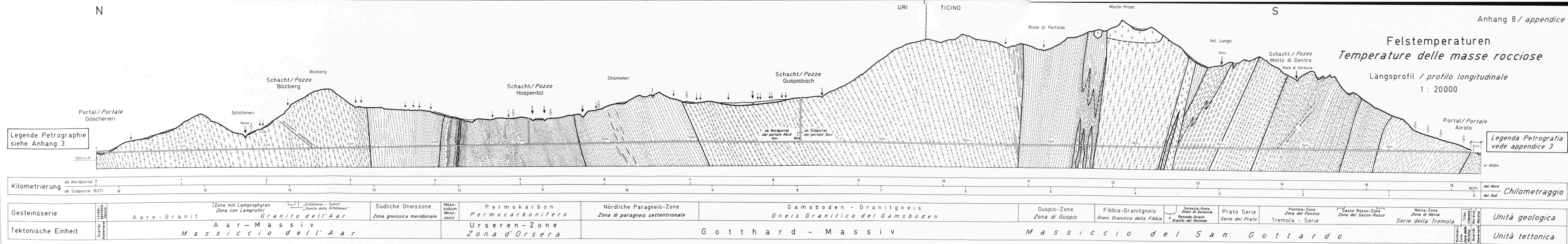
Legenda Petrografia
vede appendice 3

Gesteinsserie	Locker- gestein Detrit	Aare - Granit	Zone mit Lamprophyren Zona con Lamprofi	Schöllenen-Syenit Siente della Schöllenen	Südliche Gneisszone Zona gneissica meridionale	Meso- zoikum Mesozoico	Permokarbon Permocarbonifero	Nördliche Paragneis - Zone Zona di paragneis settentrionale	Gamsboden - Granitgneis Gneis granitico del Gamsboden	Guspis - Zone Zona di Guspis	Fibbia - Granitgneis Gneis Granitico della Fibbia	Sorescia-Gneis Gneis di Sorescia Rotondo-Granit Granito del Rotondo	Prato - Serie Serie del Prato	Pontino-Zone / Zona del Pontino Tremola - Serie	Sasso Rosso-Zone Zona del Sasso-Rosso Serie della Tremola	Neiva-Zone / Zona di Neiva	Tras- sacco Moring	Unità geologica
Gebirgs- durchlässigkeit	sehr gut molto buona	auf Trennflächen mittel bis gut permeabilità da media a buona su superfici di separazione			stark anisotrop, parallel zur Schieferung gut, quer dazu schlecht Schieferige Gesteine schlecht, Bankige gut fortemente anisotropa permeabilità buona parallelamente alla scistosità cattiva trasversalmente. Rocce scistose poco permeabili, quelle a banchi ben permeabili	Kalke gut Tonchiefer schlecht Trias dicht buona per i calcari cattiva per gli argilloscisti Trias impermeabile	im allgemeinen schlecht, stark anisotrop. Feldspatreiche Gneise im Süden gut in generale cattiva, fortemente anisotropa. Gneiss feldspatici a sud ben permeabili	mittel, vor allem parallel zur Schieferung Permeabilità media soprattutto parallelamente alla scistosità	auf Trennflächen mittel bis gut su superfici di separazione permeabilità da media a buona	im allgemeinen gering. Grenzflächen bei Gesteinswechsel oft wasserführend in generale modesta Superfici di separazione spesso con afflusso d'acqua quando cambia la roccia	gering Permeabilità modesta	gering bis mittel Permeabilità da modesta a media	mittel media	mittel bis gross, Oberflächeneinfluss deutlich Permeabilità da media ad elevata, chiara influenza della superficie morfologica				Permeabilità delle rocce

Bemerkungen	Isolierung im Tunnel innerhalb des Blockschuttes während der Schneeschmelze 20-55 l/s nel tunnel all'interno del detritto a blocchi durante la fusione della neve 20-55 l/s	Schacht Bözberg total < 1 l/s Pozzo Bözberg totale < 1 l/s	Affluss d'acqua in seguito all'avanzamento Perforazioni per drenaggio Tentativo di iniezione cunicolo di sicurezza	Wasserandrang dem Vortrieb folgend 1-3 l/s Drainagebohrungen Iniektionsversuch Sicherheitsstollen	Schacht Hospental ca. 0.2 l/s Pozzo Hospental	Schacht Guspisbach ca. 1.5 l/s Pozzo Guspisbach	Schacht Motto di Dentro total < 1 l/s Pozzo Motto di Dentro totale < 1 l/s												stillicidio galleria sorgente stradale umido stillicidio cunicolo di sorgente sicurezza umido dopo rivestimento prima mont. elementi	al tempo del rilevamento geologico Galleria dopo rivestimento	Infiltrazioni d'acqua
-------------	---	---	---	--	---	---	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	---	-----------------------

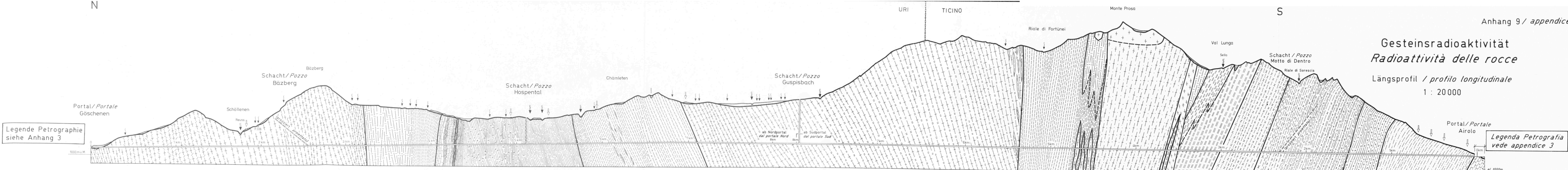
ph-Wert	7-12																			ph
Sulfatgehalt	200mg/l																			Tenore in solfato
Chloridgehalt	200mg/l																			Tenore in cloruro
Gesamthärte (°franz)																				Durezza totale
Erdalkalien																				Terre alcaline
Bemerkungen	Sulfid 1-2 mg/l																			Osservazioni





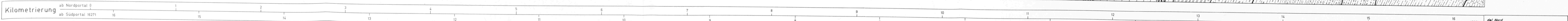
Gesteinsradioaktivität
Radioattività delle rocce

Längsprofil / profilo longitudinale
1 : 20000



Legende Petrographie
siehe Anhang 3

Legenda Petrografia
vede appendice 3



Gesteinsserie	Zone mit Lamprophyren Zona con Lamprofiri	Schöllenen Syenit Syenite della Schöllenen	Südliche Gneisszone Zona gneissica meridionale	Meso- zoikum Meso- zoico	Permokarbon Permocarbonifero	Nördliche Paragneis-Zone Zona di paragneis settentrionale	Gamsboden - Granitgneis Gneis Granitico del Gamsboden	Guspis-Zone Zona di Guspis	Fibbia-Granitgneis Gneis Granitico della Fibbia	Sarescia-Gneis Gneis di Sarescia Rotondo-Granit Granito del Rotondo	Prato-Serie Serie del Prato	Pontino-Zone Zona del Pontino Tremola - Serie	Sasso Rosso-Zone Zona del Sasso-Rosso	Nelva-Zone Zona di Nelva Serie della Tremola	Unità geologica
Tektonische Einheit	Aare - Granit	Granito dell'Aar	Aar - Massiv Massiccio dell'Aar		Urseren-Zone Zona d'Orsera		Gotthard - Massiv								Unità tettonica

