

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ
GEOTECHNISCHE SERIE

herausgegeben von der
Schweizerischen Geotechnischen Kommission
(Organ der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften)

MATERIAUX POUR LA GEOLOGIE DE LA SUISSE
SERIE GEOTECHNIQUE

publiés par la
Commission Géotechnique Suisse
(Organe de l'Académie Suisse des Sciences Naturelles)

Lieferung 88

CENTRE DE RECHERCHES SCIENTIFIQUES FONDAMENTALES ET APLIQUÉES DE SION
(CRSFA)
Programm GÉOTHERMOVAL
Erforschung und Auswertung der geothermischen Ressourcen im Kanton Wallis

Hydrogeologische und geothermische Untersuchungen im Simplontunnel

(Wallis, Schweiz und Ossola, Italien)*

G. Bianchetti, F. Zuber, F.-D. Vuataz und J.-D. Rouiller

1993

Verkauf durch: Schweizerische Geotechnische Kommission, ETH-Zentrum, 8092 Zürich

* Publiziert mit Unterstützung des Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ
GEOLOGISCHE SERIE
Herausgegeben von der
Schweizerischen Geologischen Kommission
Ergänzen der Schweizerischen Anstalt für das Wasserbauwesen

ZENTRALE RECHENANSTALT FÜR HYDROLOGIE UND
HYDRAULIK
Forschung und Anwendung der geotechnischen Methoden im Wasserbau

Hydrologische und geothermische Untersuchungen im Rhodanental

(Teil 1: Hydrologische Untersuchungen)

G. Blöchl, H. Blöchl, H. Blöchl, H. Blöchl

Redaktion und Satz: Schweizerische Geotechnische Kommission
Lithos und Druck: Vontobel Druck AG, Wetzikon
Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

ISBN 3-907997 21 2

VORWORT DER SCHWEIZERISCHEN GEOTECHNISCHEN KOMMISSION

Im vorliegenden Schlussbericht der GEOTHERMOVAL-Studie (Programm zur Erforschung und Auswertung der geothermischen Ressourcen im Kanton Wallis) über den Simplontunnel werden die Untersuchungen während der Bauzeit zu Beginn des 20. Jahrhunderts aufgearbeitet und die in den letzten Jahren durchgeführten hydrogeologischen, geothermischen und physikochemischen Untersuchungen präsentiert. Dank den umfangreichen Messungen des damaligen Sachbearbeiters, Prof. H. Schardt, lässt sich die ursprüngliche Situation in den beiden knapp 20 km langen Tunnelröhren mit dem heutigen Zustand vergleichen. Damit wird der anthropogene Einfluss auf die Gebirgstemperatur über einen Zeitraum von über 80 Jahren nachvollziehbar. Die vorliegende Arbeit gibt Aufschluss über den geothermischen Gradienten im Simplongebiet, insbesondere wird der Abkühlungseffekt durch die Lüftung im Tunnel deutlich.

In einem abschliessenden Kapitel werden zukunftsweisende Überlegungen und Anregungen zur praktischen Nutzung der geothermischen Ressourcen aufgestellt. Gerade für die im Rahmen der NEAT in naher Zukunft bevorstehenden grossen Tunnelbauten sind die ausgeführten Untersuchungen von grösstem Interesse.

Die vorliegende Arbeit stellt eine wertvolle Erweiterung zu anderen Publikationen der Geotechnischen Kommission im Zusammenhang mit hydrogeologischen Fragestellungen dar. Die Schweizerische Geotechnische Kommission dankt den Autoren für die Möglichkeit, diesen Beitrag in ihre Publikationsreihe aufzunehmen, und für die gute Zusammenarbeit bei der Drucklegung. Auch dem Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung sei an dieser Stelle für die finanzielle Beteiligung an den Druckkosten gedankt.

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

Zürich, Januar 1994

Der Präsident der Schweizerischen
Geotechnischen Kommission

C. Schindler

VERDANKUNGEN DER VERFASSER

Ganz speziell bedanken wir uns beim Büro für beratende Geologie Odilo Schmid, das uns seinen Mitarbeiter Herrn F. Zuber für das Programm GEOTHERMOVAL zur Verfügung stellte.

Unser Dank richtet sich ebenfalls an die zahlreichen Personen, die mit ihrer Unterstützung und Mitarbeit diese Arbeit ermöglichten:

Herr Professor A. Baer, Vize-Direktor des Bundesamtes für Energiewirtschaft sowie Dr. A. Fehr und Herr M. Brunner vom gleichen Amt; Herr Professor L. Rybach und Herr B. Matthey, Vertreter der Eidgenössischen Kommission für Geothermie und unterirdische Wärmespeicherung (KGS); Herr M. Steiner, Chef der Dienststelle für Energie, Kanton Wallis.

Herr L. Borel und Herr Delèze, Ingenieure bei den SBB; Herr Pfammatter, Bahnmeister des Bahnhofes Brig und sein Vorgänger Herr Schmidhalter.

Herr Dr. P.-P. Haenni, Kantonschemiker und seine Mitarbeiter Herren Dr. C. Theytaz, Dr. J.L. Luisier und Frau E. Reynard vom Kantonslabor Wallis.

Herr Professor G. Martinotti der erdwissenschaftlichen Fakultät der Universität von Torino (Italien); Herren Dr. Merla und Dr. L. Marini von GEOTERMICA ITALIANA srl in Pisa (Italien); Herr G. dalla Pozza, Ingenieur der ENEL, Goglio (Italien).

Herr Professor F. Jaffé, mineralogisches Institut der Universität Genf; Herr Professor F. Zwahlen, Direktor des Centre d'Hydrogéologie in Neuenburg (CHYN).

Herr M. Bodenmann vom Büro Bodenmann, Andenmatten, Schmidt und Partner in Brig; Herren Kradolfer und Luppi, Ingenieure des technischen Büros Rotpletz-Liehnard in Olten.

Herr R. Muralt, Doktorand am CHYN, für die Übersetzung; Frau M.-Ch. Haenni und Fräulein J. Frossard des CRSFA, für das Sekretariat.

Diese Studie wurde von folgenden Institutionen finanziell unterstützt:

- Bundesamtes für Energiewirtschaft
- Dienststelle für Energie, Kanton Wallis
- Centre de Recherches Scientifiques Fondamentales et Appliquées de Sion
- Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, Projekte Nr. 21-26632.89, 20-31186.91
- Gemeinden Brig und Naters

Publiziert mit Unterstützung des Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung.

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT	III	5 ZUSAMMENSTELLUNG DER	
VERDANKUNGEN	IV	RESULTATE	23
INHALTSVERZEICHNIS	V	5.1 Hydrothermale Zirkulationen im Simplon-	
ZUSAMMENFASSUNG	VII	massiv	23
RÉSUMÉ	IX	5.2 Geothermisches Potential	29
RIASSUNTO	XI	6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND	
ABSTRACT	XIII	VORSCHLÄGE	31
1 EINFÜHRUNG	1	LITERATURVERZEICHNIS	33
1.1 Bauphase des Eisenbahntunnels	1	ANHANG	35
1.2 Erneutes Interesse für die Thermalquellen im		Anhang 1: Strukturgeologische Karte von Simplon	
Simplontunnel	1	und Val d'Ossola	35
1.3 Historische Forschungsarbeiten	2	Anhang 2: Detaillierte geologische Beschreibung der	
2 HYDROGEOLOGISCHER ÜBERBLICK		vom Simplontunnel durchquerten	
UND GEOTHERMIE	3	Formationen	37
2.1 Geologischer Überblick	3	Anhang 3: Messungen von Schardt zwischen 1898	
2.2 Tektonischer Überblick	3	und 1912	39
2.3 Hydrogeologische Aspekte	4	Anhang 4: Quellkataster (1987)	59
2.4 Geothermische Aspekte	6	Anhang 5: Physikalische Charakteristiken der wäh-	
3 DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN UND		rend der 5 Kampagnen ausgewählten	
RESULTATE	7	Quellen (rechte Tunnelröhre)	61
3.1 Temperatur des Gesteins und des Quellwassers	7	Anhang 6: Physikalische Charakteristiken der wäh-	
3.2 Sondierbohrungen im Simplontunnel	8	rend der 5 Kampagnen ausgewählten	
3.3 Untersuchung der Thermalquellen	13	Quellen (linke Tunnelröhre)	63
3.4 Physikalische Parameter der Wässer	13	Anhang 7: Resultate der chemischen Analysen sämt-	
3.5 Typologie und Geochemie der Wässer	16	licher Wasserproben	65
4 INTERPRETATION DER RESULTATE	19	Anhang 8: Korrigierte Felstemperaturen	67
4.1 Hydrochemie und Reservoir-Gesteine	19	Anhang 9: Felstemperaturen entlang des bestehen-	
4.2 Temperatur in der Tiefe und Verweilzeit	20	den Tunnels (1987 - 1988)	69
4.3 Evaluation der Infiltrationszone	21	Anhang 10: Felstemperaturen bei km 10.41 ab Nord-	
4.4 Modellierung der Abkühlung des Gesteins	22	portal	71
		Anhang 11: Felstemperaturen bei km 15.36 ab Nord-	
		portal	73
		Anhang 12: Abflussdaten des Kanals am Südportal	75

FIGUREN- UND TABELLENVERZEICHNIS

Figurenverzeichnis

Fig. 1.1: Situationsplan des Simplontunnels.	1
Fig. 2.1: Geologisches Profil entlang des Tunnels mit der Lage der beprobten Quellen und Bohrungen.	4
Fig. 2.2: Messungen der Temperatur von Gestein und Wasser während der Bauphase des Tunnels (1898-1905) im Vergleich zur Überdeckung.	6
Fig. 3.1: Felstemperaturen von 1898-1905, 1910 und 1987-1988 entlang des Simplontunnels.	7
Fig. 3.2: Technische und geologische Profile der vier Bohrungen im Simplontunnel.	10
Fig. 3.3: Temperaturprofil in der Bohrung F1.	11
Fig. 3.4: Temperaturprofil in der Bohrung F2.	11
Fig. 3.5: Temperaturprofil in der Bohrung F3.	12
Fig. 3.6: Temperaturprofil in der Bohrung F4.	12
Fig. 3.7: Verteilung der physikalischen Parameter der Quellen im Simplontunnel (Niedrigwasserstand, April 1988).	14
Fig. 3.8: Gegenüberstellung von Temperatur, elektrischer Leitfähigkeit und Schüttung (Niedrigwasserstand, April 1988).	14
Fig. 3.9: Entwicklung der Temperatur einiger Quellen des Tunnels während des 20. Jahrhunderts.	15
Fig. 3.10: Saisonale Schwankungen von Temperatur, elektrischer Leitfähigkeit und Schüttung einiger Quellen aus dem Simplontunnel.	16
Fig. 3.11: Darstellung der Wässer aus den wichtigsten Quellen und den Bohrungen im Diagramm nach Schoeller.	17
Fig. 4.1: Verhalten der physikalischen und chemischen Hauptkomponenten in Funktion der Gesamtmineralisation (TDS).	19
Fig. 4.2: Verhalten der Calciumkonzentration in Funktion des Sulfatgehaltes.	20
Fig. 4.3: Verhältnis zwischen Deuterium und Sauerstoff-18 der Wässer aus dem Simplontunnel und von Oberflächenwässern der Alpe Veglia.	22
Fig. 5.1: Die sechs hydrogeologischen Einheiten des Simplonmassivs und deren grundsätzliche Charakterisierungen.	24

Fig. 5.2: Temperatur, elektr. Leitfähigkeit und Schüttung der Wasservorkommen in der hydrogeolog. Einheit Veglia.	25
Fig. 5.3: Korrelation zwischen Tritium, Temperatur und Mineralisation der Wässer der HE Veglia und Teggiolo.	26
Fig. 5.4: Lage des Einzugsgebietes der Cairasca und des vermuteten Grundwassereinzugsgebietes der hydrogeologischen Einheiten Veglia, Teggiolo und Antigorio.	26

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1: Physikalische Charakteristiken des Quellwassers bei km 10.41 ab Nordportal.	8
Tab. 3.2: Physikalische Charakteristiken des Quellwassers bei km 15.36 ab Nordportal.	8
Tab. 3.3: Charakteristiken und wichtigste Resultate der vier Bohrungen im Simplontunnel.	9
Tab. 3.4: Geologisches Umfeld der beprobten Quellen und Bohrungen.	13
Tab. 3.5: Einteilung der beprobten Quellen aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung.	16
Tab. 4.1: Entwicklungsablauf der Wasserzirkulationen im kristallinen Milieu des Simplongebietes.	20
Tab. 4.2: Maximaltemperaturen berechnet mittels verschiedener Geothermometer.	21
Tab. 4.3: Sauerstoff-18 und Deuterium im Wasser der Quellen und Bohrungen des Simplontunnels und die daraus berechneten Koten der Infiltrationszonen.	21
Tab. 4.4: Resultate der thermischen Modellierung.	22
Tab. 4.5: Berechnete geothermische Gradienten in verschiedenen alpinen Tunnels.	22
Tab. 5.1: Charakteristik der sechs hydrogeologischen Einheiten (HE) entlang des Tunnels.	23
Tab. 5.2: Unterteilung der Quellen der hydrogeologischen Einheit Veglia in zwei Gruppen und deren grundsätzliche Charakterisierung.	26

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Programms GEOTHERMOVAL (Erforschung und Auswertung der geothermischen Ressourcen im Kanton Wallis) wurden die subthermalen und thermalen Wässer des Simplontunnels untersucht. Zwei parallele Tunnelröhren von ca. 20 km Länge verbinden das Wallis mit dem Ossola-Tal in Italien unter einer Felsbedeckung, die maximal 2150 m misst. Von Brig her durchqueren sie nach der mesozoischen Sedimentbedeckung des Gotthardmassivs (Kalkglimmerschiefer) eine Abfolge von verfalteten und zerklüfteten penninischen Decken, welche aus paläozoischen, kristallinen Kernen (Gneise) und mesozoischen Sedimentbedeckungen (Glimmerschiefer und karbonatisch-evaporitische Gesteine ohne Steinsalz) bestehen. Ein bedeutendes Bruchsystem das senkrecht zur Tunnelachse verläuft (Bruchzone von Veglia), wurde im zentralen Tunnelabschnitt durchfahren. Die Simplon-Centovalli-Linie durchquert als bedeutende Störung das Simplonmassiv. Diese Bruchzone trennt zwei tektonische Blöcke, wobei der nördliche um ca. 5-6 km gehoben wurde. Er ist durch junge radiometrische Alter zwischen 8-15 Ma und durch hohe Hebungsraten von rund 1.1 mm/a gekennzeichnet.

Während des Tunneldurchstichs zu Beginn des Jahrhunderts wurden mehr als 200 Wasseraustritte mit Temperaturen bis zu 55 °C angetroffen, die sich in thermischem Gleichgewicht mit dem Felsen befanden. Die Schüttungen waren teilweise sehr hoch und erreichten bis zu 70'000 l/min bei km 15.4 ab Nordportal. Die grosse Mehrheit der Quellen trat aus der Tunneldecke oder den Wänden aus. Die Wasserzirkulationen wurden vor allem in zwei wasserführenden Abschnitten beobachtet, die zwischen km 9.3 und km 10.6 und bei km 15.4 karbonatisch-evaporitische Gesteine durchqueren. Die Wässer zirkulierten entlang von Schichtgrenzen, Klüften und Karstkanälen. Mittels Färbversuchen konnte eine Verbindung zwischen den Oberflächenwässern der Alpe Veglia in Italien und den bedeutenden, subthermalen Karstquellen bei km 15.4 bewiesen werden. Die kristallinen Kerne, die Kalkglimmerschiefer und die Glimmerschiefer waren demgegenüber meist trocken, mit Ausnahme einiger weniger Quellen, die rasch versiegt sind. Seit dem Durchstich sind sowohl der Fels als auch die Wässer abgekühlt und man beobachtet heute in der zentralen Tunnelpartie eine maximale Abkühlung des Gesteins von rund 15-30 °C und des Wassers von rund 10-35 °C. Der Gesamtabfluss der von den beiden Tunnelröhren dräniert wird, erreichte zu Jahrhundertbeginn rund 85'000 l/min und hat sich heute bei rund 60'000 l/min stabilisiert.

Im Rahmen dieser Studie wurden 1987 rund 150 Quellen mit einer Schüttung von mehr als 1 l/min aufgenommen und in 5 Messkampagnen zwischen Dezember 1987 und Dezember 1989 gemessen (Schüttung, Temperatur, elektri-

sche Leitfähigkeit, pH). Alle 500 m wurden 10 cm tiefe Löcher in die Tunnelwand gebohrt. Je 6 horizontale, 10 m lange Bohrungen wurden zu beiden Seiten je einer thermalen (Wassertemperatur 25-40 °C) und einer subthermalen (Wassertemperatur 13-14 °C) Quellzone durchgeführt (total 12 Löcher). 1990 wurden vier vertikale Bohrungen vom Tunnel aus vorgetrieben:

- **F1:** gebohrt in den Marmoren und Kalkschiefern mit evaporitischen Einlagen der Veglia-Zone, bis auf eine Tiefe von 91 m. Aus einer zerklüfteten Zone bei -87 m tritt 45 °C warmes Wasser mit einer Mineralisation von 1650 mg/l und einem stabilisierten, artesischen Ausfluss von 60 l/min aus. Am Bohrkopf wurden mehr als 25 bar Druck gemessen.
- **F2:** gebohrt in den Glimmerschiefern der Lebendun-Zone. Diese Bohrung erreicht eine Tiefe von 108 m und ist völlig trocken. Die Temperatur an der Bohrlochsohle erreicht 42.5 °C.
- **F3:** gebohrt in den schiefrigen Gneisen der Berisal-Zone. Die Bohrung erreicht eine Tiefe von 65.5 m und schüttet ein Thermalwasser von 38.4 °C und einer Mineralisation von 720 mg/l. Der artesische Ausfluss stabilisierte sich bei 9 l/min. Am Bohrkopf übersteigt der Druck 12 bar.
- **F4:** gebohrt in den gebänderten Gneisen mit Anhydritäderchen der Monte Leone-Decke. Diese Bohrung erreicht eine Tiefe von 148.5 m und sie war zu Beginn völlig trocken. Die Temperatur erreicht an der Bohrlochsohle 57 °C. Später wurde das Aussickern eines stark mineralisierten Wassers (Schüttung = ca. 0.01 l/min, TDS = 7870 mg/l, Temperatur am Bohrkopf = 29.2 °C) bemerkt.

Die durchgeführten Temperaturmessungen in den 10 cm-Löchern zeigten ein thermisches Gleichgewicht zwischen Tunnelluft und Gestein. Demgegenüber existiert eine Temperaturdifferenz zwischen Gestein und Wasser innerhalb eines kleinen Radius rund um den Tunnel. Die 10 m-Bohrungen zeigten, dass die Felstemperaturen in der Nähe der warmen Quellen ansteigen. Somit erwärmt die Wasserzirkulation das Gestein. Genau das Gegenteil ist bei den subthermalen Quellen der Fall. Die thermischen Profile der trockenen Bohrungen F2 und F4 zeigen, dass die Abkühlung des Gesteins durch die Luftzirkulation über eine Tiefe von 150 m hinausgeht. Die Modellierung der Abkühlung des Gesteins während 80 Jahren erlaubte es, einen korrigierten, geothermischen Gradienten von 4.0 ± 0.5 °C/100 m in der Gegend der Bohrung F2, respektive von 2.8 ± 0.7 °C/100 m bei der Bohrung F4 zu berechnen. Zudem konnte die von der Abkühlung betroffene Zone auf ca. 250 m rund um den Tunnel berechnet werden.

Die grosse Mehrheit der Quellen findet sich im zentralen Teil des Tunnels zwischen km 9.8 und 10.7, die mengenmässig bedeutendsten Quellen befinden sich aber zwischen km 15.3 und 15.4. Die Schüttung ist im allgemeinen geringer als 50 l/min, konnte aber bei einer Quelle auf über 10'000 l/min geschätzt werden. Die Temperaturen schwanken zwischen 8 und 45 °C und zwei Drittel der Wässer sind thermal. Die Mineralisation schwankt je nach geologischer Formation zwischen 200 und 7900 mg/l, mit Werten zwischen 1200 und 1600 mg/l für die grosse Mehrheit der Wässer. Meist schwanken die physikalischen Parameter wenig. Dies weist auf eine lange unterirdische Verweildauer hin.

14 Quellen und die wasserführenden Bohrungen wurden wiederholt auf Chemie und Isotopengehalte analysiert. Es lassen sich drei geochemische Familien unterscheiden:

- **Calcium-Sulfat-Wässer** mit einer zwischen 1200 und 2000 mg/l liegenden Mineralisation und geringen Gehalten an Alkalien und Halogenen. Sie bezeugen eine Zirkulation in karbonatisch-evaporitischen Gesteinen mit Auflösung von Anhydrit und Gips. Die Mehrheit der Wässer des Tunnels gehört zu dieser Familie.
- **Natrium-Sulfat-Wässer** mit im allgemeinen erhöhter Mineralisation zwischen 700 und 7900 mg/l. Sie sind durch hohe Gehalte an Alkalien charakterisiert und zeugen von langsamen Zirkulationen in den schiefrigen Gneisen. Die Bohrung F4 zeigt mit 1800 mg/l respektive 440 mg/l erhöhte Gehalte an HCO₃ und Cl, die sich durch die hohe Aggressivität dieses sauren Wassers (pH = 6) gegenüber den Gneisen erklären. Eine Herkunft des Cl aus Evaporiten wird ausgeschlossen.
- **Calcium-Bikarbonat-Wässer** mit einer schwachen Mineralisation von weniger als 500 mg/l. Sie zirkulieren in den zerklüfteten Gneisen der Antigorio-Decke.

Sechs hydrogeologische Einheiten (HE) wurden aufgrund der Lithologie der geologischen Formationen und der physiko-chemischen Eigenschaften der Wässer ausgeschieden:

- **HE Sion-Courmayeur** (km 0 bis 4.1 ab Nordportal). Sie umfasst die Kalkglimmerschiefer des NW-Teils des Tunnels. Die Zirkulationen treten in Form von kalten Quellen vor allem in der Nähe des Portals und von km 2.5 auf. Sonst ist die Durchlässigkeit gering und Quellen sind rar.
- **HE Berisal** (km 4.1 bis 9.4). Sie ist charakterisiert durch Zirkulationen in den schiefrigen Gneisen der Monte Leone-Decke und der Berisal-Zone. Die Durchlässigkeit ist sehr gering, die spezifische Ergiebigkeit beträgt 5 l/min pro km. Die Verweildauer dieser Wässer ist hoch (kein Tritium vorhanden) und die Berechnungen anhand der Geothermometer weisen darauf hin, dass die erreichte Gleichgewichtstemperatur Wasser/Fels (40-70 °C) höher ist, als die Austrittstemperatur (30-40 °C). Die Wässer sind chemisch zum Ca>Na; SO₄>HCO₃-Typ zu zählen. Aufsteigende Thermalwasserzirkulationen werden in der Gegend der Quelle Q1 (km 8.5) angenommen. Die Infiltrationsknoten, die anhand

der stabilen Isotope berechnet wurden, liegen zwischen 1700 (Bohrung F3) und 2800 m.ü.M (Quelle Q1).

- **HE Veglia** (km 9.4 bis 10.7). Sie umfasst mehr als hundert Quellen in den karbonatisch-evaporitischen Gesteinen der Veglia-Zone. Der Chemismus vom Typ Ca; SO₄, die geringen Gehalte an Alkalien und die Sättigung des Wassers gegenüber den wichtigsten Sulfatmineralien bezeugen die Auflösung von Gips und Anhydrit. Eine extreme, vor allem räumliche Variabilität der physiko-chemischen Parameter wird beobachtet. Diese Variabilität kann durch gegeneinander abgeschottete, wasserführende Kluftsysteme erklärt werden. Die Wässer enthalten Tritium und die Verweilzeiten liegen in der Grössenordnung von 10-30 Jahren.
- **HE Lebendun** (km 10.7 bis 15.3). Sie umfasst Glimmerschiefer, Gneise, Metakonglomerate und Kalkschiefer mit sehr schwacher Durchlässigkeit. Dieser Abschnitt ist trocken.
- **HE Teggiolo** (km 15.3 bis 15.4) Sie ist durch die sehr hohe Durchlässigkeit der zerklüfteten und stark verkarsteten Marmore der Teggiolo-Zone charakterisiert. Aus dieser hydrogeologischen Einheit treten heute ca. 55'000 l/min aus. Diese subthermalen Wässer besitzen einen Chemismus vom Typ Ca; SO₄ und sie sind ebenfalls durch Gips und Anhydrit geflossen. Die saisonalen Schwankungen der physiko-chemischen Parameter und die sehr hohe Fliessgeschwindigkeit (>10 m/h) weisen auf eine rasche Grundwasserneubildung durch kalte und wenig mineralisierte Oberflächenwässer hin. Das Einzugsgebiet der Cairasca (Alpe Veglia) ist zugleich das Einzugsgebiet dieser hydrogeologischen Einheit.
- **HE Antigorio** (km 15.4 bis 19.8). Sie umfasst die zerklüfteten Antigorio-Gneise. Die Durchlässigkeit ist höher als in den schiefrigen Gneisen der hydrogeologischen Einheit Berisal. Die Zirkulationen sind relativ langsam, mit Verweilzeiten von etwa zehn Jahren. Die Wässer sind thermal (21 bis 28 °C), schwach mineralisiert und zeigen einen Chemismus von Typ Ca; HCO₃>SO₄.

Das geothermische Potential des Simplongebietes könnte auf verschiedene Art genutzt werden. Die ökonomisch günstigste Variante wäre die Nutzung des lauwarmen Wassers der Tunnelentwässerung mittels Wärmepumpen zur Gebäudeheizung. Das zur Verfügung stehende geothermische Potential beträgt 0.7 MWt in Brig und 10 MWt in Iselle (Südportal). Durch vertikale Bohrungen von 200 bis 1000 m, im Tunnel abgeteuft zwischen km 7 und 11, könnten möglicherweise in den wasserführenden Schichten der Veglia-Zone artesische Wässer mit einer Temperatur zwischen 45 und 80 °C gefasst werden. Der Transport dieser Wässer in isolierten Rohren nach Brig würde es erlauben, die Wärme ohne Wärmepumpen zu nutzen. In Anbetracht des vorliegenden Gesteins und der hohen Temperatur bereits in mittlerer Tiefe, könnte schliesslich auch das Hot Dry Rock-Verfahren in Betracht gezogen werden. Die Realisierung eines Hot Dry Rock-Projektes hätte den Vorteil, elektrische Energie zu produzieren, die in das Netz der Bundesbahnen eingespeist werden könnte.

RÉSUMÉ

Les venues d'eau subthermales et thermales drainées par le tunnel ferroviaire du Simplon ont été étudiées dans le cadre du programme GEOTHERMOVAL, dont les buts sont la prospection et la mise en valeur des ressources géothermiques du Valais. Deux galeries parallèles d'environ 20 km relient le Valais à la région de l'Ossola en Italie, sous une couverture rocheuse qui atteint au maximum 2150 mètres. Depuis Brig, elles traversent, après la couverture sédimentaire mésozoïque du massif du Gotthard (schistes argilo-calcaires), une succession de nappes penniques plissées et fissurées, comportant des noyaux cristallins paléozoïques (gneiss) et des couvertures sédimentaires mésozoïques (micaschistes et roches carbonato-évaporitiques sans halite). Un important système de failles perpendiculaires au tracé du tunnel a été recoupé dans le tronçon central (zone faillée de Veglia). Un accident majeur d'orientation NW-SE traverse le massif du Simplon (ligne Simplon-Centovalli). Cette cassure délimite deux compartiments, dont le septentrional a été soulevé d'environ 5-6 km. Celui-ci est caractérisé par des âges radiométriques jeunes (8-15 m.a.) et par des vitesses de soulèvement rapides (environ 1,1 mm/an) par rapport au compartiment méridional.

Lors du percement des deux galeries au début du siècle, plus de 200 venues d'eau furent rencontrées avec des températures allant jusqu'à 55 °C (en équilibre thermique avec la roche) et des débits considérables (jusqu'à 70'000 l/mn pour la zone autour du km 15.4 depuis le portail de Brig). La très grande majorité des sources émergeaient du plafond ou des parois des galeries. Les circulations furent observées essentiellement dans deux tronçons du tunnel, qui ont recoupé des formations carbonato-évaporitiques entre les km 9.3 et 10.6, ainsi qu'au km 15.4. Les eaux circulaient à travers des joints de stratification, des fissures et des fractures karstifiées. Une liaison entre les eaux de surface de l'Alpe Veglia (Italie) et les importantes circulations karstiques subthermales du km 15.4 fut démontrée par des essais de traçage. Par contre, les noyaux cristallins, les schistes argilo-calcaires et les micaschistes étaient secs, à l'exception de quelques rares venues d'eau qui ont rapidement tari. Depuis le percement, le rocher et les eaux se sont refroidis et actuellement on constate, dans la partie centrale du tunnel, un refroidissement maximum de la roche autour du tunnel de l'ordre de 15-30 °C et de l'eau de 10-35 °C. Le débit total drainé par les deux galeries et mesuré aux portails a atteint environ 85'000 l/min au début du siècle et s'est stabilisé actuellement à environ 60'000 l/min.

Dans le cadre de cette étude, environ 150 émergences (> 1 l/min) ont été recensées en 1987 et mesurées à 5 reprises entre décembre 1987 et décembre 1989 (débit, température,

conductivité, pH). Des micro-forages (10 cm) ont été réalisés tous les 500 m dans les parois du tunnel. Deux groupes de 6 forages horizontaux de 10 m ont été réalisés de part et d'autre de deux zones d'émergence, l'une avec des eaux thermales à 35-40 °C, l'autre avec des eaux subthermales à 13-14 °C. En 1990, quatre forages verticaux ont été effectués à partir du tunnel.

- **F1**, foré dans les marbres et calcschistes à niveaux évaporitiques de la Zone de Veglia, jusqu'à une profondeur de 91 m. Une zone fissurée à -87 m produit de l'eau à 45.0 °C et 1650 mg/l, avec un débit stabilisé jaillissant de 60 l/mn. Une pression de plus de 25 bars a été mesurée en tête de forage.
- **F2**, foré dans des micaschistes de la Zone du Lebendun. Ce forage, qui a une profondeur de 108 m, est complètement sec. La température au fond du trou atteint 42.5 °C.
- **F3**, foré dans des gneiss schisteux de la Zone de Berisal, jusqu'à une profondeur de 65.5 m. Ce forage est jaillissant avec un débit stabilisé de 9 l/mn. L'eau a une minéralisation de 720 mg/l et une température de 38.4 °C. La pression en tête de forage dépasse 12 bars.
- **F4**, foré dans des gneiss laminés à veinules d'anhydrite de la Nappe du Monte Leone. Ce forage, qui a une profondeur de 148.5 m, était au début complètement sec. La température au fond du trou atteint 57 °C. Des suintements très minéralisés ont été observés ultérieurement (débit = env. 0.01 l/mn, TSD = 7870 mg/l, température en tête du puits = 29.2°C).

Les mesures de température effectuées dans les micro-forages ont montré un équilibre entre l'air du tunnel et la roche. Par contre, une différence de température entre les eaux et le massif rocheux existe dans un faible rayon autour du tunnel. En effet, les forages de 10 m ont montré que les températures du rocher augmentent à proximité des émergences chaudes, indiquant un réchauffement de la roche par les circulations d'eau. Le contraire se produit dans la zone des venues d'eau subthermales. Les profils thermiques dans les forages secs F2 et F4 montrent que le refroidissement du rocher par la ventilation du tunnel s'étend radialement au delà de 150 m. La modélisation du refroidissement de la roche, sur une période de 80 ans, a permis d'établir le gradient géothermique corrigé (non perturbé par le refroidissement) à 4.0 ± 0.5 °C/100 m dans la région du forage F2, respectivement 2.8 ± 0.7 °C/100 m dans la région du forage F4. De plus, il a été possible d'estimer à environ 250 m l'épaisseur de la tranche de roche affectée par le refroidissement atmosphérique.

La grande majorité des venues d'eau se trouve dans la partie centrale du tunnel, entre les km 9.8 et 10.7, mais les circulations les plus importantes émergent entre les km 15.3 et 15.4. Les débits sont en général inférieurs à 50 l/mn, mais plus de 10'000 l/mn ont été estimés pour une seule venue d'eau. Les températures varient entre 8 et 45 °C et les deux tiers des eaux sont thermales. Les minéralisations varient entre 200 et 7900 mg/l, en fonction des formations géologiques, avec des valeurs de 1200-1600 mg/l pour la grande majorité des eaux. En général, les paramètres physiques varient peu au cours des saisons, indiquant des temps de séjour souterrain longs.

Des analyses chimiques et isotopiques répétées ont été effectuées sur 14 sources et sur les forages productifs. Trois familles géochimiques principales apparaissent.

- Les **eaux sulfatées-calciques** ont une minéralisation comprise entre 1200 et 2000 mg/l et de faibles teneurs en alcalins et halogènes. Elles témoignent d'une circulation dans des roches carbonato-évaporitiques avec dissolution d'anhydrite et de gypse. Cette famille constitue la grande majorité des venues d'eau du tunnel.
- Les **eaux sulfatées-sodiques** ont une minéralisation généralement élevée, comprise entre 700 et 7900 mg/l. Caractérisées par des teneurs élevées en éléments alcalins, ces eaux représentent les circulations lentes dans les massifs gneissiques schisteux. Le forage F4 montre des valeurs élevées en HCO₃ (1800 mg/l) et en Cl (440 mg/l), qui s'expliquent par une forte agressivité de ces eaux acides (pH = 6) envers les gneiss. Une origine évaporitique du Cl a été exclue.
- Les **eaux bicarbonatées-calciques**, qui sont faiblement minéralisées (< 500 mg/l). Elles ont circulé dans les gneiss fissurés d'Antigorio.

Six unités hydrogéologiques (UH) ont été individualisées sur la base de la lithologie des formations géologiques et des caractéristiques physico-chimiques des eaux.

- **UH de Sion-Courmayeur** (km 0 à 4.1 depuis le portail nord), qui comprend les schistes argilo-calcaires de la partie NW du tunnel. Les écoulements s'observent principalement à proximité du portail et au km 2.5, sous forme de sources froides. Ailleurs, la perméabilité est faible et les venues d'eau sont rares.
- **UH du Berisal** (km 4.1 à 9.4), caractérisée par les écoulements dans les massifs gneissiques schisteux (Nappe du Monte Leone et Zone du Berisal). La perméabilité est très faible, avec un débit spécifique de 5 l/min par km. Les temps de résidence des eaux sont élevés (absence de tritium) et les calculs géothermométriques indiquent que la température du dernier équilibre chimique eau-roche (40-70 °C) est plus élevée qu'à l'émergence (30-40 °C). Le chimisme des eaux est du type Ca>Na; SO₄>HCO₃. Des circulations ascendantes d'eau thermale sont envisagées dans la zone de la source Q1 (km 8.5). Les altitudes de recharge calculées avec les isotopes stables sont élevées, comprises entre

1700 m.s.m. (forage F3) et 2800 m.s.m (source Q1).

- **UH de Veglia** (km 9.4 à 10.7), qui regroupe plus d'une centaine de venues d'eau dans les formations carbonato-évaporitiques de la Zone de Veglia. Le chimisme de type Ca; SO₄ avec de faibles teneurs en alcalins et la saturation des eaux par rapport aux principaux minéraux sulfatés, indiquent une dissolution de gypse et anhydrite. Une extrême variabilité, essentiellement spatiale, des caractéristiques physico-chimiques des eaux a été observée dans ce système. Ces variations peuvent s'expliquer par des réseaux de fissures aquifères cloisonnés. Les eaux sont tritiées et les temps de transit souterrain sont de l'ordre de 10 à 30 ans.
- **UH du Lebendun** (km 10.7 à 15.3), qui comprend des micaschistes, des gneiss, des métaconglomérats et des calcschistes dont la perméabilité est très faible. Aucune source n'émerge dans ce tronçon.
- **UH du Teggiolo** (km 15.3 à 15.4), caractérisée par des perméabilités très élevées dans les marbres de la Zone du Teggiolo, fissurés et fortement karstifiés. La traversée de ce système hydrogéologique draine actuellement environ 55'000 l/mn. Ces eaux subthermales ont un chimisme de type Ca; SO₄ et ont aussi circulé à travers du gypse et de l'anhydrite. Les variations saisonnières des paramètres physico-chimiques de ces eaux et les vitesses de circulation très élevées (>10 m/h) indiquent une recharge rapide de l'aquifère par des eaux de surface froides et peu minéralisées. Le bassin-versant du torrent Cairasca (Alpe Veglia) constitue la zone d'alimentation de ce système.
- **UH d'Antigorio** (km 15.4 à 19.8), qui comprend les circulations dans les gneiss fissurés d'Antigorio. La perméabilité est légèrement plus élevée que dans les massifs gneissiques schisteux de l'UH Berisal. Les écoulements sont relativement lents, avec des temps de transit souterrains d'une dizaine d'années. Les eaux sont thermales (21-28 °C) et faiblement minéralisées, avec une composition de type Ca; HCO₃>SO₄.

Le potentiel géothermique du massif du Simplon pourrait être valorisé de différentes manières. La solution la plus rentable économiquement consiste à exploiter les eaux tièdes des canaux d'évacuation, au moyen de pompes à chaleur, pour du chauffage de bâtiments. Le potentiel thermique disponible est de 0.7 MWt à Brig et de 10 MWt à Iselle (portail sud). Des forages verticaux de 200 à 1000 m, réalisés entre les km 7 et 11 dans le tunnel, permettraient de capter, dans les formations aquifères de la zone de Veglia, des eaux en pression avec des températures entre 45 et 80 °C. L'acheminement de ces eaux dans des tuyaux isolés jusqu'à Brig, autoriserait une exploitation pour du chauffage sans pompes à chaleur. Finalement, le concept d'un système Hot Dry Rock pourrait aussi être étudié, en raison du type de roches présentes et de la température élevée disponible à une profondeur modérée. La réalisation d'un projet Hot Dry Rock aurait l'avantage de produire de l'énergie électrique qui pourrait être injectée dans le réseau des Chemins de Fer Fédéraux.

RIASSUNTO

Le acque subtermali e termali drenate dalla galleria ferroviaria del Sempione sono state studiate tra il 1987 e il 1992, nell'ambito del programma GEOTHERMOVAL, il cui scopo è la prospezione e la valorizzazione delle risorse geotermiche del canton Vallese. Realizzate all'inizio del ventesimo secolo (1898-1905), due gallerie di circa 20 km attraversano il Massiccio del Sempione, collegando il canton Vallese (Svizzera) al nord con la regione Piemonte (Italia) al sud.

Durante il traforo, più di 200 sorgenti sgorgarono dalle rocce fessurate e carsificate, con temperature massime di circa 50 °C e in quantità considerevoli, che raggiunsero 70'000 l/min in una sezione intorno al km 15.4 dal portale nord. Il maggior numero di sorgenti furono osservate in due sezioni acquifere principali costituite da rocce carbonatiche con evaporiti, situate tra i km 9.3 et 10.6 e nei pressi del km 15.4. Invece, l'attraversamento delle unità geologiche formate da gneiss, scisti carbonato-terrigeni e micascisti non incontrò che delle piccole venute d'acqua. Negli anni successivi al traforo, le rocce e le acque si sono raffreddate e attualmente si constata un raffreddamento massimo di 15-30 °C per le rocce intorno alla galleria et di 10-35 °C per le acque.

Nel 1987, circa 150 emergenze (> 1 l/min) sono state catalogate e in seguito misurate a cinque riprese fino al 1989. Nelle pareti della galleria, sono stati realizzati ogni 500 m dei piccoli fori (lunghezza 10 cm) e due serie di 6 fori orizzontali di 10 metri, situate in due differenti zone acquifere. Nel 1990, quattro pozzi di gradiente verticali, profondi fino a 150 metri, sono state realizzati all'interno delle gallerie per studiare le relazioni termiche roccia-acqua e roccia-aria.

- **F1** è stato forato nei marmi e calcscisti della Zona di Veglia fino a una profondità di 91 m. Il pozzo è artesiano con una portata di 60 l/min e una temperatura di 45.0 °C.
- **F2** ha attraversato i micascisti della Zona del Lebendun fino a una profondità di 108 m. Il pozzo è secco e la temperatura sul fondo è di 42.5 °C.
- **F3** è stato forato negli gneiss della Zona di Berisal fino a una profondità di 65.5 m. Produce acqua a una temperatura di 38.4 °C con una portata artesiano di 9 l/min.
- **F4** è stato forato negli gneiss della falda del Monte Leone fino a una profondità di 148.5 m. Dopo la trivellazione, il pozzo era secco e la temperatura sul fondo raggiungeva 57.2 °C. Dopo qualche mese, si è constatata la fuoriuscita continua di una debole quantità d'acqua con una temperatura di 29.2 °C.

Le misure entro piccoli fori hanno mostrato che la temperatura delle pareti rocciose è in equilibrio con quella dell'aria. Invece, nei fori di 10 m, si osserva un aumento della temperatura della roccia in vicinanza delle sorgenti termali, che indica che la porzione di roccia attorno alla galleria è riscaldata dalle circolazioni d'acqua. I profili di temperatura nei due pozzi secchi F2 e F4 mostrano che il raffreddamento della porzione di roccia attorno alla galleria si estende al di là di 150 m. La modellizzazione del raffreddamento della roccia attorno alla galleria dall'inizio del ventesimo secolo conferma che l'aerazione della galleria ha influenzato una zona di uno spessore di circa 250 m e che il gradiente geotermico attuale, senza l'effetto del raffreddamento, è di 4.0 ± 0.5 °C/100 m per F2 e 2.8 ± 0.7 °C/100 m per F4.

La grande maggioranza delle sorgenti è attualmente localizzata nella sezione centrale della galleria, tra i km 9.8 et 10.7, ma le portate le più importanti si osservano tra i km 15.3 et 15.4. In generale, le portate sono modeste (<50 l/min), tuttavia una sorgente è stata stimata a più di 10'000 l/min. Le temperature delle acque variano tra 8 e 45 °C; le mineralizzazioni tra 200 e 7900 mg/l.

Tre famiglie geochimiche possono essere evidenziate.

- Le acque di tipo **Ca-SO₄** sono nettamente più numerose ed hanno una mineralizzazione compresa tra 1200 e 2000 mg/l, con bassi contenuti in ioni alcalini e alogeni. Queste acque disciolgono essenzialmente livelli di gessi et anidriti intercalati nei marmi e calcscisti.
- Le acque di tipo **Na-SO₄** sono in generale le più mineralizzate (700-7900 mg/l). Caratterizzate per la più parte da alti contenuti di ioni alcalini e di cloruro, rappresentano delle circolazioni lente attraverso rocce fessurate delle unità geologiche negli gneiss.
- Le acque di tipo **Ca-HCO₃** sono poco mineralizzate (< 500 mg/l) e rappresentative delle circolazioni fredde o debolmente termali negli gneiss granitici della falda dell'Antigorio.

Sei unità idrogeologiche (UI) sono state definite sulla base della litologia e delle caratteristiche geochimiche delle acque.

- **UI di Sion-Courmayeur** (km 0 - 4.1 dal portale nord), che comprende gli scisti calcareo-argillosi del tratto nord-ovest della galleria. La permeabilità è debole e le sorgenti sono in maggioranza fredde.

- **UI di Berisal** (km 4.1 - 9.4), che si caratterizza con deboli circolazioni attraverso gli gneiss scistosi. La permeabilità è molto bassa e l'assenza di trizio nelle acque rivela che i tempi di residenza nell'aquifero sono importanti e che l'infiltrazione è avvenuta prima del 1953. La temperatura delle sorgenti varia tra 30 e 40 °C e il chimismo è di tipo Na-SO₄.
- **UI di Veglia** (km 9.4 - 10.7), che comprende più di 100 sorgenti che sgorgano da rocce carbonato-evaporitiche. La composizione chimica delle acque di tipo Ca-SO₄ indica la dissoluzione di gessi e anidriti. I valori di trizio indicano dei tempi di transito sotterraneo dell'ordine di 10 fino a 30 anni.
- **UI del Lebendun** (km 10.7 - 15.3), caratterizzata da rocce poco permeabili, principalmente micascisti, gneiss et metaconglomerati. Non si riscontra alcuna sorgente in questa unità idrogeologica.
- **UI del Teggiolo** (km 15.3 - 15.4), che comporta principalmente dei marmi intensamente fissurati e carsificati. Attualmente, circa 55'000 l/min di acque subtermali di tipo Ca-SO₄ sono drenate dal tunnel in questa zona. Le variazioni stagionali di portata, temperatura e conduttività elettrica delle acque e le velocità di circolazione rapide stimate grazie a delle

prove con traccianti realizzate durante il traforo, indicano una rapida infiltrazione di acque fredde provenienti dal bacino imbrifero del torrente Cairasca. Questi rappresenta la zona di ricarica dell'aquifero carsico.

- **UI d'Antigorio HU** (km 15.4 - 19.8), che comprende le circolazioni negli gneiss fissurati dell'Antigorio. Le acque sono poco mineralizzate e termali, con temperature massime di 28 °C.

Si è valutato il potenziale geotermico del Massiccio del Sempione ed anche differenti possibilità di utilizzare le risorse geotermiche. Lo sfruttamento delle acque tiepide evacuate dai due canali nord e sud della galleria tramite pompe di calore è la soluzione economicamente più competitiva. A Briga (portale nord) e Iselle (portale sud), il potenziale geotermico disponibile è rispettivamente di 0.7 e di 10 MWt. Altre soluzioni sono state esaminate, come per esempio la realizzazione di pozzi verticali profondi (200 - 1000 m) nel tunnel o all'esterno, presso il portale di Brig, il cui scopo è di aumentare la temperatura della risorsa geotermica. Infine, il concetto di un sistema Hot Dry Rock potrebbe essere esaminato, se si considerano certi tipi di roccia poco permeabili e le alte temperature raggiungibili a profondità modeste.

ABSTRACT

All thermal and subthermal waters drained by the railway tunnel of Simplon were studied between 1987 and 1992, within the framework of GEOTHERMOVAL, a program defined in order to prospect, to assess and to exploit the geothermal potential of Wallis. Realized at the beginning of the 20th century (1898-1905), two galleries of about 20 km link the canton of Wallis (Switzerland) with the Piedmont region (Italy) across the Simplon massif.

During the perforation of the galleries, more than 200 springs gushed from fissured and karstic rocks, with temperatures up to 55 °C and yields up to 70'000 l/min for the section around km 15.4. Most springs were observed in two main aquifer zones composed of carbonate rocks containing evaporites between the km 9.3 and 10.6 as well as at km 15.4. On the contrary, the majority of the geological units formed by gneiss, slate or micaschist were dry. Since the completion of the tunnel, rocks and waters have cooled, and nowadays one can observe a maximum cooling of 15-30 °C for the rocks near the tunnel and 10-35 °C for the waters.

In 1987 about 150 springs were registered, and measured five times until 1989. Micro-drillholes (10 cm) were positioned every 500 m, and two series of six horizontal holes of 10 m long were drilled in two different emergence zones. In 1990, four vertical boreholes were bored within the tunnel.

- **F1** was drilled in marbles and slates of the Veglia Zone to a depth of 91 m. It produces water at 45.0 °C with an artesian rate of 60 l/min.
- **F2** was drilled in micaschists of the Lebendun Zone to a depth of 108 m. The hole is dry and the bottom hole temperature reaches 42.5 °C.
- **F3** was drilled in the gneisses of the Berisal Zone to a depth of 65.5 m. It produces water at 38.4 °C with an artesian rate of 9 l/min.
- **F4** was drilled in the gneisses of the Monte Leone Nappe to a depth of 148.5 m. At the beginning, the hole was dry and the bottom hole temperature reached 57.2 °C. Afterwards, a surface seepage has been noticed at the wellhead with a very low yield and a temperature of 29.3 °C.

Temperature measurements in micro-drillholes have shown that equilibrium is attained between the air in the tunnel and the wall rock. However, in the 10 m-long holes, rock temperature increases nearby the warm springs, indicating that the rock around the tunnel is heated by the water flow. Temperature profiles in the two dry boreholes F2 and F4

points out that the cooling of the rock below the tunnel extends up to 150 m at least. Simulation of the thermal behavior of the rock around the tunnel since the beginning of the 20th century ascertains that a thickness of 250 m of rock has been influenced by the air flux in the tunnel and that the present geothermal gradient (undisturbed by cooling) reaches 4.0 ± 0.5 °C/100 m for well F2 and 2.8 ± 0.7 °C/100 m for well F4.

The great majority of the springs are located in the middle part of the tunnel, between the km 9.8 and 10.7, but the most important discharges are observed at km 15.3. Individual yields are generally low (<50 l/min), although one spring was estimated over 10'000 l/min. Temperature ranges between 8 and 45 °C while the total mineralization varies from 200 to 7900 mg/l.

Three main chemical groups of water can be deciphered from the analytical results.

- **Ca-SO4 waters**, the largest group of springs with a total mineralization of 1200 to 2000 mg/l and with low contents of alkaline and halogen ions. From the recharge area, these waters flow into carbonate rocks and dissolve mostly gypsum and anhydrite.
- **Na-SO4 waters**, most of them having a high mineralization (700-7900 mg/l). Characterized by high contents of alkaline ions and chloride, these waters represent the circulation within the fissures of the gneissic units.
- **Ca-HCO3 waters**, with a low mineralization (< 500 mg/l), they usually represent the cold or warmish circulations in fissured gneiss.

Six hydrogeological units (**HU**) were defined on the base of the lithology of the rocks and on the geochemical features of the waters.

- **Sion-Courmayeur HU** (km 0 to 4.1 from the north gate) includes the calcareous shales of the north west zone of the tunnel. The rock permeability is low and the springs are cold.
- **Berisal HU** (km 4.1 to 9.4) is characterized by little water flow in gneissic schists. The permeability is very low, and the absence of tritium reveals that the groundwater residence time is higher than 40 years. Springs temperature range between 30 and 40 °C, and the water chemistry is of Na-SO4 type.
- **Veglia HU** (km 9.4 to 10.7) includes over 100 springs

flowing out of carbonate rocks. Typical Ca-SO₄ chemical composition of the waters indicates dissolution of gypsum and anhydrite. These tritiated waters show that their underground transit time is relatively short (10-30 years).

- **Lebendun HU** (km 10.7 to 15.3) comprises very low permeability rocks, mainly micaschist, gneiss and conglomerate. No spring has been observed in this unit.
- **Teggiolo HU** (km 15.3 to 15.4) is characterized by strongly fissured and karstified marbles. At present time, the tunnel drains about 55'000 l/min of subthermal water from this zone, with a Ca-SO₄ composition. Observed seasonal variations and high flow velocity estimated by tracer tests indicate a rapid infiltration of the cold water from the Cairasca drainage basin, which represents the recharge zone of the aquifer.
- **Antigorio HU** (km 15.4 to 19.8) comprises water circulations in fissured gneiss. The permeability is

slightly higher than in the Berisal gneiss. The thermal waters are weakly mineralized (Ca-HCO₃ type) and reach a maximum temperature of 28 °C.

The geothermal potential of the Simplon massif has been evaluated as well as the various possibilities to use this resource. The most economically feasible solution would be to exploit for space heating the water flowing out of the tunnel through the bypass canal. In Brig (north gate) and in Iselle (south gate), the available geothermal potential was calculated and reaches 0.7, respectively 10 MWt. Other solutions have been envisaged, such as deep drilling (200 - 1000 m) inside the tunnel or near the gate in Brig, in order to increase the temperature of the resource. Finally, the concept of a Hot Dry Rock system could also be studied, considering the type of rocks and the high temperature available at a moderate depth.

1 EINFÜHRUNG

1.1 Bauphase des Eisenbahntunnels

In den Jahren 1898 bis 1905 wurden durch das Simplongebirge zwei parallele Eisenbahntunnel, welche die Ortschaften Brig (Schweiz) und Iselle (Italien) verbinden, gebaut (Figur 1.1). Dabei wurden auf einer Länge von knapp 20 km mehr als 200 thermale, subthermale und kalte Wasserausstritte freigelegt. Die Schüttung dieser Quellen war sehr unterschiedlich, verursachte aber, zusammen mit den unerwartet hohen Wasser- und Felstemperaturen (bis zu 55 °C), grosse bauliche Probleme. Bei km 15.4 ab Nordportal wurden enorme Wassermengen angetroffen (ca. 70'000 l/min), was zu einer Verzögerung des Tunnelvortriebes um mehrere Monate führte. Die maximale Abflussmenge betrug beim Südportal - der Grossteil des anfallenden Wassers wird gegen Süden drainiert - nach dem Durchstoss beider Tunnels gesamthaft ca. 85'000 l/min im Juli 1908 (BIANCHETTI, in Vorbereitung). Die Abflussmenge weist beträchtliche jahreszeitliche Schwankungen auf. Zwischen 1959 und 1965 wurden im Maximum ca. 60'000 l/min gemessen, im Jahre 1987 betrug die maximale Schüttungsmenge ca. 75'000 l/min (August 1987).

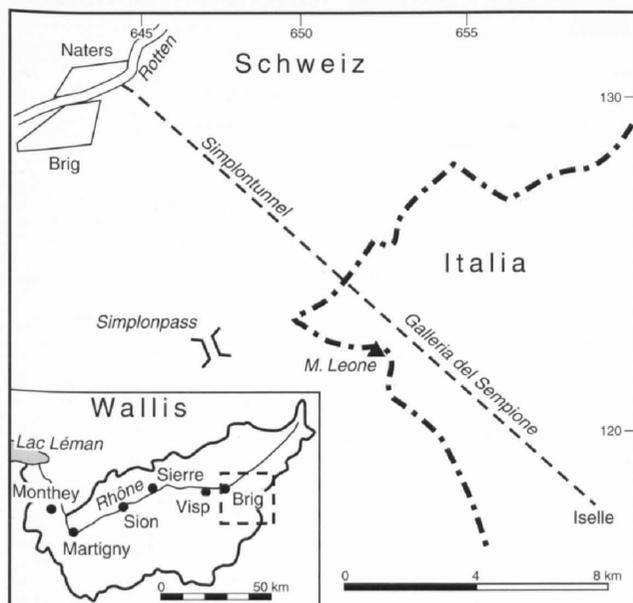
Den detaillierten Beobachtungen und Aufnahmen von H. Schardt, die regelmässig in den „Rapports trimestriels“ (SCHARDT, 1898-1906) und in speziellen Publikationen

(SCHARDT, 1902, 1903 und 1905b) veröffentlicht wurden, kann man die angetroffene geologische Situation (Lithologie, Fallen und Streichen der Schichten, Kluft- und Bruchsysteme usw.) entnehmen. Während der Bauphase wurden zusätzlich regelmässige Fels- und Wassertemperaturmessungen vorgenommen. Die Quellenparameter (Ergiebigkeit und Temperatur) und die Felstemperaturen wurden während ca. fünf Jahren (Bauzeit des ersten Stollens) in regelmässigen Abständen aufgenommen. In den nachfolgenden Jahren wurden keine ähnlichen Beobachtungen durchgeführt.

1.2 Erneutes Interesse für die Thermalquellen im Simplontunnel

Im Jahre 1986 führte das Interesse an der Nutzung der Erdwärme erneut zu Beobachtungen der Quellen sowie der Felstemperatur. So wurden von der Gemeinde Brig erste Untersuchungen zur Nutzung dieses Energiepotentials in Auftrag gegeben. In diesem Rahmen fand im September 1986 ein Messrundgang im Simplontunnel statt. Zwischen der Bauphase und dem Jahre 1986 klafft aber eine 85-jährige Messlücke. In den Jahren 1987, 1988 und 1989 wurden im Rahmen des Programms GEOTHERMOVAL fünf Messkampagnen durchgeführt (CRSFA, 1988; CRSFA, 1989; HAYOZ & ZUBER, 1990; ZUBER, 1990; CRSFA, 1992) und im Jahre 1990 vier Sondierbohrungen abgeteuft. Zwischen 1990 und 1992 wurden im Rahmen eines Projektes des schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (BIANCHETTI, in Vorbereitung) rund zehn Quellen und die drei wasserführenden Sondierbohrungen beobachtet und ihre Wässer analysiert.

Die kurzfristigen Nutzungsmöglichkeiten wurden ebenfalls berechnet und es wird dargelegt, dass schon heute die brachliegende Energie aus dem Simplontunnel in Form von lokal einsetzbaren Installationen (z.B. Wärmepumpen) nutzbar wäre. Die Untersuchungen des Programms GEOTHERMOVAL sollten somit die heutige Situation - im Speziellen den Einfluss des Tunnelbaus auf das geothermische und hydrogeologische System - aufzeigen, um damit eine Grundlage für die praktischen Nutzungsmöglichkeiten zu liefern. Verschiedene Möglichkeiten, wie das geothermische Potential des Simplon-Massivs genutzt werden könnte, wurden im Rahmen des Projektes für einen neuen Bahnhof in Brig studiert (KÄMPFEN, 1992).



Figur 1.1: Situationsplan des Simplontunnels.

1.3 Historische Forschungsarbeiten

An dieser Stelle soll ein kurzer Überblick über die zahlreichen Publikationen, die vor, während und vor allem nach dem Bau des Simplontunnels erschienen sind, gegeben werden. Die Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da dies den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen würde.

Die Geologie des Simplongebietes wurde intensiver untersucht, als die Vorbereitungen zum Bau des Simplontunnels konkreter wurden. Eine Zusammenfassung jener historischen Werke der „alten Geologen“ wie Studer, Renevier oder Gerlach, welche schliesslich als geologische Grundlage für den Bau dienten, findet man bei SCHARDT (1904 und 1905b). Als verantwortlicher Geologe betreute Schardt auch den Tunnelbau. Es zeigte sich, dass seine Ideen von der Geometrie der verschiedenen Einheiten in diesem Gebiet im Grunde richtig waren und sich beim Tunnelbau erhärteten.

Das Interesse der Geologen bestand während der Bauphase vorwiegend in der Überprüfung ihrer Prognosen. Bereits die notizartigen aber sehr informativen geologischen Aufnahmen in den "Rapports trimestriels" (SCHARDT, 1898-1906) - dies sind vierteljährliche Zwischenberichte über die Bautätigkeit zuhanden des schweizerischen Bundesrates - weisen ein bemerkenswertes Volumen auf. Im Tunnel unternahm Schardt vor allem zwei wichtige geologisch-hydrogeologische Experimente. Einerseits führte er ziemlich regelmässige Temperaturmessungen des Gesteins im Tunnel und an der Erdoberfläche sowie der Tunnelluft durch, mit dem Ziel, den Temperaturgradienten von der Erdoberfläche bis zum Tunnelniveau entlang des Tunnelverlaufes zu ermitteln. Andererseits unternahm er einen Färbversuch im Cairasca-Tal, um den Zusammenhang zwischen den oberirdischen Gewässern und den kalten Quellen bei km 15.4 ab Nordportal zu beweisen (SCHARDT, 1902 und 1903).

Wesentlichen Niederschlag fanden die Erkenntnisse des

Tunnelbaus im 1908 veröffentlichten geologischen Kartenblatt Brig 1:50'000 (SCHMIDT & PREISWERK, 1908). Ein in neuerer Zeit erstelltes geologisches Profil entlang der Tunnelachse (MILNES, 1973) versuchte den italienischen Teil des Tunnels neu zu interpretieren. Als wichtigste Neuerung erschien hier die Existenz der Veglia-Störung entlang der Veglia-Depression.

Andere Autoren (BEARTH, 1956; BURRI, 1979; STECK et al., 1979; MANCKTELOW, 1985 und 1990) konzentrierten sich auf die Untersuchung der ca. 8 km südöstlich des Tunnels praktisch parallel verlaufenden Simplonstörung. Interessanterweise erscheint diese markante tektonische Scherzone erst in diesen neueren Arbeiten.

Detaillierte Kartierungen und eingehende Untersuchungen erfolgten im Rahmen der Herausgabe der Kartenblätter Simplon und Brig 1:25'000 (BEARTH, 1973; JEANBOURQUIN & BURRI, 1989; BURRI et al., 1993). Die grosse Komplexität dieses Gebietes wurde durch das Studium der Details verdeutlicht (STECK, 1987; SPRING et al., 1992).

Bezüglich geothermischer Untersuchungen sind vor allem Schardt's Arbeiten (SCHARDT, 1902, 1903, 1904, 1905a, 1905b und 1914) bedeutend, welche sich auf Beobachtungen während des Tunnelbaus stützen. Angaben zu den Felstemperaturverhältnissen im Simplontunnel finden sich aber auch bei anderen Autoren (JACQUIER, 1905; PRESSEL, 1906 und 1928; BRANDAU, 1910; NIETHAMMER, 1910). Diese Autoren stützen ihre Untersuchungen zum Teil auf unterschiedliche Messresultate ab. Diese Differenzen sind meistens unbedeutend und rühren wahrscheinlich daher, dass es sich um Mittelwerte verschiedener Messperioden handelt. Als Grundlage dienten diesen Autoren zweifellos die regelmässigen und sehr detaillierten Aufzeichnungen von Schardt (SCHARDT, 1898-1906). Ein zusammenfassender Bericht mit einer ausführlichen Bibliographie späterer Arbeiten wurde zudem im Rahmen der geothermischen Evaluation im Gebiet des "Val d'Ossola" verfasst (GEOTERMICA ITALIANA, 1989).

2 HYDROGEOLOGISCHER ÜBERBLICK UND GEOTHERMIE

2.1 Geologischer Überblick

Der Simplontunnel führt durch ein geologisch sehr komplexes Gebirge. Dabei werden von Nordwesten nach Südosten, nach einem kurzen Abschnitt in der gotthardmassivischen Sedimentbedeckung, die unteren penninischen Decken (Lepontin) durchstoßen (Anhang 1; Figur 2.1). Ihre Unterscheidung, die paläogeographische Herkunft und die litho-stratigraphische und strukturelle Interpretation wurden von zahlreichen Autoren diskutiert und sind heute noch Gegenstand von fachlichen Diskussionen (GERLACH, 1869; SCHARDT, 1903 und 1905b; SCHMIDT & PREISWERK, 1908; RODGERS & BEARTH, 1960; MILNES, 1973; STECK, 1987; SPRING et al., 1992; BURRI et al., 1993). Schematisch können anhand der Lithologie fünf Hauptzonen ausgedehnt werden (BIANCHETTI, in Vorbereitung):

- eine Sedimentzone von ca. 4 km, die fast ausschliesslich aus Kalkglimmerschiefern besteht (Termen-Zone und Brig-Sion-Courmayeur-Zone);
- ein kristalliner Kern von ca. 5.5 km, der hauptsächlich aus schiefrigen Gneisen besteht (Monte Leone-Decke und Berisal-Zone);
- eine zentrale Zone, ca. 1 km breit, die aus einer Wechsellagerung von Kalken (Marmore), Kalkschiefern und Dolomiten mit Anhydrit-Linsen besteht (Veglia-Zone);
- eine relativ komplizierte Zone von ca. 4.5 km, bestehend aus verschiedenen Gesteinstypen: Glimmerschiefer, Marmore, Metakonglomerate und Kalkschiefer (Lebendun-Zone);
- ein verfalteter Gneiskern (Antigorio-Decke), umwickelt von einer dünnen Sedimenthülle, die hauptsächlich aus Marmoren besteht (Teggiolo-Zone).

Die paläozoischen Kerne der Decken werden durch triadische und jurassische Gesteine (v.a. Gips, Anhydrit, Dolomit und Bündnerschiefer; keine Halite!) voneinander abgetrennt. Die im Tunnel angetroffene Lithologie beobachtet man ebenfalls an der Oberfläche, wobei der gebirgsinterne Verlauf der einzelnen Schichten heute noch nicht in allen Belangen bekannt ist.

Zu diesen Gesteinen hinzu kommen die weitgehend von ihren kristallinen Deckenkernen abgescherten, mächtigen Bündnerschieferpakete der "Zone Valaisanne", die der südlich von Brig anstehenden mesozoischen Sedimenthülle des Gotthardmassivs überschoben wurden. Die gotthardmassivischen Sedimente der Termen-Zone weisen praktisch dieselben petrographischen und geologischen Merkmale

auf, wie die penninischen Bündnerschiefer s. str. (Kalkglimmerschiefer). Bei den Bündnerschiefern s.l. handelt es sich um eine eng gebankte Wechselfolge von schwarzgrauen, sandigen Kalkglimmerschiefern, Tonschiefern und Kalkbänken.

Den geologischen Aufnahmen von Prof. SCHARDT (1898-1906) kann man entnehmen, dass die Schichten der penninischen Decken auf kurzer Strecke ein stark variierendes Einfallen, grossmassstäblich betrachtet aber generell ein axiales Einfallen von ungefähr 30° gegen Nordwesten aufweisen. Die Sedimenthüllen, welche die kristallinen Decken des Lepontins voneinander abtrennen, sind metamorphe, oft geringmächtige Bündnerschiefer und Triasgesteine, die sich wegen des weit stärkeren Metamorphosegrades von den nördlichen Bündnerschiefern der "Zone Valaisanne" markant unterscheiden. Die ehemaligen Kalkglimmerschiefer sind heute unterschiedlich kompakte, je nach Ausgangsgestein mehr oder weniger reine Kalkmarmore, z.T. auch granatführende kalksilikatische Schiefer. Die triadischen Sedimente wurden zu Dolomitmarmoren und Anhydrit umgewandelt.

Die kristallinen Decken, von Nordwesten gegen Südosten sind dies die Berisal-Zone, Monte Leone-Decke, Lebendun-Zone und Antigorio-Decke, werden von paläozoischen polymetamorphen Gneisen, die reich an Feldspat und oft schiefrig sind, und von granat- und staurolithführenden Biotitschiefern aufgebaut. In Bereichen von Brüchen treten markante Kataklasit- und Mylonitzonen auf.

Der Übergang zwischen den Deckenkernen und den dazwischenliegenden mesozoischen Sedimenten ist deutlich ausgebildet (Figur 2.1). Dies ist vor allem auf die lithologisch-petrographischen Unterschiede und nicht so sehr auf die verschiedenen Metamorphosegrade zurückzuführen. Der Grad der alpinen Metamorphose steigt generell von Norden gegen Süden an. Diese Metamorphose hat alle Gesteine des Simplongebietes erfasst. Im Süden der Simplonregion wird die höchste Stufe der alpinen Metamorphose mit dem Auftreten von Amphiboliten erreicht.

2.2 Tektonischer Überblick

Mit dem Tunnelbau wurden die beiden grosstektonischen Einheiten der gotthardmassivischen Sedimente und der lepontinischen Decken durchquert (Anhang 1). Während die nördlichen gotthardmassivischen Bündnerschiefer na-

hezu senkrecht oder leicht gegen Süden einfallen, sind die penninischen Abfolgen durch ausgeprägte Verfaltung und stark wechselnde Fallwinkel gekennzeichnet. Generell verläuft das Streichen der Schichten in Ost/West-Richtung.

Eine grosse Störung, die parallel zum Tunnel ungefähr NW-SE verläuft, durchquert das Simplonmassiv zwischen dem Simplonpass und Domodossola in Italien (MANCKTELOW, 1985 und 1990). Dieser bedeutende Bruch, die Simplon-Centovalli-Linie, ist im Feld anhand eines Bandes von Myloniten und Kataklasten erkennbar, welches mit 30-60° gegen SW einfällt. Durch die Simplon-Centovalli-Störung wurde das nördliche Gebiet um ca. 5-6 km gegenüber dem südlichen Teil gehoben. Dadurch weisen die Gebiete nordöstlich und südwestlich der Störung unterschiedliche geochronologische Eigenschaften auf. Das nordöstliche Gebiet, das vom Tunnel durchquert wird, zeigt junge radiometrische Alter zwischen 8 und 15 Ma (HUNZIKER & BEARTH, 1969; HURFORD, 1986; GEOTERMICA ITALIANA, 1989). Diese Alter belegen, dass die Zentralalpen und insbesondere das Simplon- und Val d'Ossola-Gebiet rascher gehoben wurden, als die umgebenden penninischen und ostalpinen Einheiten. Die mittlere Hebungsgeschwindigkeit des nordöstlichen Gebietes wurde auf 1.1 mm/a berechnet, während sie im südwestlichen Gebiet nur rund 0.7 mm/a beträgt. Eine regionale Strukturanalyse mittels Luftbildinterpretation zeigt, dass im Simplon- und Val d'Ossola-Gebiet die Brüche und Klüfte in ungefähr E-W-orientierten Systemen verlaufen (GEOTERMICA ITALIANA, 1989). Eine Zone von subvertikalen, E-W-orientierten Klüften ist gut sichtbar in der Gegend von Alpe Veglia und durchquert den Tunnel zwischen km 10 und 12 (Figur 5.4). Diese letzterwähnten tektonischen Störungen betreffen die Kontakte zwischen der Berisal-Zone, der Monte Leone-Decke sowie der Veglia- und der Lebendun-Zone mit einem Versatz von einigen hundert Metern.

2.3 Hydrogeologische Aspekte

Beim Tunneldurchstich wurden zwei hauptsächliche wasserführende Zonen durchfahren (SCHARDT, 1898-1906, 1903, 1905a und 1905b) :

- Die erste Zone erstreckt sich zwischen km 9.3 und 10.6 über rund 1300 m Länge. Sie liegt in den karbonatisch-evaporitischen Gesteinen der Veglia-Zone und enthält rund 80 Wasseraustritte mit einer Gesamtschüttung, die im Jahr 1906 auf mehr als 20'000 l/min geschätzt wurde. Die Temperaturen lagen zu dieser Zeit meist zwischen 40 und 52 °C und die Schüttung betrug bis zu 4000 l/min für eine einzelne Quelle. Die Messungen zwischen 1906 und 1912 zeigen einen starken Rückgang der Gesamtschüttung.
- Die zweite Zone mit einer Länge von rund hundert Metern liegt zwischen km 15.3 und 15.4 in den karbonatischen Gesteinen der Teggiolo-Zone. 1903 wies sie etwa 30 Wasseraustritte mit einer Gesamtschüttung

von maximal rund 70'000 l/min (BIANCHETTI, in Vorbereitung) auf. Die Temperaturen lagen zwischen 13 und 17 °C und die Schüttung einer einzelnen Quelle erreichte bis zu 12'000 l/min. Saisonale Schwankungen von Schüttung, Temperatur und Mineralisation wurden schon bald festgestellt. Die Vermutung, dass diese Quellen direkt mit Oberflächenwasser in Verbindung stehen, wurde 1903 durch einen Färbversuch bestätigt. Dieser bewies eine direkte Verbindung zwischen den Quellen im Tunnel und den Versickerungsstellen der Cairasca, welche die in Italien gelegene Alpe Veglia entwässert (SCHARDT, 1903).

Die Zirkulation des Wassers im Simplongebirge findet in erster Linie entlang den triadischen und jurassischen Gesteinsschichten statt. Die altkristallinen Deckenkerne, die Kalkglimmerschiefer und Glimmerschiefer, bilden entlang des Simplontunnels vor allem trockene Zonen. Die meisten Quellen finden sich deshalb an den Stellen, an denen der Tunnel die verwitterungsanfälligen triadischen Gesteine Marmor, Gips und Anhydrit durchquert. Diese durch leichtlösliche Komponenten gekennzeichneten und sehr stark tektonisierten Gesteine beeinflussen im wesentlichen den Chemismus der Wässer (Calcium-Sulfat-Wässer). Einzig die Wasservorkommen in den altkristallinen Deckenkernen, die gleichzeitig die mineralreichsten und die mineralärmsten Quellwässer repräsentieren, weichen in ihrer chemischen Zusammensetzung von den übrigen ab.

Die angetroffenen Schüttungsmengen der Quellen gingen in den meisten Fällen innert kurzer Zeit nach dem Tunnelbau, in einem Zeitraum von einigen Wochen bis Monaten zurück. Dies lässt sich mit der Entleerung grosser Kluftsysteme und Kavernen erklären (SCHARDT, 1903). Dagegen hat die starke Schüttung der Wasseraustritte bei km 15.4 kaum abgenommen. Dies weist auf eine rasche Infiltration von Oberflächenwasser in dieser Zone hin.

Der überwiegende Teil der Quellen entspringt dem First und den Seitenwänden des Tunnels. Nur vereinzelt fand man während der Bauphase Wasseraustritte am Boden, die heute aber nicht mehr beobachtbar sind. Die zu Beginn des Jahrhunderts durchgeführten Färbversuche (SCHARDT, 1903) und die neueren Untersuchungen haben aufgezeigt, dass der Grossteil des im Simplontunnel entspringenden Wassers von der Oberfläche auf mehr oder weniger direktem Weg zum Tunnel abfließt. Dabei können die Verweilzeiten von wenigen Wochen bis Monaten (vornehmlich für die Quellen mit grosser Schüttung) auf mehrere Jahre (für Quellen mit kleinen Abflussmengen) ansteigen. Das in den kristallinen Formationen zirkulierende Wasser weist ein Alter > 40 Jahre auf (tritiumarme Wässer, Infiltration vor 1952).

Figur 2.1: Geologisches Profil entlang des Tunnels mit der Lage der beprobten Quellen und Bohrungen und deren hauptsächlichen physiko-chemischen Parametern (BIANCHETTI, in Vorbereitung).

LITHOLOGIE

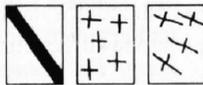


Kalkglimmerschiefer
oder Glimmerschiefer

Marmor

Kalkschiefer

Metakonglomerate mit
granitischen Elementen



Anhydrit, Gyps
und Dolomit

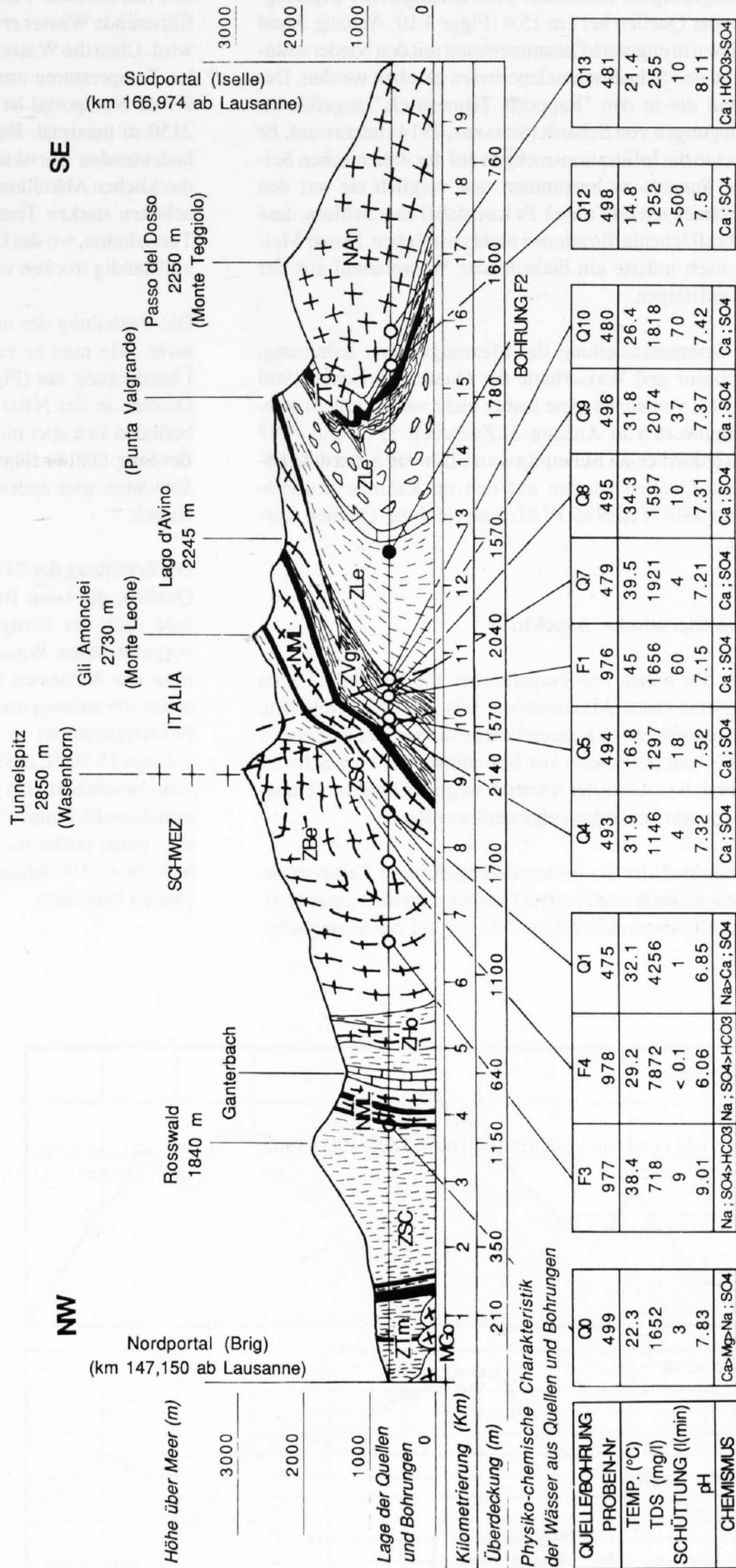
Massive Orthogneise

Schieferige, granatführende Gneise

TEKTONIK

ZBe Berisal-Zone
ZHo Zone Houillère
ZSC Sion-Courmayeur-Zone
NML Monte Leone-Decke
ZVg Veglia-Zone

ZLe Lebendun-Zone
ZTg Teggiolo-Zone
NAN Antigorio-Decke
ZTm Termen-Zone
MGo Gotthard-Massiv



Die ausgeprägten saisonalen Schwankungen der Ergiebigkeiten der Quellen bei km 15.4 (Figur 3.10; Anhang 5 und 6) müssen in engerem Zusammenhang mit den Niederschlägen und den Schneeschmelzperioden gesehen werden. Dabei sind die in den "Rapports Trimestriels" angeführten Überlegungen von Schardt (SCHARDT, 1914) interessant. Er versuchte die Infiltrationsmengen auf der italienischen Seite des Tunnels zu bestimmen und verglich sie mit den Abflussmengen im Tunnel. Er kam dabei zum Schluss, dass die Oberflächeninfiltrationen nicht ausreichen. Seiner Meinung nach müsste ein bedeutender Wasseranteil aus der Tiefe aufsteigen.

Eine Zusammenstellung der Messungen von Schüttung, Temperatur und Wasserhärte der Quellen zwischen 1900 und 1912, von denen viele bisher nicht veröffentlicht wurden, findet sich in Anhang 3. Zwischen 1912 und 1987 liegen jedoch keine Messungen vor. Die von Schardt beobachteten Quellen wurden mit den im Rahmen des Programms GEOTHERMOVAL untersuchten Quellen korreliert.

2.4 Geothermische Aspekte

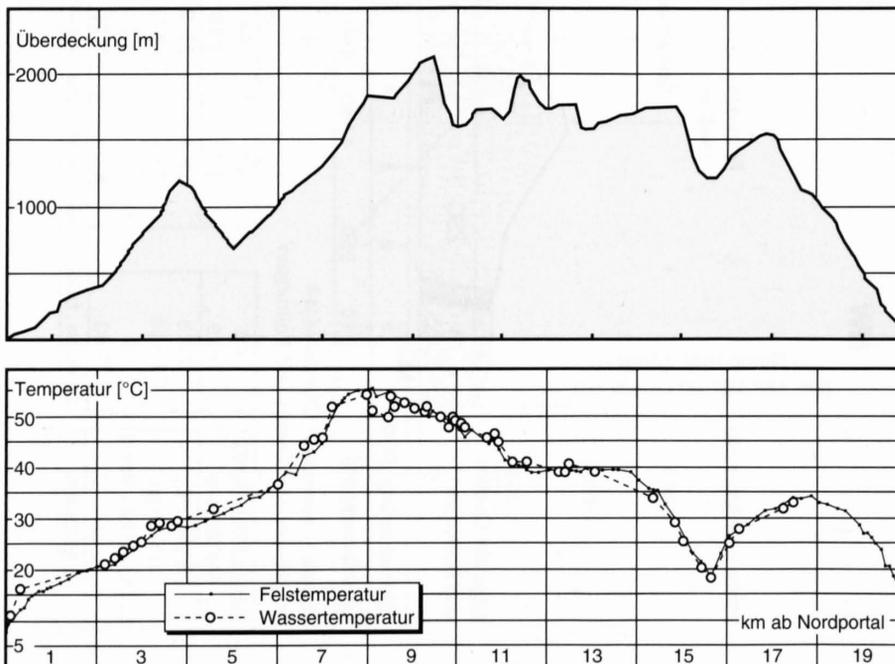
Neben den hohen Felstemperaturen, die bei km 8.1 vom Nordportal einen Maximalwert von 55.4 °C erreichten, stellten zahlreiche Wassereinträge die am Bau beteiligten Arbeiter und Ingenieure vor fast unüberwindbare Schwierigkeiten. So musste der Vortrieb wegen der hohen Temperaturen sogar zeitweise eingestellt werden.

Die während der Bauphase durchgeführten Temperaturmessungen im Wasser und im Gestein zeigen ein ausgesprochenes Gleichgewicht (Figur 2.2), das auf die ausgeglichene

nen thermischen Verhältnisse zurückzuführen ist. Das infiltrierende Wasser erwärmt sich am Gestein, das abgekühlt wird. Ohne die Wasservorkommen wären bei km 9 zweifellos Temperaturen um 60°C zu erwarten gewesen. Bei km 9.1 ab Nordportal ist die Felsüberdeckung denn auch mit 2150 m maximal. Bei km 15.4 ab Nordportal hat das in bedeutenden Karstkanälen zirkulierende Wasser zu einer merklichen Abkühlung des Gesteins geführt, was den beobachteten starken Temperaturanstieg ab Iselle in Richtung Tunnelmitte, wo das Gestein (Gneise der Antigorio-Decke) vollständig trocken vorliegt, abrupt unterbrach.

Die Verteilung der unterschiedlich warmen Quellen liegt nicht, wie man es erwarten dürfte, in Abhängigkeit zur Überdeckung vor (Figur 2.2). Wohl findet man die kalten Quellen in der Nähe der Portale. Die wärmsten Quellen befinden sich aber nicht exakt unter den höchsten Gipfeln. SCHARDT (1914) führte dies einerseits auf das Fallen der Schichten und andererseits auf die Wasserzirkulationen zurück.

Die Schüttung der 237 thermalen, subthermalen und kalten Quellen, die beim Bau angestochen wurden, sank schon bald nach der Fertigstellung des Tunnels auf die heute vorgefundenen Wassermengen. Auch die Wassertemperatur der heissesten Quellen in den zentralen Bereichen nahm von anfangs noch 50 °C auf weniger als 40 °C ab. Die Felstemperaturen in unmittelbarer Tunnelnähe sind von anfangs 55-50 °C auf 25-20 °C gesunken. Die Abkühlungszone beschränkt sich jedoch auf einen Abstand von 250 m radial um die Tunnelröhren (PAHUD et al., 1993). Bohrungen im Tunnel (siehe Kapitel 3.2) haben gezeigt, dass ausserhalb dieser Abkühlungszone die ursprünglichen Felstemperaturen herrschen.



Figur 2.2: Messungen der Temperatur von Gestein und Wasser während der Bauphase des Tunnels (1898-1905) im Vergleich zur Überdeckung. Die Temperaturen von Fels und Wasser befanden sich zu dieser Zeit im Gleichgewicht. Die deutliche Temperaturabnahme bei km 15.4 ist auf sehr bedeutende Austritte kalten Wassers zurückzuführen.

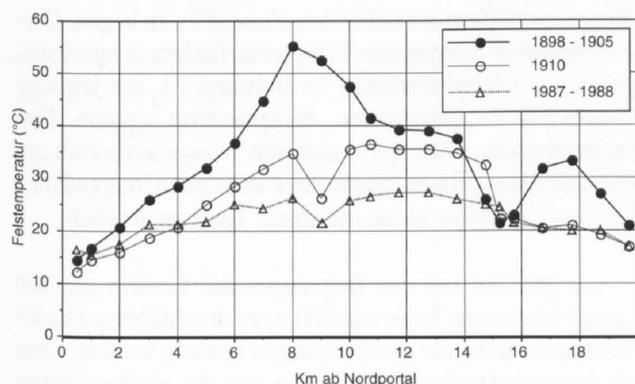
3 DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN UND RESULTATE

3.1 Temperatur des Gesteins und des Quellwassers

Temperatur des Gesteins

Während der Bauphase wurde die Felstemperatur an der Front des Tunnels in 1.50 m tiefen Löchern gemessen. Diese Temperaturen stellen minimale Werte dar, da nach Darstellung von Schardt die Abkühlung unverzüglich wirkte ("...refroidissement que subit le rocher par la circulation de l'eau froide utilisée dans le trou pendant la perforation...", SCHARDT, 1898-1906, Bericht Nr. 16, Seite 3). NIETHAMMER (1910) publizierte korrigierte Werte (Figur 2.2 und Anhang 8). Die höchste Felstemperatur (55.4 °C) wurde bei km 8.1 ab Nordportal (NIETHAMMER, 1910) gemessen. Das wärmste Quellwasser wurde bei km 7.9 (54.2 °C) und bei km 8.4 (54.0 °C) ab Nordportal (SCHARDT, 1898-1906) angetroffen. In den zentralen Bereichen des Tunnels schwankten die Temperaturen des Quellwassers zwischen 45 und 50 °C. Die Felstemperaturen wurden sowohl während des Tunnelvortriebes als auch in festen Stationen gemessen.

Bei der ersten Messkampagne im Dezember 1987 wurden entlang des Tunnels im Abstand von 500 m ca. 10 cm tiefe Löcher gebohrt. Damit konnte geschützt vor der Windzirkulation die Temperatur an der Tunnelmauer bestimmt werden. Die Messungen in diesen Löchern haben aufgezeigt, dass die Felstemperatur im Einflussbereich des Tunnels, bei der wärmsten Zone, seit dem Bau um mindestens 30 °C abgenommen hat (Figur 3.1). Diese Abkühlung ist ohne Zweifel auf die Luftzirkulation infolge des Zugs-



Figur 3.1: Felstemperaturen von 1898-1905, 1910 und 1987-1988 entlang des Simplontunnels. Die Temperaturen nahmen bereits während den ersten Jahren nach dem Durchstich stark ab. Diese Abnahme ist besonders deutlich bei km 8 festzustellen, während die Temperatur bei km 15.4 (Austritte des kalten Wassers) bis heute stabil geblieben ist.

verkehrs zurückzuführen. Schon während des Baus nahm die Felstemperatur aufgrund der installierten Ventilationsysteme merkbar ab (SCHARDT, 1904). Den während des Tunnelbaus angetroffenen maximalen Felstemperaturen von ca. 54 °C stehen heute (1987-1990) gemessene Maximalwerte von knapp 30 °C gegenüber.

Nach überschlagsmässigen Berechnungen muss die durch den Tunnelbau verursachte Abkühlung bis in eine Tiefe von mindestens 150 m reichen (RYBACH, mündliche Mitteilung, 1988). Um die effektive Felstemperatur bestimmen zu können mussten daher tieferreichende Bohrungen ausgeführt werden. Als erster Schritt wurden 10 m tiefe horizontale Löcher auf jeder Seite je einer kalten und warmen Quellzone gebohrt und mit Sonden ausgerüstet.

Als zweiter Schritt wurden dann später an vier verschiedenen Stellen im Tunnel unterschiedlich tiefe Bohrungen (65 bis 150 m) abgeteuft, um das Eindringen der radialen Abkühlungszone ins Gebirge abschätzen zu können.

Vergleich der Felstemperaturmessungen in zwei verschiedenen Quellzonen.

Im Februar 1989 wurden zwölf 10 m tiefe Bohrlöcher (je 6 an zwei ausgewählten Stellen), mit einem Durchmesser von ca. 5 cm, horizontal in die Tunnelwand gebohrt. Ins Bohrlöcher wurden Hartplastikrohre eingeführt um die Installation der Messsonden zu erleichtern. Es wurde aber strikt darauf geachtet, dass die Sonde in direktem Kontakt am Gestein liegt. Die Plastikrohre wurden deshalb nicht bis ans Ende des Loches vorgeschoben und blieben leer. Bei den Sonden handelt es sich um Thermistore Modell 3800-1 von Geokon mit einer Messgenauigkeit von ± 0.1 °C.

Die erste ausgewählte Zone befindet sich bei den wärmsten Wasseraustritten bei km 10.41 ab Nordportal in der rechten Tunnelröhre. Die Bohrungen B1 bis B6 wurden im Abstand von 8-10 m (drei vor und drei nach den Wasseraustritten) in die Tunnelwand abgeteuft. Wegen der destruktiven Schlagbohrtechnik konnten keine Bohrkern gewonnen werden. Den Aufzeichnungen aus den "Rapports Trimestriels" kann man entnehmen, dass diese Zone aus schiefrigen Gneisen im Wechsel mit körnigen Kalken besteht. Der glimmerreiche Bohrschlamm bestätigt einen gneisigen Charakter des Gesteins.

Die Lage der Bohrlöcher B1 bis B6 und der Temperaturverlauf im Monat Mai 1989 können dem Anhang 10 entnommen werden. In den einzelnen Löchern treten kaum Temperaturschwankungen auf. Auffallend ist der markante

Temperaturanstieg zu den zahlreichen Wasseraustritten hin, er beträgt rund 7 °C (Anhang 10). Das Wasser erwärmt somit die durch den Tunnelbau abgekühlte Felszone und dürfte im Berginnern mit einer Temperatur von über 40 °C zirkulieren. Der wasserführende Charakter dieser Zone bei km 10.412 wird dadurch unterstrichen, dass in zwei Bohrlöchern ebenfalls Wasser erbohrt wurde. In Tabelle 3.1 sind die Temperaturen der verschiedenen Quellaustritte mit der Abflussmenge und der elektrischen Leitfähigkeit zusammengestellt.

Die zweite ausgewählte Zone liegt bei km 15.36 ab Nordportal ebenfalls in der rechten Tunnelröhre aber im Einflussbereich kalter Quellen. In diesem Gebiet wurden die Bohrungen ebenfalls horizontal in die Tunnelwand getrieben (jeweils 3 Bohrlöcher vor und nach den Wasseraustritten). Der geringe Bohrwiderstand und der milchig-weiße Bohrschlamm sind auf gipsreiche und dolomitische Gesteine zurückzuführen. Demnach befindet sich diese Zone in den triadischen Gesteinen, die zwischen der Lebendun-Zone und der Antigorio-Decke eingeklemmt sind. In Richtung südliches Tunnelportal erfolgt eine konstante Abnahme der Felstemperatur. Sie wird nur gerade im Bohrloch B11 unterbrochen (Anhang 11). Die Wassertemperatur der Quelle bei km 15.36 ab Nordportal liegt mit 13.4 - 14.1 °C (Tabelle 3.2) unter der Felstemperatur des Bohrloches B7, das am tiefsten im Tunnel liegt (Anhang 11). Die kühleren Temperaturen in B10, B11 und B12 dürften durch den jährlichen Anstieg der Quellschüttung bedingt sein. Es ist offensichtlich, dass an dieser Stelle der durch die Luftzirkulation abgekühlte Fels durch die Wasserzirkulation eine weitere Abkühlung erfährt.

Die Messungen in diesen zwei Untersuchungszonen zeigen sehr deutlich die unterschiedlichen Einflüsse des Wassers auf das Gestein. Bei der Quelle bei km 15.36 ab Nordportal

Tabelle 3.1: Physikalische Charakteristiken des Quellwassers bei km 10.41 ab Nordportal.

KM AB NORDPORTAL	ABFLUSS (l/min.)	TEMPERATUR (°C)	EL. LEIT- FÄHIGKEIT (µS/cm)
10.396 (B3)	12	39.7	1375
10.413 (Q7)	5	40.1	1517
10.415	2	36.3	1489
10.430 (Q8)	20	34.3	1324
10.431 (B4)	2	32.1	1445

Tabelle 3.2: Physikalische Charakteristiken des Quellwassers bei km 15.36 ab Nordportal.

KM AB NORDPORTAL	ABFLUSS (l/min.)	TEMPERATUR (°C)	EL. LEIT- FÄHIGKEIT (µS/cm)
15.354	20	14.2	1177
15.360 (Q12)	100	14.1	1186
15.363	50	14.1	1205
15.365	25	13.4	1205
15.366	1	14.1	1201
15.368	0.5	14.3	1147
15.371	5	14.1	1193

(Q12) haben die chemischen und physikalischen Analysen eindeutige Hinweise auf Infiltrationswasser mit einer kurzen Verweilzeit im Gebirge geliefert. Die trotz des raschen Durchflusses relativ hohe Mineralisation (elektrische Leitfähigkeit >1140 µS/cm) ist auf die gut löslichen Aquifergesteine zurückzuführen. Die abkühlende Wirkung dieser bedeutenden Wassermengen auf die Felspartien in der Tunnelnähe lässt sich mit den Felstemperaturmessungen belegen. Im Gegensatz dazu wirkt das Wasser bei km 10.41 ab Nordportal als wärmende Komponente auf das Gestein in der tunnelnahen Zone.

3.2 Sondierbohrungen im Simplontunnel

Ziel und Methodik der Sondierbohrungen

Ziel der Bohrungen war es, die beobachtete Abkühlung des Gesteins und die Wasserzirkulationssysteme eingehender zu untersuchen. Vordergründige Fragen waren :

- Kann die Beeinflussung des natürlichen geothermischen Gradienten quantifiziert werden ?
- Lassen sich bezüglich thermaler Wässer produktive Zonen ausscheiden ?
- Verlaufen allfällige Wasserzirkulationen in der Umgebung des Tunnels ohne direkte Beeinflussung durch diesen, so dass sie die "ursprünglichen" Charakteristiken aufweisen ?

Es konnten jeweils zwei Bohrungen in eine wasserführende und eine wasserfreie Zone positioniert werden. Die Bohrung F1 wurde in unmittelbarer Nähe zu den wärmsten Quellen bei km 10.4 ab Nordportal, innerhalb der Zone jener wasserführenden Bündnerschiefer angesetzt, welche in der "Veglia-Mulde" an die Oberfläche gelangen. Eine zweite wasserführende Zone wurde bei km 6.8 (F3) ab Nordportal angetroffen. Die in den trockenen Zonen abgeteufte Bohrungen kamen bei km 7.8, in den Gneisen der Monte Leone-Decke (F4) und bei km 12.5 ab Nordportal, in den Granat-Glimmerschiefern der Lebendun-Zone (F2), zu liegen. Diese Bohrlöcher wurden mit Temperaturfühlern ausgerüstet, wobei die Temperaturfühler in Bohrung F2, um jegliche Konvektion zu unterbinden, einzementiert wurden. Das zweite trockene Loch (F4) wurde mit Wasser aufgefüllt um überhaupt Messungen durchführen zu können; das Loch ist also heute noch bis in die maximale Tiefe zugänglich.

Es war geplant, mit den Bohrungen das Gestein um den Tunnel bis in eine Tiefe von 200 m zu durchfahren. Dieses Ziel konnte in keiner der Bohrungen erreicht werden. Eine der einschränkenden Bedingungen war die zur Verfügung stehende Arbeitszeit. Demzufolge musste eine Bohrmethode, die einen raschen Fortschritt garantierte gewählt werden. Gebohrt wurde schliesslich mit der destruktiven Im-Loch-Hammer-Bohrmethode, die in gesundem Felsen bis zu 100 Bohrmeter pro Arbeitsschicht zuließ. Allerdings bildete dieser Maximalwert eine Ausnahme, die leider nur einmal erreicht wurde. Mit dem eingesetzten Kompressor konnten bis maximal 20 bar Luftdruck auf den Bohrkopf gepresst

Tabelle 3.3: Charakteristiken und wichtigste Resultate der vier Bohrungen im Simplontunnel (CRSFA, 1992).

BOHRUNG Nr.	F1	F2	F3	F4
Km ab Nordportal	10.4	12.5	6.6	7.8
Bohrdatum	9.-12. Mai 1990	16.-18. Mai 1990	8.-12. Okt. 1990	13.-17. Okt. 1990
Geologische Einheit	Veglia-Zone	Lebendun-Zone	Berisal-Zone	Mte Leone-Decke
Lithologie	Marmore und Kalkschiefer	Glimmerschiefer	Schiefrige Gneise	Gneise
Endtiefe (m)	91	108	65.5	148.5
Tiefe der produktiven Zonen (m)	22	trockene Bohrung 87	28	trockene Bohrung ⁽¹⁾
Pumpmenge (l/min)	150	-	-	-
Absenkung (m)	5	-	-	-
Artesische Schüttung (l/min)	60	-	9	ca. 0.01 ⁽¹⁾
Wasserdruck (bar)	> 25	-	> 12	-
Chemischer Typ	Ca ; SO ₄	-	Na; SO ₄ >HCO ₃	Na>Ca; SO ₄ >HCO ₃
El. Leitfähigkeit (µS/cm)	1440	-	850	7320
pH	7.15	-	9.01	6.06
Temperatur OK Bohrloch (°C)	45.0 (Wasser)	22.3	38.4 (Wasser)	29.3
Temperatur Bohrlochsohle (°C)	45.5	42.5	42.5 (Tiefe : -50 m)	57.2
Geotherm. Gradient (°C/100 m)				
Nicht korrigiert ⁽²⁾ (Messabschnitt)		5.3 (80-110 m)		6.6 (110-150 m)
Korrigiert ⁽³⁾		4.0 ± 0.5		2.8 ± 0.7
Ausrüstung	Rohr 6" von 0 bis -6 m Wanne + Manometer	Rohr 6" von 0 bis -6 m 11 Temperatursonden zementiert ⁽⁴⁾	Rohr 6" von 0 bis -6 m Wanne + Manometer	Rohr 6" von 0 bis -6 m
Bohrdurchmesser	4" (110 mm)	4" (110 mm)	4" (110 mm)	4" (110 mm)
Bohrmethode	Im-Loch-Hammer			

(1) Artesische Aussickerung festgestellt 1992.

(2) Unkorrigierter geothermischer Tiefengradient, auf der Basis von Temperaturdiagrammen.

(3) Modellhaft analytisch aufgearbeiteter, korrigierter geothermischer Tiefengradient (PAHUD et al., 1993).

(4) Säule von 11 in Zement eingegossenen Thermofühlern, welche in Abständen von 10 m angebracht sind.

werden. Die vorliegenden Platzverhältnisse im Tunnel liesen nur den Einsatz einer kleinen kompakten Bohrmaschine zu.

Die Rückhaltekraft der Maschine aufs Gestänge war damit ebenfalls eingeschränkt, so dass bald einmal die Grenzen erreicht wurden. Der Auftrieb des in Bohrung F1 bei einer Tiefe von 87 m angetroffenen Thermalwassers behinderte den Bohrvorstoss zusätzlich. Diese Bohrung musste schliesslich bei 91 m abgebrochen werden. Die Bohrung F2 konnte, da sie mehr oder weniger trockenen Fels durchfuhr, immerhin bis auf eine Tiefe von 108 m abgeteuft werden. Die Bohrung F4 erreichte eine Endtiefe von 148.5 m.

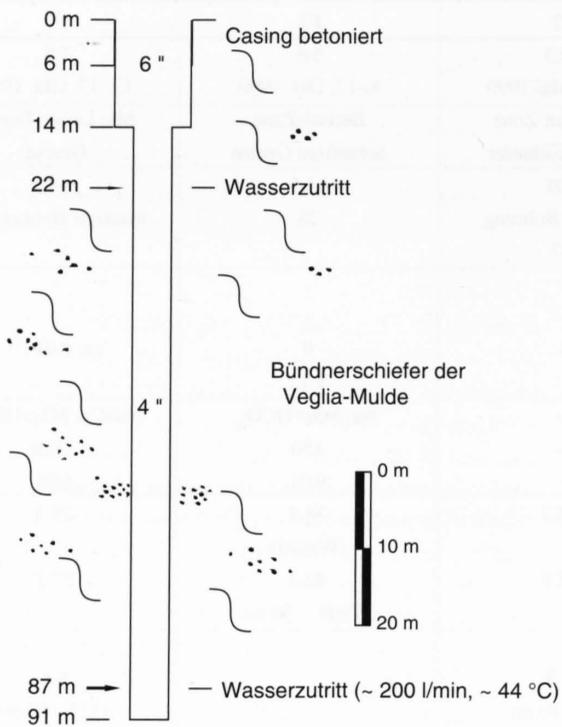
Bohrung F1

Geologisch liegt das gesamte Bohrloch der Bohrung F1 mit einer Länge von 91 m in den Marmoren und Kalkschiefern der „Veglia - Bündnerschiefer“ (Figur 3.2). Zwei Wassereinbrüche wurden auf der gesamten Länge angetroffen. Der erste, kleinere bereits nach 22 m. Die rasche Abnahme des Wasseranfalls deutet auf die Entleerung einer Kluft hin. Die

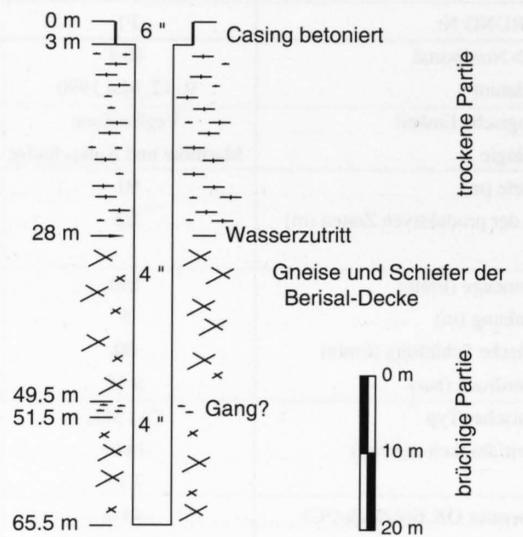
Schüttung stabilisierte sich bei ca. 15 l/min.

Eine wesentlich produktivere Bruchzone wurde in einer Tiefe von 87 - 88 m angefahren. Das Wasser dieses Kluftsystems überstieg die Anfangsbohrkote und weist, wie spätere Messungen des hydraulischen Druckes zeigten, über 25 bar Druck auf, was einer Wassersäule von über 250 m entspricht. Aufgrund der Nähe zum bestehenden Tunnel erstaunen diese artesischen Wasserzirkulationen. Der Wasserdruck im Bohrloch verursachte einen derartigen Auftrieb auf das Gestänge, dass der Vortrieb des Bohrhammers trotz des Gewichts und der Schlagkraft der Bohrmaschine in einer Tiefe von 91 m zusammenbrach und die Bohrung beendet werden musste. Der Umstand, dass in nächster Umgebung des Tunnels eine Kluft mit solch unerwartet hohen Wasserdrücken angefahren wurde, zeigt deutlich die Isolation einzelner Wasserzirkulationen in dieser komplex strukturierten alpinen Region. Das riesige, durch den bestehenden Tunnel verursachte Drainagesystem scheint schon in kurzer Entfernung nicht mehr zu wirken. Die 50 m südlich der Bohrung ohne hydraulischen Druck ausfliessenden warmen Quellen wurden vor, während und nach den Bohrarbeiten intensiv beobachtet, ohne dass sie merkliche

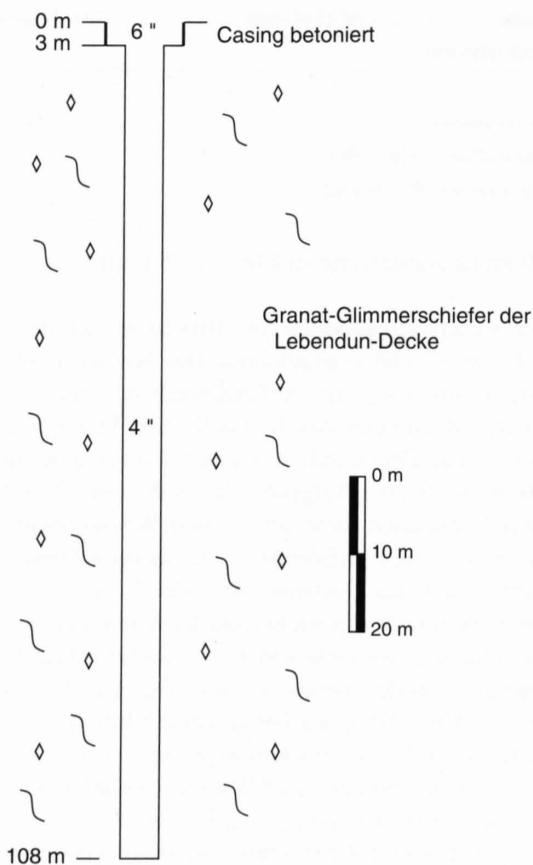
Bohrprofil F1



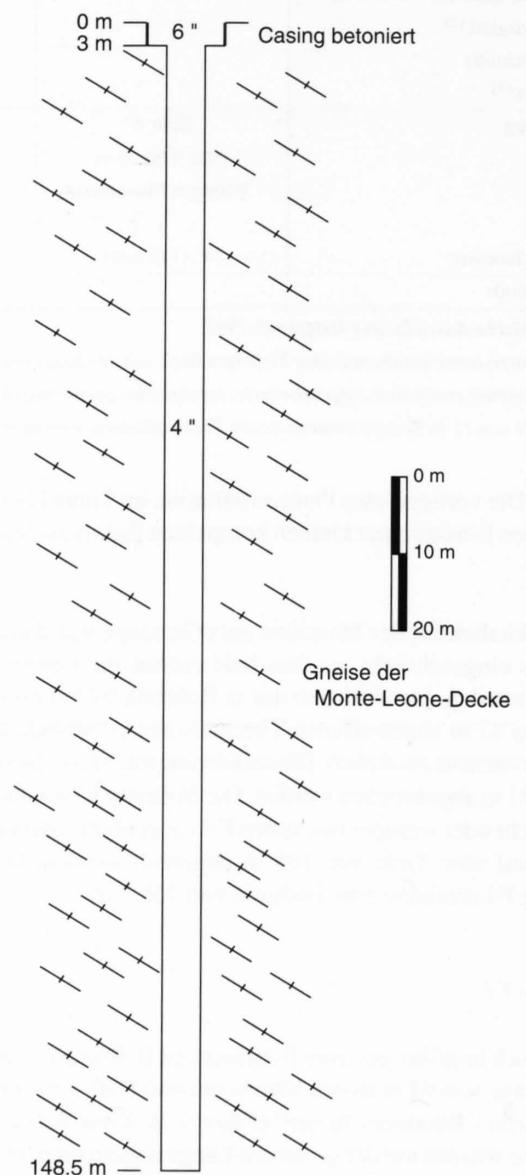
Bohrprofil F3



Bohrprofil F2



Bohrprofil F4

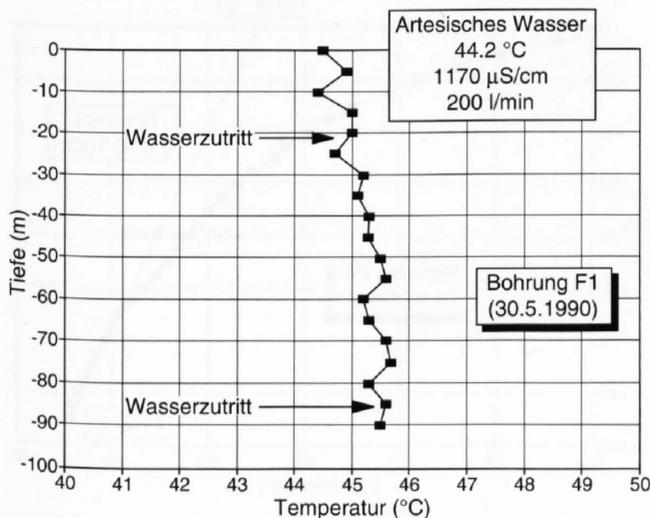


Figur 3.2: Technische und geologische Profile der vier Bohrungen im Simplontunnel (HAYOZ & ZUBER, 1990).

Schwankungen in der Schüttungsmenge, der Temperatur oder der elektrischen Leitfähigkeit erkennen liessen (Anhang 5 und 6).

Auf dem Bohrloch wurde ein Schieber installiert, der es erlaubt den Abfluss des Wassers zu unterbrechen. Nachdem der Verschluss während fünf Tagen geschlossen blieb, flossen bei der Öffnung des Schiebers - aufgrund des aufgebauten hydraulischen Druckes - 200 l/min mit einer Temperatur von 44.2 °C aus dem Bohrloch. Diese Menge nahm jedoch bereits nach 2 Stunden auf 150 l/min ab. Nach einigen Tagen stabilisierte sich die Schüttungsmenge bei etwa 60 l/min und blieb bis heute konstant. Bei geschlossenem Schieber steigt der Wasserdruck innerhalb von 24 Stunden wieder auf 25 bar. Das Wasser wies anfangs eine elektrische Leitfähigkeit von 1170 µS/cm auf. Die Temperatur und die elektrische Leitfähigkeit des aus der Bohrung fließenden Wassers haben seither kontinuierlich auf 45.0 °C bzw. 1440 µS/cm zugenommen und sich in dieser Größenordnung stabilisiert. Das Wasser ist chemisch zum Ca; SO₄-Typ zu zählen und ist mit dem Wasser der wärmsten Quellen, die während des Tunneldurchstichs beobachtet wurden durchaus vergleichbar.

Das thermische Profil (Figur 3.3), das zwei Wochen nach Abschluss der Bohrarbeiten aufgenommen wurde, zeigt einen zick-zackförmigen Anstieg der Temperatur mit der Tiefe. Die beiden angebohrten Wasserzutritte bei 22 bzw. 87 m Tiefe lassen sich anhand der Temperaturmessungen nicht registrieren. Zwischen beiden Zutritten erkennt man eine maximale Temperaturdifferenz von 0.5 °C. Der Anstieg der Temperatur beim ausfließenden Wasser dürfte mit dem Versiegen des ersten, kälteren Wasserzutrittes zusammenhängen.



Figur 3.3: Temperaturprofil in der Bohrung F1 (CRSFA, 1992).

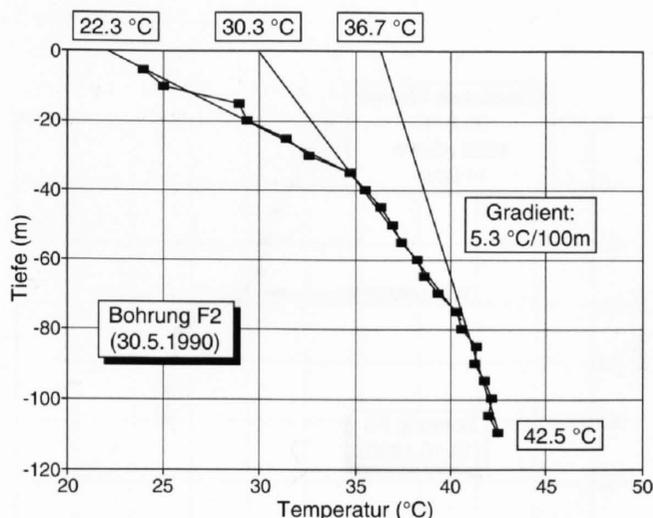
Die hohe Temperatur an der Oberkante der Bohrung ist durch den artesischen Ausfluss des warmen Wassers bedingt. Eine leichte Abkühlung des Wassers durch das kältere Gestein ist zu erkennen.

Die Ergebnisse eines Kurzzeitpumpversuches mit einer versenkten Pumpe lassen für dieses thermale Zirkulationssystem aufgrund der raschen Wasserniveaureaktionen im Bohrloch auf die Pumpleistungsänderungen eine geringe Durchlässigkeit mit einem schwachen Wassernachfluss für diese Bündnerschiefer postulieren. Detailliertere Untersuchungen der hydraulischen Charakteristiken dieser Gesteinsformation versprechen interessante Resultate.

Bohrung F2

Die zweite Bohrung liegt mit ihrer gesamten Länge von 108.3 m in den Granat-Glimmerschiefern der Lebendunzone (Figur 3.2). Diese Bohrung durchfuhr auf der vollen Länge eine homogene lithologische Einheit. Nur unbedeutende Wasserzutritte werden registriert. Das Bohrklein war häufig völlig trocken oder bestand vorwiegend aus Schlamm. In dieser Bohrung konnte ein Temperaturlog mittels einer Hochpräzisionstemperatursonde der ETH Zürich durchgeführt werden, welches den Einfluss des Tunnels auf die Felstemperaturen wiedergibt. Später wurden im Bohrloch alle 10 Meter Temperaturfühler installiert und einzementiert. Das Temperaturprofil lässt anhand einfacher Regressionen drei Temperaturgradienten ableiten (Figur 3.4):

- Die erste Regression zwischen 5 und 35 m kann mit der Formel $T (^{\circ}\text{C}) = 22.3 + 0.58 \times D \text{ (m)}$ beschrieben werden. Die Konstante gibt mit 22 °C die heute im Tunnel vorherrschende Lufttemperatur wieder. Der hohe Gradient von 58 °C/100 m ist auf das in Tunnelnähe abgekühlte Gestein zurückzuführen.
- Die zweite Regression zwischen 40 und 75 m folgt der Formel $T (^{\circ}\text{C}) = 30.3 + 0.132 \times D \text{ (m)}$. Die Konstante lässt sich mit der Bergwassertemperatur von 1988 kor-



Figur 3.4: Temperaturprofil in der Bohrung F2 (CRSFA, 1992).

Bei dem zwischen -80 und -110 m gemessenen sehr hohen Gradienten von 5.3 °C/100 m handelt es sich um einen unkorrigierten Gradienten. Er ist durch die starke Abkühlung der Umgebung des Tunnels bedingt.

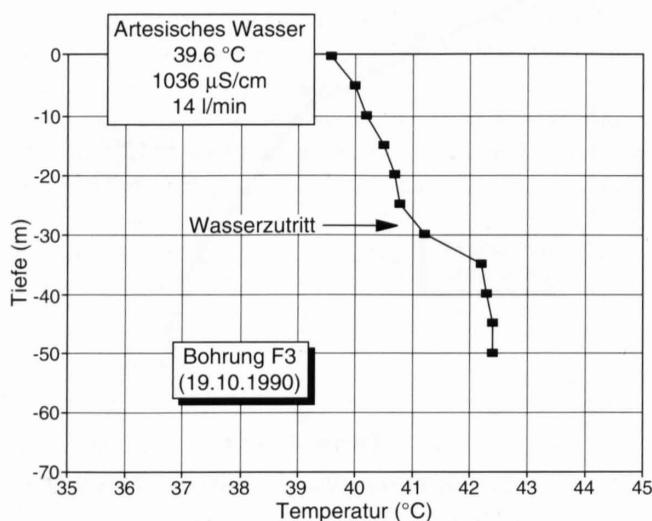
relieren. Der thermische Gradient nimmt mit zunehmender Entfernung zum Tunnel mit $13\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ jedoch deutlich ab.

- Die dritte Regression betrifft den Bohrlochabschnitt ab 80 m bis zur Endtiefe und ergibt die Formel $T\text{ (}^{\circ}\text{C)} = 36,7 + 0,052 \times D\text{ (m)}$. Die Konstante in dieser Formel gibt mit etwa $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ die ursprüngliche Bergwassertemperatur, die während des Tunnelbaus vorherrschte. Der Gradient von $5,3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ist jedoch immer noch recht hoch, und liegt deutlich über jenen $2,6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, welche von SCHARDT (1914) für diese Stelle berechnet wurden. Es ist wahrscheinlich, dass dieser Gradient von der Abkühlung beeinflusst ist und deshalb nicht dem natürlichen Gradienten vor dem Tunneldurchstich entspricht.

Bohrung F3

In der Bohrung F3 (km 6.8 ab Nordportal) wurde ebenfalls thermales Wasser angetroffen. Geologisch liegt das gesamte Bohrloch mit einer Länge von 65.5 m in den inhomogenen Gneisen und Schiefen der Berisal-Zone (Figur 3.2). In dieser Bohrung wurde bezüglich des Tunnelniveaus artesisch gespanntes Wasser in einer Tiefe von 28 m angefahren. In stabilisiertem Zustand fließen ca. 9 l/min mit $38.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (elektrische Leitfähigkeit = $850\text{ }\mu\text{S/cm}$; pH = 9.01) aus. Chemische Analysen lassen dieses Wasser als $\text{Na}; \text{SO}_4 > \text{HCO}_3$ -Typ charakterisieren. Mit einem fest installierten Manometer wurden bei blockiertem Abfluss Drücke von 12 bar bezüglich des Tunnelniveaus festgestellt (Tabelle 3.3). Technische Probleme verhinderten jedoch eine Messung des Wasserdruckes über einen längeren Zeitraum.

Technische Probleme verhinderten ebenfalls die Erstellung eines vollständigen Temperaturprofils. Gleichzeitige Mes-



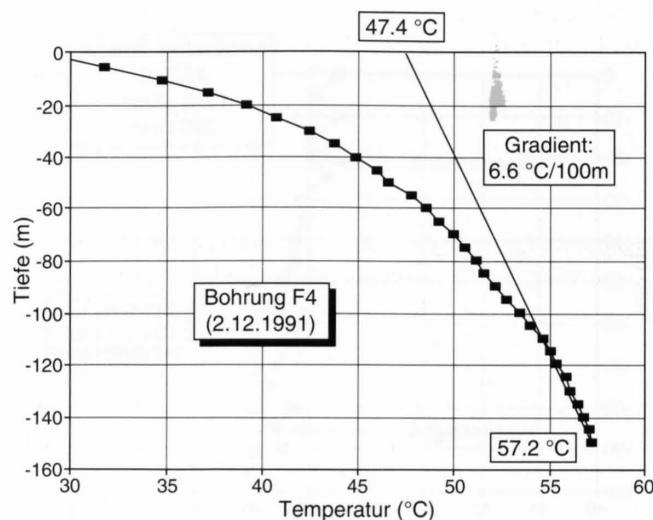
Figur 3.5 : Temperaturprofil in der Bohrung F3 (CRSFA, 1992).

Der Wasserzutritt ist auf dem Profil anhand des Temperatursprunges deutlich zu erkennen.

sungen von Temperatur- und Leitfähigkeitsprofilen liessen den Wasserzutritt in 28 m Tiefe sehr gut erkennen (Figur 3.5). Tatsächlich lässt sich im von unten aufsteigenden warmen Wasser eine deutliche Abnahme sowohl der Temperatur als auch der elektrischen Leitfähigkeit beobachten, was auf Zutritte von kälterem und schwächer mineralisiertem Wasser in der Tiefe hinweist.

Bohrung F4

Diese Bohrung verläuft vollständig in trockenem Gestein, das vor allem aus Gneisen der Monte Leone-Decke besteht (Figur 3.2). Um Temperaturmessungen durchführen zu können, musste die Bohrung zunächst mit Wasser aufgefüllt werden. Nach mehreren Monaten quoll das Wasser langsam zur Bohrung heraus. Daraus kann geschlossen werden, dass trotz der Trockenheit der Gesteine eine minime Gebirgswasserzirkulation von ca. 0.01 l/min vorliegt. Mehrere Temperaturprofile wurden bis heute gemessen. Zunächst erfolgten diese Messungen mittels im Abstand von jeweils 10 m fest installierten Temperaturfühlern. Da deren Genauigkeit aber ungenügend war, entschloss man sich im Oktober 1991 diese zu entfernen und die Temperaturmessungen mittels einer einfachen WTW-Sonde durchzuführen. Das im Dezember 1991 aufgenommene Temperaturprofil (Figur 3.6) zeigt einen kontinuierlichen Temperaturanstieg mit zunehmender Tiefe, mit dem Maximum von $57.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ an der Sohle der Bohrung. Die Regressionsgerade zwischen -110 und -150 m ergibt einen hohen Gradienten von $6.6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (Tabelle 3) mit einer extrapolierten Temperatur im Tunnel von $47.4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Diese Temperatur liegt unter den Felstemperaturen, wie sie während der Bauphase vorherrschten (ca. $55\text{ }^{\circ}\text{C}$). Dies lässt sich damit erklären, dass die Bohrung immer



Figur 3.6 : Temperaturprofil in der Bohrung F4 (CRSFA, 1992).

Bei dem zwischen -110 und -150 m gemessenen sehr hohen Gradienten von $6.6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ handelt es sich um einen unkorrigierten Gradienten. Er ist durch die starke Abkühlung der Umgebung des Tunnels bedingt.

noch in abgekühlten Felsbereichen liegt und sich die Abkühlungszone über die maximal erbohrten 150 m hinaus ausdehnt. Dieser hohe Wert für den berechneten Gradienten ist somit durch die noch wirksame Abkühlung in der tunnelnahen Zone erklärbar (siehe Kap. 4.4).

3.3 Untersuchung der Thermalquellen

Die Quellen des Tunnels wurden bei einer ersten Begehung in ein Kataster (Anhang 4) aufgenommen, wobei die Quellen mit einer Schüttung < 1 l/min nicht weiter behandelt wurden (HAYOZ & ZUBER, 1990; ZUBER, 1990). Gesamthaft wurden ca. 150 Wasseraustritte katalogisiert und von 1 bis 150 numeriert (Anhang 4). Die Quellen wurden nach ihrer Position im Tunnel, d.h. entsprechend ihrer Distanz zum Nordportal aufgenommen. Da oftmals in beiden Tunnelröhren Quellen auf gleicher Höhe auftraten, wurde eine Gliederung in linke und rechte (generelle Orientierung: Brig-Iselle) Röhre notwendig. Bei den fünf Messkampagnen (Dezember 1987, April und August 1988, Februar und Dezember 1989) wurden die Schüttung, die Temperatur und die elektrische Leitfähigkeit aller katalogisierten Quellen gemessen. Bei zwei Durchgängen wurden zudem auch der pH und der gelöste Sauerstoff im Quellwasser gemessen. Die Zusammenstellung dieser Messungen findet sich in Anhang 5 und 6.

Die heute ca. 150 Wasseraustritte lassen sich entsprechend ihrer Standorte in sechs hydrogeologische Einheiten (HE) gliedern (Tabelle 5.1; Figur 5.1). 14 Quellen und 3 Bohrungen (F1, F3 und F4), die diese Einheiten repräsentieren, wurden ausgewählt und beprobt (Figur 2.1; Tabelle 3.4). Die Numerierung der Quellen von Q0 bis Q13 stellt eine einfache Gliederung dar, wobei die Ziffer mit dem Abstand zum Nordportal anwächst. Diese Wässer wurden chemisch analysiert (Anhang 7). Von 11 dieser 14 Quellen und von allen drei Bohrungen wurden zudem die Tritium-, Deuterium- und Sauerstoff-18-Isotopenkonzentrationen bestimmt.

Die geologischen Angaben in Tabelle 3.4 stammen aus den "Rapports Trimestriels". Dabei gilt es zu beachten, dass die Korrelation der Kilometerangaben aus den "Rapports Trimestriels" und der heute vorliegenden Hektometrierung (Anhang 2 und 3) im Tunnel nicht sehr einfach ist. Aus dieser Tabelle geht hervor, dass die meisten Wasservorkommen aus den stark tektonisierten triadischen Evaporiten sowie den jurassischen Bündnerschiefern stammen. Es sind dies Gesteine, die durch ihre gute Wasserlöslichkeit stark verwittern und somit z.T. riesige kanalartige Zirkulationswege bilden. Zahlreiche thermale Quellen weisen an der Austrittsstelle orange/rote Eisenablagerungen auf. Diese stark eisenhaltigen Wässer trifft man vor allem in den zentralen Tunnelabschnitten an. Es handelt sich nicht um eine zusammenhängende Zone, sondern es ist viel mehr ein Zusammenhang mit der streckenweise rasch wechselnden Petrographie der anstehenden Gesteine zu sehen.

Tabelle 3.4: Geologisches Umfeld der beprobten Quellen und Bohrungen (NP = Nordportal; R = rechte Tunnelröhre; L = linke Tunnelröhre).

Nr	KM AB NP	LITHOLOGIE
Q0	3.864 (R)	Grenze zwischen Kalkglimmerschiefern und dolomitischen Kalken.
F3	6.619 (R)	Stark verfaltete, schiefrige Gneise, die in Glimmerschiefer mit amphibolitischen Einlagen übergehen.
F4	7.819 (R)	Gebankte Zweiglimmer-Gneise, lokal stärker geschiefert oder faserig. Anhydrit-Äderchen. Einheitliches Einfallen der Schichten von 20-30 ° gegen NW.
Q1	8.541 (R)	Silbrig-weiße Glimmerschiefer mit Anhydrit-Äderchen, oft kalkhaltig.
Q2	9.866 (R)	Glimmerhaltige Kalkschiefer und körnige Kalke, gut gebankt.
Q4	9.880 (R)	Zuckerkörnige Marmore und graue Kieselkalke, stark zerbrochen. Einfallen der Schichten von 15 bis 50 ° gegen NW.
Q3	9.979 (L)	Wasserführende, korrodierte, offene Brüche und Klüfte mit Calcitkristallen auf den Oberflächen.
Q5	9.989 (R)	Gelbe Ablagerungen von Eisenhydroxiden.
Q6	10.296 (L)	
F1	10.367 (R)	
Q7	10.413 (R)	Glimmerhaltige Kalke, gebankt oder schiefrig, mit deutlicher Klüftung.
Q8	10.430 (R)	Schichtfallen gegen NW. Die grössten Quellen stehen in Verbindung mit Brüchen.
Q9	10.566 (R)	
Q11	10.575 (L)	
Q10	10.667 (R)	Stark kalkhaltige Glimmerschiefer. Zerbrochenes Gestein mit wenig Zusammenhalt. Praktisch horizontale Schichten.
Q12	15.360 (R)	Weisse bis graue, gebankte und stark verfaltete, glimmerhaltige Marmore. Das Gestein ist stark zerbrochen.
Q13	15.887 (L)	Bedeutende, vertikale Kluft in den massiven Gneisen in der Nähe einer Mylonit-Zone („micaschistes noirs“ bei Schardt). Zwei Quellen traten beim Durchstich aus dieser Kluft aus, eine aus der Tunneldecke mit 26°C, die andere aus dem Tunnelboden mit 30 °C.

3.4 Physikalische Parameter der Wässer

Die Figur 3.7 zeigt die Verteilung der gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten, Temperaturen und Schüttungen des im Tunnel anfallenden Wassers. Man beobachtet, dass die Mehrheit der Quellen kleine Schüttungen (< 50 l/min) und elektrische Leitfähigkeiten zwischen 1000 und 1500 µS/cm aufweisen. Die Temperatur des überwiegenden Teils der Quellen schwankt zwischen 12 und 35 °C. Zwischen diesen drei Parametern liegen keine Zusammenhänge vor, was auf individuelle Wasserzirkulationen ohne Durchmischung der einzelnen Wassertypen hinweist (Figur 3.8).

Temperatur

Die Temperatur des Quellwassers im Tunnel variiert zwischen 8 °C (Nordportal) und ca. 45 °C (Bohrung F1 bei km 10.4). Die kältesten Quellen befinden sich jeweils in der Nähe der Tunnelportale. Die subthermalen Wasseraustritte (12 °C bis 20 °C) und thermalen Quellen (> 20 °C) findet man auf der ganzen Tunnellänge. Die wärmsten Quellen (30 - 40 °C) liegen zwischen km 9 und 11 ab Nordportal.

Elektrische Leitfähigkeit

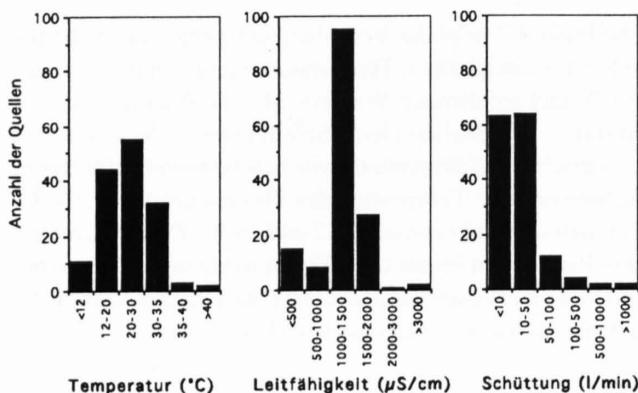
Die elektrische Leitfähigkeit des Quellwassers im Tunnel schwankt zwischen ca. 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Quellen bei km 15.9) und ca. 7300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Bohrung F4 bei km 7.8). Die Bohrung F4, in den Monte Leone-Gneisen situiert, weist allerdings eine sehr geringe Schüttung auf (ca. 0.01 l/min). In den zentralen Tunnelbereichen findet man zwei unterschiedliche Wassertypen. Der eine Typ wird charakterisiert durch elektrische Leitfähigkeiten zwischen 1150 und 1350 $\mu\text{S}/\text{cm}$, der andere, stärker mineralisierte Typ durch Leitfähigkeiten zwischen 1550 und 1750 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Die Grenze zwischen diesen beiden Quellgruppen liegt ungefähr bei km 10.35 ab Nordportal (Figur 5.2).

Schüttung

Die Schüttung der Quellen schwankt zwischen < 1 l/min und mehr als 10'000 l/min (geschätzter Wert für zwei grosse Quellen aus den Teggiolo-Marmoren bei km 15.4). Die geringsten Schüttungsmengen finden sich in den kristallinen Gesteinen, wo sie für die einzelnen Quellen nie 10 l/min überschreiten (Anhang 5 und 6). Die aus den karbonatisch-evaporitischen Formationen der Veglia-Zone austretenden Quellen weisen extreme Schwankungen der Schüttung auf (Figur 5.2).

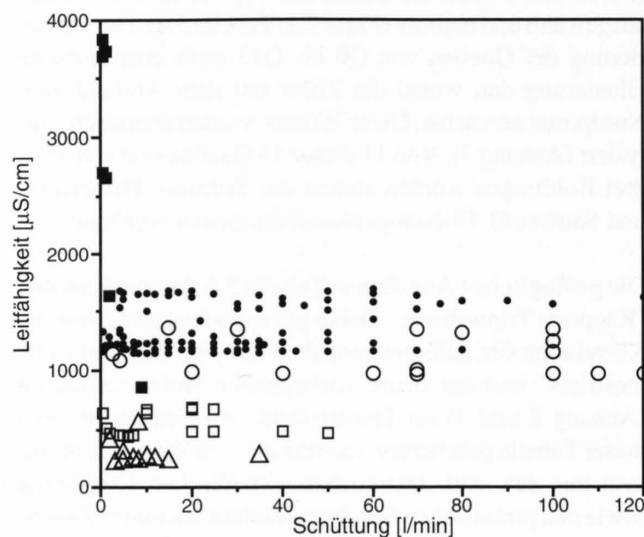
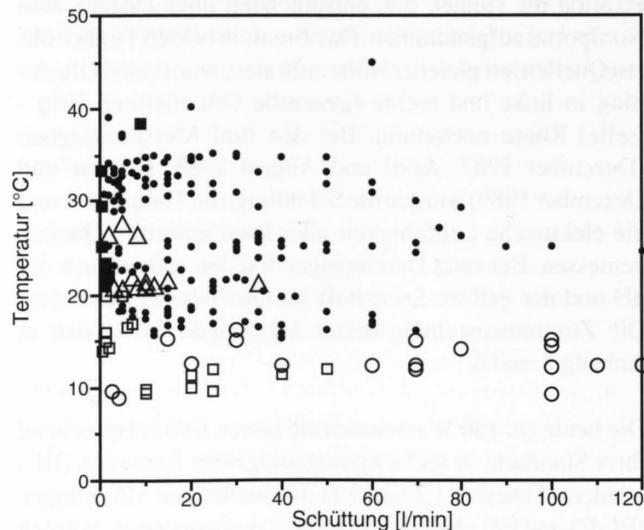
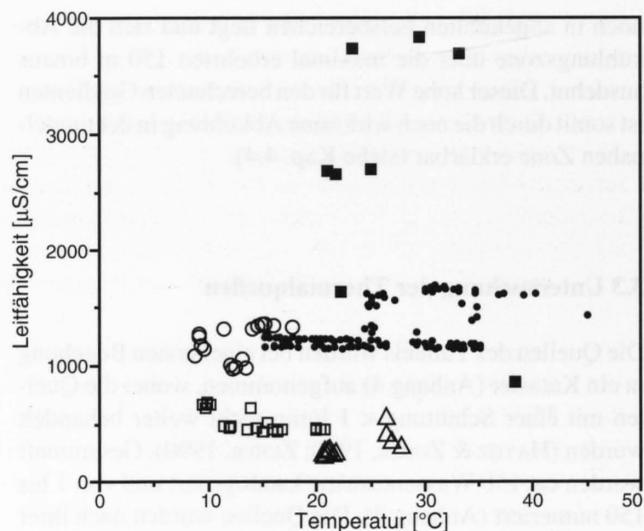
Langfristige Schwankungen

Um die langfristigen Schwankungen zu quantifizieren, wurden die neuesten Messergebnisse mit den Angaben aus den Jahren 1898-1905 verglichen. Der dazwischen liegenden Messlücke von ungefähr 85 Jahren muss bei direkten Vergleichen entsprechend Rechnung getragen werden. Interessante Rückschlüsse lässt Anhang 12 zu, in welchem Jahresganglinien des Abflusses im Tunnelkanalsystem für ver-



Figur 3.7: Verteilung der physikalischen Parameter der Quellen im Simplontunnel (Niedrigwasserstand, April 1988).

Die Mehrheit der Quellen weist eine elektrische Leitfähigkeit zwischen 1000 und 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und eine geringe Schüttung von weniger als 50 l/min auf. Nur eine kleine Minderheit der Quellen weist eine Temperatur von mehr als 35 $^{\circ}\text{C}$ auf.



Hydrogeologische Einheiten (vgl. 5.1):

□ Sion-Courmayeur ■ Berisal • Veglia ○ Teggiolo △ Antigorio

Figur 3.8: Gegenüberstellung von Temperatur, elektrischer Leitfähigkeit und Schüttung (Niedrigwasserstand, April 1988).

Die Abwesenheit jeglicher Korrelation zwischen den dargestellten Parametern zeigt, dass keine Mischung zwischen den verschiedenen Wässern stattfindet.

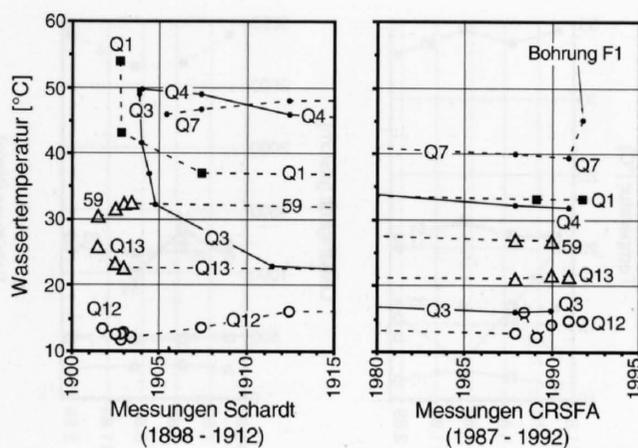
schiedene Epochen aufgezeichnet sind. Die Messstation befindet sich in der Nähe des Südportals bei Iselle und misst die gegen Südosten abfliessende Wassermenge. Da sich die meisten Quellen im südlichen Teil des Tunnels befinden, wird somit der überwiegende Anteil des im Tunnel abfliessenden Wassers von dieser Messstation erfasst. Bei den saisonalen Schwankungen wurden v.a. die Resultate der vier Messkampagnen von 1987 bis 1989 und die Jahresganglinien der Messstation bei Iselle berücksichtigt.

Zwischen den Messungen, die während der Bauphase aufgenommen wurden und den von uns durchgeführten Messungen liegen keine Angaben über das Verhalten der Quellen im Simplontunnel vor. Vergleicht man die Temperaturen und Ergiebigkeiten der Quellen in der wärmsten Zone von 1905 mit den Resultaten vom August 1988, so fällt die markante Temperatur- und Schüttungsabnahme auf (Figur 3.9 und Anhang 3). Aus den "Rapports Trimestriels" von Schardt geht hervor, dass sich diese Abnahme relativ früh einstellte. Es ist äusserst schwierig die Höhe des Gebirgswasserspiegels abzuschätzen. Mittels der Bohrungen im Jahre 1990 wurde festgestellt, dass die Drainagewirkung des Tunnels die tunnelnahe Zone nicht vollständig erfasst hat (3.2).

Die maximalen Wassermengen, die beim Südportal ausflossen - der Grossteil des Bergwasseranfalls wird gegen Süden dräniert - wurden während den Jahren 1907-1912 gemessen (Anhang 12). Das absolute Maximum vom Sommer 1908 (78'000 l/min) wurde bis heute nicht mehr erreicht oder zumindest nicht mehr messtechnisch erfasst. Die allgemeine Tendenz lässt vermuten, dass während den nachfolgenden Jahren die Ergiebigkeit der Quellen bis ins Jahr 1960, das ein Minimum von 33'000 l/min aufweist, konstant abnahm. Seither ist der Abfluss wieder leicht angestiegen und hat im Jahre 1987 ein vorläufiges Maximum von 75'000 l/min erreicht (Anhang 12). Die im Jahre 1988 abfliessende Wassermenge pendelte sich in der Grössenordnung von 54'000 - 60'000 l/min ein.

Die gegen Norden dränierten Wässer sind wesentlich unbedeutender und wiesen im Jahre 1904 eine maximale Schüttung von 12'000 l/min auf (BIANCHETTI, in Vorbereitung). Heute misst man noch ca. 1380 l/min (KÄMPFEN, 1992). Die von uns durchgeführten Messungen haben für die einzelnen Quellen im Vergleich zu den alten Messungen (SCHARDT, 1902) ähnliche Tendenzen erkennen lassen. Der Drainageeffekt des Tunnelbaus hat zur Entleerung der Kavernen und Klüfte, die mit Wasser aufgefüllt waren, geführt. Zudem werden bei mehr oder weniger allen Quellen signifikante saisonale Schüttungsschwankungen festgestellt, wobei diese Schwankungen bei Quellen mit grosser Schüttung bedeutend stärker ausfallen.

Die Langzeitbeobachtungen der physiko-chemischen Parameter lassen darauf schliessen, dass die Schüttungen heute mehrheitlich stabilisiert sind und nur geringe Schwankungen aufweisen. Die Wassertemperaturen und die Gesamtmineralisation sind relativ stabil.



Hydrogeologische Einheiten (vgl. 5.1):
 ■ Berisal • Veglia ○ Teggiolo △ Antigorio

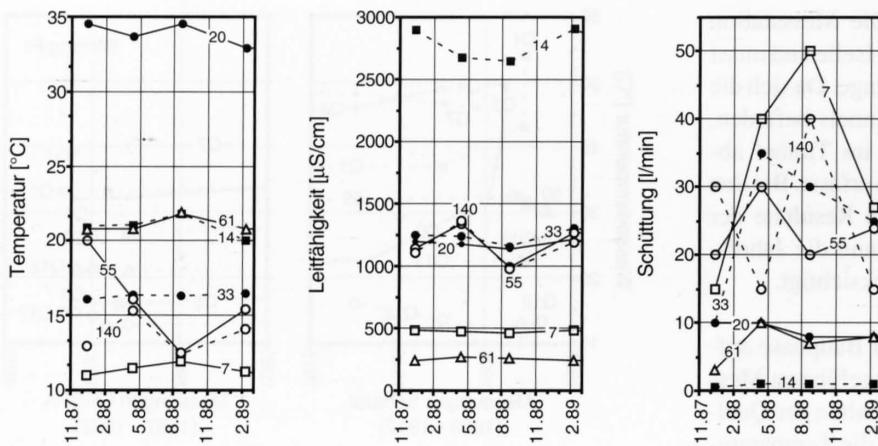
Figur 3.9: Entwicklung der Temperatur einiger Quellen des Tunnels während des 20. Jahrhunderts (BIANCHETTI, in Vorbereitung). Die Temperatur aller Wässer nahm deutlich ab, mit Ausnahme der Quellen der Teggiolo-Marmore (Q12). Jede der hydrogeologischen Einheiten (siehe 5.1), wie auch verschiedene Quellen innerhalb derselben Einheit, zeigen unterschiedliche Abkühlungsgeschichten.

Saisonale Schwankungen

Die Ganglinien der Messperioden 1907-1912, 1959-1966 und 1987, 1988 für die gegen Süden dränierten Wässer, zeigen im allgemeinen einen ähnlichen Jahresabfluss (Anhang 12). Generell beobachtet man pro Jahr zwei Abflussmaxima, wobei das erste, anfangs Juli, ausgeprägter in Erscheinung tritt. Das zweite Abflussmaximum ist weniger deutlich und erfolgt anfangs Oktober bis Mitte November. Das Winterhalbjahr von Dezember bis Mai wird durch einen relativ konstanten Abfluss gekennzeichnet. Dies gilt für alle gemessenen Jahre, obgleich die Schüttungsmenge unterschiedlich ist.

Mit grosser Regelmässigkeit steigt die Schüttung anfangs Mai an. Sie nimmt rapide zu und erreicht anfangs Juli ihr Maximum. Der Rückgang des Wasseranfalls erfolgt bedeutend abgeflachter und umfasst die Monate Juli bis Oktober. Der Abflussanstieg im Frühling lässt sich mit dem Einsetzen der Schneeschmelze korrelieren; der regelmässige Beginn des Anstiegs belegt den Zusammenhang deutlich.

Die Abnahme der Schüttung nach dem Frühjahrsmaximum wird in einzelnen Jahren von einem zweiten Anstieg abgelöst. Dieser zweite jahreszeitliche Anstieg erfolgt wesentlich unregelmässiger und ist deshalb auf klimatische Phänomene einzelner Jahre zurückzuführen (z.B. herbstliche Regenperioden u.a.). Der steile Anstieg wird vor allem von den Kavernen im Teggiolo-Marmor, welche die grössten Abflussmengen aufweisen, bestimmt. Nach Aussagen des vormaligen Bahnmeisters von Brig, Herrn Schmidhalter (münd-



Figur 3.10: Saisonale Schwankungen von Temperatur, elektrischer Leitfähigkeit und Schüttung einiger Quellen aus dem Simplontunnel. Innerhalb eines hydrologischen Zyklus variiert die Schüttung am stärksten, während elektrische Leitfähigkeit und Temperatur recht stabil sind. Die subthermalen Wässer der Karstzone bei km 15.4 (Quellen 55 und 140) zeigen insgesamt die deutlichsten jahreszeitlichen Schwankungen.

liche Mitteilung, 1989), reagieren diese grossen unterirdischen Kanäle sehr rasch auf ausgiebige Niederschlagsperioden. Dies ist aber nicht notwendigerweise auf die hohe Durchflussgeschwindigkeit zurückzuführen. Vielmehr handelt es sich um die Wasserdruckwelle, die sich rasch durchs hydraulische System fortpflanzt. Auch bei den wärmsten Quellen lassen sich merkbare Schüttungsvariationen feststellen, die aber nicht mit der Schneeschmelze oder starken Niederschlägen korrelierbar sind.

Saisonale Schwankungen wurden in den 4 Messkampagnen der Jahre 1987, 1988 und 1989 vor allem in der Ergiebigkeit der Quellen beobachtet (Figur 3.10); die Temperatur- und Leitfähigkeitswerte bleiben hingegen mehrheitlich ziemlich konstant und weisen für die beprobten Wässer jährliche Variationen von nur 7 resp. 12 % auf. Die Figur 3.10 zeigt weiter das Verhalten von sechs repräsentativen Quellen der in Kapitel 5.1 ausgeschiedenen hydrogeologischen Einheiten. Die Quellen der Teggiolo-Marmore bei km 15.4 ab Nordportal zeigen im Gegensatz zu den übrigen, eher stabilen Quellen, bedeutende Temperatur- und Leitfähigkeitsschwankungen zwischen 12 und 16 °C respektive zwischen 970 und 1350 µS/cm. Die höchsten Werte wurden im April 1988 während des eigentlichen Tiefwasserstandes beobachtet. Die Tiefstwerte wurden im August 1988, beim Höhepunkt der Schneeschmelze gemessen.

3.5 Typologie und Geochemie der Wässer

Von den ausgewählten Quellen und Bohrungen wurden während vier Kampagnen (1987-1988) 43 Wasserproben entnommen und analysiert (HAYOZ & ZUBER, 1990). Zwischen 1990 und 1992 wurden 19 zusätzliche Proben entnommen, wobei das Wasser aus den Bohrungen ebenfalls berücksichtigt wurde (BIANCHETTI, in Vorbereitung). In Anhang 7 sind alle bestimmten chemischen, physikalischen und isotopischen Parameter der beprobten Quellen und Bohrungen zusammengestellt. Die Wässer weisen eine Total-

mineralisation zwischen 240 mg/l und 7880 mg/l auf, wobei der überwiegende Teil einen Mineralgehalt zwischen 1000 und 2000 mg/l aufweist.

Das Wasser aus kristallinen Gesteinen, das sich durch seine chemische Zusammensetzung deutlich von den übrigen Quellen unterscheidet, bildet in der Totalmineralisation die beiden Extreme. Q13 ist mit 240 mg/l bei weitem das am wenigsten mineralisierte Wasser. Bohrung F4 weist mit 7880 mg/l den höchsten Mineralgehalt auf, bei einer sehr geringen Schüttung von ca. 0.01 l/min. Ebenso extrem fallen die pH-Werte aus: Q13 und F3 zeigen die höchsten pH-Werte (8 bis 9), F4 und Q1 die niedrigsten (6 bis 7).

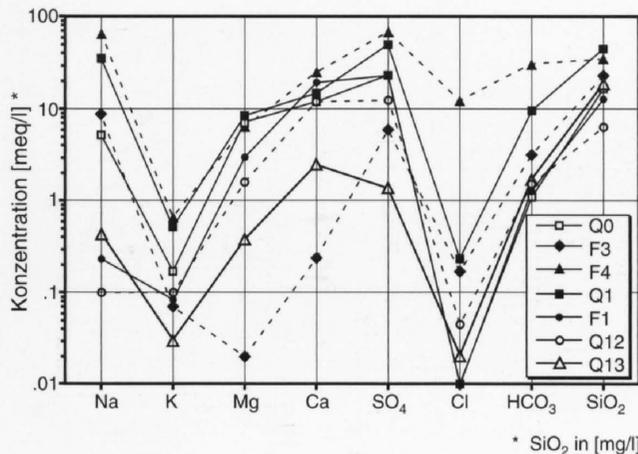
Man kann die analysierten Wässer, und damit die Gesamtheit der von diesen repräsentierten, im Simplontunnel abfließenden Wässer, anhand ihrer chemischen Zusammensetzung klassieren (Tabelle 3.5) indem das Kation und das Anion, das mehr als 20 % (in mval/l) der Gesamtheit der Kationen bzw. der Anionen ausmacht, die Zugehörigkeit zum jeweiligen Typ (VUATAZ, 1982) bestimmt. Praktisch alle Wässer sind sulfatisch. Sie können in drei geochemische Familien eingeteilt werden: Calcium-Sulfat-, Natrium-Sulfat- und Calcium-Bikarbonat-Wässer (Tabelle 3.5 und Figur 3.11).

Calcium-Sulfat-Wässer

Die Calcium-Sulfat-Wässer repräsentieren 95 % der Quellen. Sie treten aus den karbonatisch-evaporitischen Gesteinen der Veglia- und der Teggiolo-Zone aus. Die Bohrung F1, die Quellen 15 bis 58 (linke Tunnelröhre) und 71 bis 150 (rechte Tunnelröhre) gehören zu dieser Familie. Diese Wässer zeigen einen sehr einheitlichen Chemismus vom Typ Ca; SO₄, mit geringen Gehalten an Alkali-Metallen und Halogenen und einem pH nahe bei oder knapp über 7. Die Mineralisation (TDS) liegt zwischen 1000 und 2000 mg/l. Die Wässer sind gegenüber Gips, Anhydrit, Calcit und Dolomit gesättigt oder liegen nahe der Sättigung. Ohne Zweifel stammt ihr Mineralgehalt aus der Auflösung ihrer karbonatisch-evaporitischen Aquifergesteine (BIANCHETTI, in Vorbereitung; MANDIA, 1991).

Tabelle 3.5: Einteilung der beprobten Quellen aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung.

QUELLEN ODER BOHRUNGEN	GEOCHEMISCHE FAMILIE	GEOCHEMISCHER TYP	LITHOLOGIE BEIM AUSTRITT
Q0	Calcium-Sulfat-Wasser	Ca>Na; SO ₄ >HCO ₃	Kalkglimmerschiefer
F3	Natrium-Sulfat-Wasser	Na; SO ₄ >HCO ₃	Schiefrige Gneise
F4	Natrium-Sulfat-Wasser	Na>Ca; SO ₄ >HCO ₃	Schiefrige Gneise
Q1	Natrium-Sulfat-Wasser	Na; SO ₄	Glimmerschiefer
Q2, Q3, Q4, Q5, Q6, F1, Q7, Q8, Q9, Q10 u. Q11	Calcium-Sulfat-Wasser	Ca; SO ₄	Kalkschiefer, Marmore u. dolomitische Kalke
Q12	Calcium-Sulfat-Wasser	Ca; SO ₄	Marmore + Anhydrite
Q13	Calcium-Bikarbonat-Wasser	Ca; HCO ₃ >SO ₄	Kompakte Gneise



Figur 3.11: Darstellung der Wässer aus den wichtigsten Quellen und den Bohrungen im Diagramm nach Schoeller.

Die Wässer der Bohrungen F3 und F4 (Natrium-Sulfat-Wasser) zeigen chemische Eigenschaften, die sie von allen anderen im Tunnel angetroffenen Wässern, auch denjenigen derselben hydrochemischen Familie unterscheiden. Das Wasser der Bohrung F1 hingegen zeigt die typische Zusammensetzung der übrigen Calcium-Sulfat-Wässer des Tunnels.

Natrium-Sulfat-Wasser

Die Natrium-Sulfat-Wässer sind in der Regel sehr stark mineralisiert (TDS > 3000 mg/l), sie weisen eine geringe Schüttung auf (< 10 l/min) und treten aus den gneisigen Formationen der Monte Leone- und der Berisal-Decke. Die Bohrungen F3 und F4 sowie die Quellen 55 (linke Tunnelröhre) und 66 bis 70 (rechte Tunnelröhre) gehören zu dieser Familie. Die bedeutenden Unterschiede in Mineralisation und Chemismus widerspiegeln die Heterogenität der von diesen Wässern durchquerten Gesteine oder das Vorliegen von Mischungen zwischen verschiedenen Wassertypen. Auf jeden Fall ist gewiss, dass diese Wässer ihre spezielle Mineralisation (erhöhte Gehalte an Na, Li, Rb und Cs) zum grossen Teil während der Zirkulation in kristallinen Gesteinen erworben haben (VUATAZ, 1982; BIANCHETTI, in Vorbereitung).

Die Präsenz des Sulfates (3290 mg/l in F4!) kann durch die Oxidation des Schwefels aus den Pyriten und Chalkopyriten in den Gneisen erklärt werden. Der Chloridgehalt ist in F4 mit 439 mg/l bemerkenswert hoch gegenüber allen anderen Wässern, bei denen die Konzentration nie über 10 mg/l liegt. Die Auflösung von Steinsalz wurde als Chloridlieferant ausgeschlossen. Satt dessen wird der hohe Chloridgehalt

mit der Auswaschung von NaCl-haltigen fluiden Einschlüssen oder der Auflösung von chloridreichen Amphibolen oder Glimmern in den Gneisen erklärt (BIANCHETTI, in Vorbereitung).

Calcium-Bikarbonat-Wasser

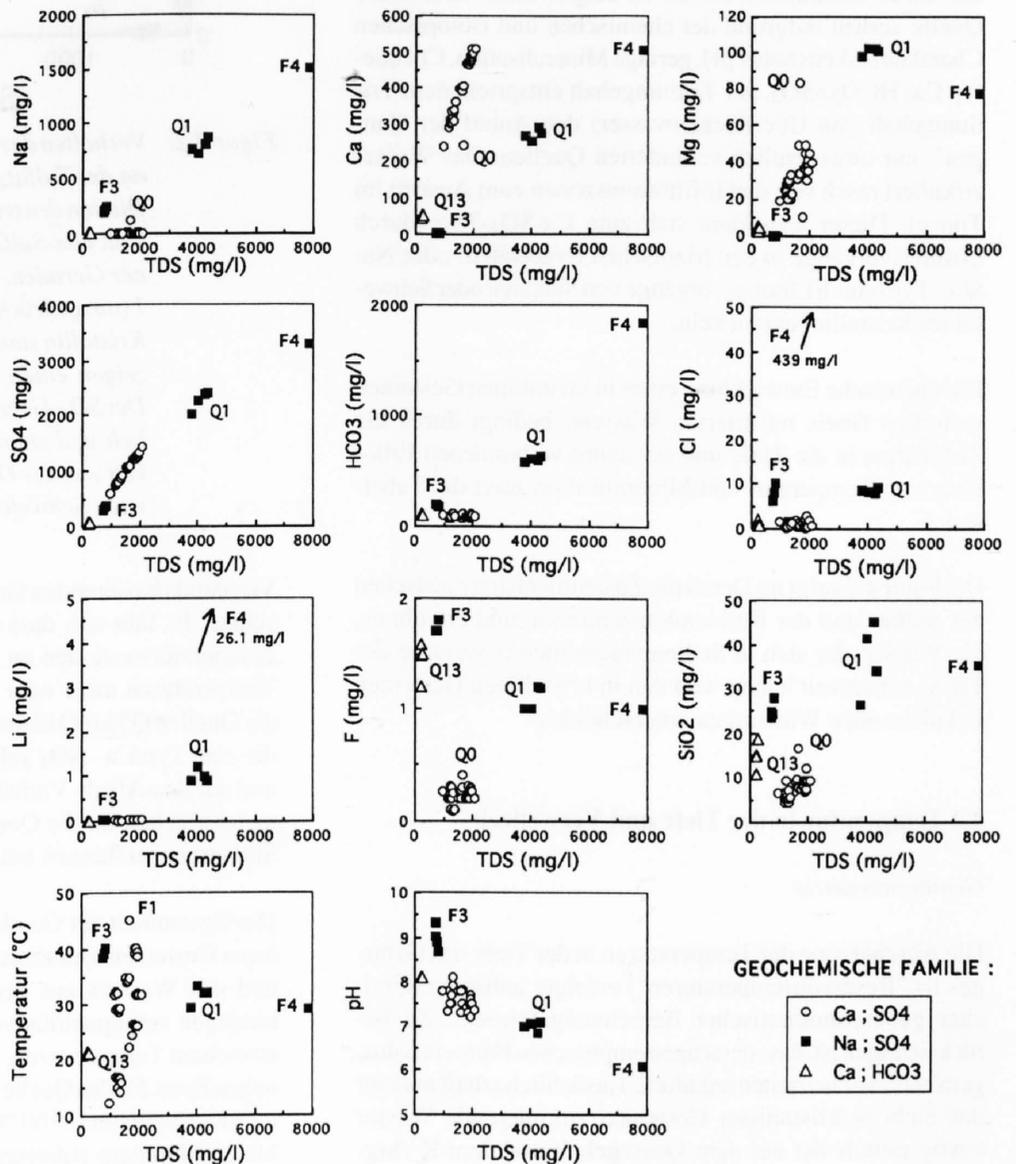
Die Calcium-Bikarbonat-Wässer sind schwach mineralisiert (TSD < 500 mg/l). Sie enthalten jedoch stets eine deutliche Sulfatkonzentration. Die Charakteristiken dieser aus den Gneisen der Antigorio-Decke austretenden Wässer sind typisch für kalte oder subthermale Zirkulationen in zerklüftetem kristallinem Gestein (DUBOIS, 1992).

4 INTERPRETATION DER RESULTATE

4.1 Hydrochemie und Reservoir-Gesteine

Die Variabilität der chemischen Zusammensetzung und der physikalischen Charakteristiken der im Tunnel angetroffenen Wässer (Quellen und Bohrungen) widerspiegelt die Diversität der durchflossenen Gesteine und unterstreicht die Länge der Zirkulationswege und damit die Dauer des unterirdischen Abflusses. Die Bohrungen F1, F3 und F4 haben diese Diversität noch hervorgehoben. Die detaillierte und ausführliche Interpretation sämtlicher geochemischer Angaben wird zur Zeit durchgeführt (BIANCHETTI, in Vorbereitung). Die folgenden Interpretationen ergeben sich aber bereits aus den Diagrammen der chemischen Zusammensetzungen (Figur 4.1).

- Die Temperatur zeigt tendentiell einen leichten Anstieg bei gleichzeitiger Zunahme der Gesamtmineralisation; eine Ausnahme bildet das Wasser der Quelle Q1 und aus der Bohrung F4, das aufgrund der jeweils sehr kleinen Schüttung durch Konduktion abgekühlt wird.
- Der pH-Wert nimmt generell bei ansteigender Gesamtmineralisation ab. Tatsächlich erhöht sich die Pufferkapazität des Wassers mit ansteigender Gesamtmineralisation. Das Wasser in F4 ist zudem möglicherweise mit CO₂ angereichert (Blasen treten an die Oberfläche).
- Der Sulfatgehalt korreliert sehr gut mit der Gesamtmineralisation. Einzig die Quelle Q1 und die Bohrung F4 zeigen, aufgrund der ansteigenden Chlorid- und Bikarbonatgehalte, gegenteilige Tendenzen.



Figur 4.1: Verhalten der physikalischen und chemischen Hauptkomponenten in Funktion der Gesamtmineralisation (TDS) (BIANCHETTI, in Vorbereitung).

Die Calcium-Sulfat-Wässer zeigen eine gute Korrelation zwischen TDS und den Erdalkalien sowie dem Sulfatgehalt. Diese Ionen stammen aus der Auflösung der karbonatischen und evaporitischen Gesteine der Trias.

- Die Alkali-Metalle (Li, Na, K) kommen im allgemeinen in sehr kleinen Konzentrationen vor, mit Ausnahme von Q1 und Bohrung F4, wo sich der Einfluss der kristallinen Gesteine manifestiert.
- Die Erdalkali-Metalle (Mg, Ca) kommen in grosser Menge vor und sind auf das Auftreten von gut löslichen Evaporiten und Dolomiten der Trias zurückzuführen. Die Proben aus dem Kristallin zeigen vollkommen verschiedene Zusammenhänge.
- Die Halogene (Cl, F) zeigen sehr unterschiedliche Zusammenhänge, entsprechend der durchflossenen Gesteinstypen.
- Die Bikarbonatkonzentration (HCO_3) zeigt, im Gegensatz zum pH, eine gute Stabilität für die Wässer mit Gesamtkonzentrationen $< 2.2 \text{ g/l}$. Einzig die Proben von Q1 und F4 mit einem $\text{pH} < 7$ zeigen einen merklich erhöhten HCO_3 -Gehalt.
- Die geringen SiO_2 -Gehalte ($< 10 \text{ mg/l}$) der Mehrheit der untersuchten Wässer sind auf das Fehlen silikatischer Mineralien in den triadischen Gesteinen zurückzuführen.

Die Quelle Q13 stammt aus den Gneisen und wird durch Sedimentgesteine beeinflusst. Sie schüttet junges Wasser, das durch Konduktion auf $21 \text{ }^\circ\text{C}$ aufgewärmt wird. Diese Quelle vertritt aufgrund der chemischen und isotopischen Charakteristiken (hoher pH, geringe Mineralisation, Chemietyp Ca; $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4$, der Tritiumgehalt entspricht dem Tritiumgehalt von Oberflächenwasser) den Anteil der "jungen", nur unwesentlich veränderten Quellen. Das Wasser zirkuliert rasch von den Infiltrationszonen zum Austritt im Tunnel. Dieser Typ kann sich zum Ca- SO_4 -Typ (durch Lösungsvorgänge in den triadischen Evaporiten) oder Na- SO_4 -Typ (durch Lösungsvorgänge von Silikaten oder Schwefel im Kristallin) entwickeln.

Die chemische Entwicklung eines in kristallinen Gesteinen vom Typ Gneis infiltrierten Wassers, bedingt durch die Zirkulation in die Tiefe und der damit verbundenen Erhöhung von Temperatur und Mineralisation zeigt die Tabelle 4.1.

Die Figur 4.2 zeigt im Detail die Zusammenhänge zwischen der Sulfat- und der Kalziumkonzentration und erlaubt es, die Wässer, die sich in Sedimentgesteinen (Evaporite der Trias) entwickelt haben, von den in kristallinen Gesteinen zirkulierenden Wässern zu unterscheiden.

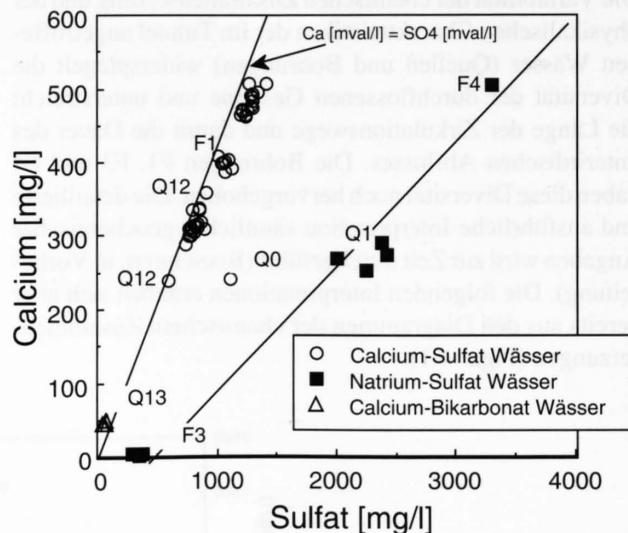
4.2 Temperatur in der Tiefe und Verweilzeit

Geothermometrie

Die Abschätzung der Temperaturen in der Tiefe des Gebirges (= "Reservoirtemperaturen") erfolgte anhand zahlreicher geothermometrischer Berechnungsformeln. Zu berücksichtigen ist, dass derartigen empirischen Formeln naturgemäss Unsicherheiten anhaften. Tatsächlich erhält man für das nicht in kristallinen Gesteinen zirkulierende Wasser einzig mittels der auf dem Quarzgehalt und dem K^2/Mg -

Tabelle 4.1: Entwicklungsablauf der Wasserzirkulationen im kristallinen Milieu des Simplongebietes.

	1	2	3	4
Messpunkt	Quelle Q13	Bohrung F3	Quelle Q1	Bohrung F4
Tunnel-Temp. ($^\circ\text{C}$)	26.4	39.4	32.1	29.3
Tiefe-Temp. ($^\circ\text{C}$)	-	> 42.5	-	57
Chemischer Typ	Ca- $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4$	Na- $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3$	Na $>$ Ca- SO_4	Na $>$ Ca- $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3$
TDS (mg/l)	230	780	4330	7880
Speichergesteine	Gneis	Gneis	Glimmerschiefer	Gneis
Geologische Einheit	Antigorio	Berisal	Monte Leone	Monte Leone



Figur 4.2: Verhalten der Calciumkonzentration in Funktion des Sulfatgehaltes.

Die von den triadischen Gesteinen beeinflussten Calcium-Sulfat-Wässer liegen beinahe auf einer Geraden, welche das Verhältnis $\text{SO}_4/\text{Ca} = 1$ (ausgedrückt in mval/l) darstellt. Die aus dem Kristallin stammenden Proben (F3, Q1 und F4) zeigen einen völlig anderen Zusammenhang: Der SO_4 -Gehalt überwiegt den Ca-Gehalt merklich und stammt mit grosser Wahrscheinlichkeit von der Oxydation des im Gestein verbreiteten Schwefels.

Verhältnis basierenden Geothermometer "vernünftige" Resultate. Es fällt auf, dass die Spannweite der berechneten Temperaturwerte den an den Quellaustritten gemessenen Temperaturen mehr oder weniger entspricht. Dies betrifft die Quellen Q2 bis Q12 und das Wasser aus der Bohrung F1, die zum Typ Ca - SO_4 gehören (Tabelle 4.2). Die auf SiO_2 und auf den Alkali-Verhältnissen basierenden Geothermometer ergeben für die Quellwässer, die durch Gesteine mit Silikatmangel fliessen, kaum signifikante Temperaturwerte.

Die Gesamtheit der Geothermometer für die in den kristallinen Gesteinen zirkulierenden Wässer von Q1 (und Q13) und des Wassers aus den Bohrungen F3 und F4 liefert hingegen semiquantitative Hinweise auf die in der Tiefe erreichten Temperaturen, vor der Abkühlung in der tunnelnahen Zone. Für die Quelle Q1 werden die höchsten Temperaturwerte berechnet ($> 60 \text{ }^\circ\text{C}$). In diesem Bereich des Tunnels können durchaus aufsteigende Wasserzirkulationen vorlie-

gen, die zu einer Aufwärmung des Gesteins führen (HAYOZ & ZUBER, 1990). Die chemischen und geologischen Untersuchungen lassen den Schluss zu, dass nahezu das gesamte Thermalwasser nicht aus der Tiefe stammt, sondern absteigendes Wasser ist, das sich auf dem Weg durch das Gestein an dessen Temperatur erwärmt und dieses entsprechend abkühlt. Die mittels der Geothermometer berechneten hohen Temperaturen für die Quelle Q1 (57 bis 88 °C) lassen aber vermuten, dass in dieser Region aufwärts strömende Wasserzirkulationen vorliegen, die das umgebende Gestein aufwärmen.

Tabelle 4.2: Maximaltemperaturen berechnet mittels verschiedener Geothermometer.

QUELLE (Q)	Q0			Q1	Q2 bis Q6		Q7 bis Q11	Q12	Q13
BOHRUNG (F)	F3	F4				F1			
Na-K-Ca (°C)	37	98	89	82	-	-	-	-	-
Na/K (°C)	-	38	65	88	-	-	-	-	-
Na/Li (°C)	-	-	-	87	-	-	-	-	-
Chalcedon (°C)	45	67	55	67	-	-	-	-	29
K ² /Mg (°C)	36	91	66	57	19-33	23	27-38	41	32
Austritttemp. (°C)	22	38	29	33	16-34	45	26-40	15	21
TDS (mg/l)	1650	850	7880	4010	1150-1330	1650	1600-2070	1250	280
Schüttung (l/min)	3	9	0.01	1	4-70	60	4-70	400	10

Verweilzeit

Die relativ hohen Tritiumgehalte (30-50 TU) der sulfatisch-calzitischen Wässer belegen eine relativ kurze Verweildauer von einigen wenigen bis ca. 30 Jahren (BIANCHETTI, in Vorbereitung). Die mässigen Temperaturen und die hohen Fließgeschwindigkeiten in den Teggiolo-Marmoren lassen sich durch rasche Zirkulationen mit einer Verweildauer von einigen Tagen bis einigen Monaten in Karstkanälen erklären, die infolge Lösungsvorgängen in den Evaporiten und Marmoren entstanden sind. Man muss erwähnen, dass die Wässer der Quelle Q1 und aus den Bohrungen F3 und F4 kaum Tritium enthalten (³H < 1 TU), was bedeutet, dass das Wasser sehr langsam zirkuliert und die Verweilzeit mindestens mehrere Jahrzehnte beträgt (> 40 Jahre, Infiltration vor 1952). Da keine Kohlenstoff-14 Analysen vorliegen, kann keine weitergehende Altersinterpretation durchgeführt werden.

4.3 Evaluation der Infiltrationszone

Die Konzentrationen der stabilen Isotope Sauerstoff-18 und Deuterium erlauben die Berechnung ungefährender Infiltrationskoten für die untersuchten Quellen (Tabelle 4.3). Natürliche Prozesse behindern allerdings diese komplexen Abschätzungen:

- Wenn das Niederschlagswasser über eine gewisse Zeit an der Oberfläche verharret, kann sich das Wasser durch Verdunstung an schweren Isotopen anreichern und damit eine zu niedrige Infiltrationskote vortäuschen.
- Die Beziehung zwischen Sauerstoff-18, bzw. Deuterium und der Kote der Niederschläge ist nicht universal gültig. Die Verhältnisse können in Ebenen für grössere

Tabelle 4.3: Sauerstoff-18 (δ¹⁸O) und Deuterium (δD) im Wasser der Quellen und Bohrungen des Simplontunnels und die daraus berechneten Koten der Infiltrationszonen.

QUELLE BOHRUNG	DATUM	δ ¹⁸ O (‰)	δD (‰)	d (1) (‰)	KOTE (müM)	
					¹⁸ O	D
Q0	19.12.90	-15.83	-112.3	14.3	2700 (2)	2500 (2)
F3	19.12.90	-12.98	-90.2	13.6	1650 (2)	1490 (2)
F4	08.04.92	-14.08	-97.1	15.5	2060 (2)	1810 (2)
Q1	19.12.90	-14.83	-100.6	18.0	2330 (2)	1970 (2)
Q4	18.12.90	-12.91	-91.0	12.3	1590 (3)	1610 (3)
Q5	18.12.90	-12.83	-91.4	11.2	1560 (3)	1620 (3)
Q6	23.08.88	-12.96	-92.4	11.3	1600 (3)	1660 (3)
F1	18.12.90	-12.77	-88.3	13.9	1540 (3)	1570 (3)
Q7	18.12.90	-12.25	-87.4	10.6	1370 (3)	1460 (3)
Q8	18.12.90	-12.88	-88.5	14.5	1580 (3)	1510 (3)
Q9	18.12.90	-12.78	-88.8	13.4	1540 (3)	1520 (3)
Q10	18.12.90	-12.61	-86.5	14.4	1490 (3)	1430 (3)
Q12	18.12.90	-12.73	-90.2	11.6	1530 (3)	1570 (3)
Q13	18.12.90	-12.21	-84.7	13.0	1360 (3)	1350 (3)

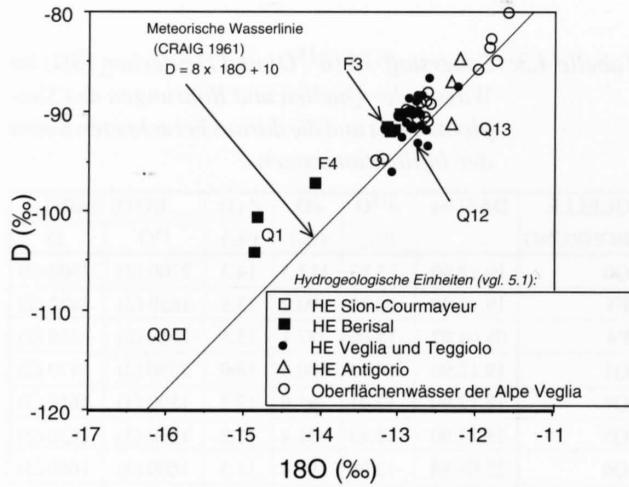
- (1) Überschuss an Deuterium : d(‰) = δD - 8 x δ¹⁸O
- (2) Koten berechnet mittels den Formeln nach VUATAZ (1982), gültig für den Alpennordhang
- (3) Koten berechnet mittels den Formeln nach BORTOLAMI et al. (1979), gültig für die mediterranen Alpenregionen

Regionen gültig sein, nicht aber für den Alpenraum mit stark wechselnden Einflüssen mediterranen oder ozeanischen Ursprungs. Hier können die Gradienten Isotope/Kote für kleine Räume wechseln. Zur Berechnung der Infiltrationskote der Wässer aus dem südlichen Tunnelabschnitt wurde die für den maritimen Alpenraum angepasste Formel von BORTOLAMI et al. (1979) verwendet (Tabelle 4.3).

- Bei Untersuchungen sehr alter Wässer (> 1000 Jahre) muss man von veränderten klimatischen Rahmenbedingungen ausgehen. Somit ist anzunehmen, dass die damalige Temperatur für eine gegebene Höhe nicht der heutigen entspricht. Dies könnte zum Beispiel bei den Bohrungen F3, F4 und den Quellen Q0 und Q1 durchaus der Fall sein. Daher muss man in diesem Fall zunächst die Infiltrationsepoche kennen, um die Kote der Infiltrationszone berechnen zu können.

Die Verhältnisse δ¹⁸O/δD zeigen tatsächlich einen mediterranen Einfluss der Niederschläge, da quasi die Gesamtheit der analysierten Proben links von der weltweit gültigen Geraden des Meteorwassers (Figur 4.3) auftritt. Der Überschuss an Deuterium (d) gegenüber der Beziehung δD = 8 x δ¹⁸O + d variiert zwischen 11 und 18 ‰ (Tabelle 4.3). Unter Normalbedingungen liegt dieser Überschuss bei 10 (δD = 8 x δ¹⁸O + 10).

Die mittlere, berechnete Kote der Infiltrationszone entspricht mehr oder weniger den mittels topographischer oder geologischer Methoden abgeleiteten Infiltrationskoten. Im Detail kann man sagen, dass die berechneten Koten für die Quellen Q0, Q1, Q12, Q13 und das Wasser aus der Bohrung F3 zutreffen, für die Quellen Q4 bis Q10 und das Wasser aus der Bohrung F1 hingegen zu niedrige Koten resultieren.



Figur 4.3: Verhältnis zwischen Deuterium (δD) und Sauerstoff-18 ($\delta^{18}O$) der Wässer aus dem Simplontunnel und von Oberflächenwässern der Alpe Veglia. Die Werte der Wässer aus dem südlichen Abschnitt des Tunnels stimmen gut überein mit denjenigen von Oberflächenwässern der Alpe Veglia.

Die klimatischen Bedingungen verlangen die Anpassung des Gradienten Isotope/Kote für das Oberflächenwasser zwischen 1000 und 2000 müM, um präzisere Resultate für die berechneten Koten der Infiltrationsgebiete zu erhalten. Die berechneten Koten der Infiltrationsgebiete widersprechen aber den aus den topographischen und geologischen Angaben abgeleiteten Koten der Einzugsgebiete keineswegs. Das gesamte im Tunnel gefasste Wasser kann aus dem im darüberliegenden Massiv situierten Einzugsgebiet stammen. Die mittlere Kote variiert zwischen 1500 und 2700 müM für den nördlichen Abschnitt und zwischen 1350 und 1700 müM für den südlichen Abschnitt. Die mittels des Isotopengradienten berechneten Koten der Infiltrationszonen sind durchaus kohärent, so dass die Einzugsgebiete für das Tunnelwasser nicht ausserhalb der Simplonregion zu suchen sind.

4.4 Modellierung der Abkühlung des Gesteins

Diese Studie der Modellierung basiert auf den Erkenntnissen, die aus den in nur sehr schwach durchlässigen Zonen abgeteufften Bohrungen F2 und F4 neu gewonnen wurden. Man kann davon ausgehen, dass der Wärmetransport konduktiv und nicht konvektiv erfolgt.

Die Berechnung erfolgte mittels der Lösung der Diffusionsgleichung des Wärmetransportes innerhalb der gegebenen Geometrie (zylindrische Form des Tunnels). Eine analytische Lösung dieses Problems wurde bereits von PAHUD (1989) entwickelt und informatisiert. Das entwickelte Programm erlaubt es, die Ausdehnung der gestörten Zone, den lokalen geothermischen Gradienten sowie den aktuellen Wärmefluss, der die Abkühlung des Gesteins verursacht, rechnerisch zu ermitteln (Tabelle 4.4).

Die Simulation erlaubte eine zufriedenstellende Berechnung der Temperaturprofile in den Bohrungen F2 und F4. Der Wärmefluss hat seit 1900 stark abgenommen und

Tabelle 4.4: Resultate der thermischen Modellierung (PAHUD et al., 1993)

PARAMETER	BOHRUNG F2	BOHRUNG F4
Aktueller Wärmefluss (W/m)	110 ± 20	150 ± 30
Nicht korrigierter geothermischer Gradient der Abkühlung (°C/100 m)	5.3	6.6
Korrigierter geothermischer Gradient (°C/100 m)	4.0 ± 0.5	2.8 ± 0.7
Abkühlung an der Sohle der Bohrung von 1900 bis 1991 (°C)	0.8 (bei 110 m)	1.0 (bei 150 m)
Abkühlung in einer Tiefe von 200 m von 1900 bis 1991 (°C)	0.1	0.2
Geothermischer Gradient zwischen der Oberfläche und dem Tunnel vor 1900 (°C/100 m)	2.5 ± 0.3	3.0 ± 0.4

beträgt heute ungefähr 100 W/m für den ganzen Tunnel, was ein geothermisches Potential von ungefähr 2 MWt ergibt.

Das Gestein wurde durch die "natürliche" Lüftung (Zugsverkehr, barometrische Differenzen zwischen dem Wallis und Italien) innerhalb einer radial um den Tunnel sich ausbreitenden Zone von ca. 250 m abgekühlt. Ausserhalb dieser Zone trifft man auf die anfänglichen Felstemperaturen.

Einige Bemerkungen und Vergleiche zum geothermischen Gradienten des Simplons und anderer alpiner Tunnels

Die im Tunnel durchgeführten Bohrkampagnen und Wärmemessungen sowie die Kenntnis der ursprünglichen Felstemperaturen zur Zeit des Tunneldurchstiches (SCHARDT, 1914), erlaubten es, geothermische Gradienten in der Grössenordnung von 3 - 4 °C/100 m (PAHUD et al., 1993) zu berechnen. Diese berechneten Werte liegen nahe bei oder nur wenig über dem weltweiten Normalgradienten von 3.0 °C/100 m. Sie sind aber signifikant höher als die in anderen Bergregionen beobachteten geothermischen Gradienten (Tabelle 4.5). Es ist bekannt, dass die in der Höhe in den Alpen gemessenen Gradienten oft deutlich niedriger sind, als der weltweite Normalgradient. Dieses Phänomen ist hauptsächlich durch die Abkühlung des Massives durch Vergletscherung und Zirkulation grosser Mengen kalten Wassers in Kluft- und Karstsystemen bedingt.

Tabelle 4.5: Berechnete geothermische Gradienten in verschiedenen alpinen Tunnels.

ORT	MASSIV/DECKE	GEOTH. GRADIENT (°C/100 m)	AUTOREN
Kanal Ost, Emosson	Mt Blanc	1.3	JAMIER, 1975
Mt Blanc-Tunnel	Mt Blanc	1.5	GUDEFIN, 1967
Albula-Tunnel	Err-Bernina-Decke	2.1	CLARK & NIBLETT, 1956
Gotthard Tunnel	Gotthard	2.2	CLARK & NIBLETT, 1956
Lötschberg-Tunnel	Aar	2.7	CLARK & NIBLETT, 1956
Simplon-Tunnel	Simplon	3.6	CLARK & NIBLETT, 1956
Simplon-Tunnel	Simplon	2.8 - 4.0	PAHUD et al., 1993

Diese Vergleichswerte zeigen, dass das Simplonmassiv aussergewöhnlich warm ist, wenn man seine Situation in der Alpenkette berücksichtigt.

5 ZUSAMMENSTELLUNG DER RESULTATE

5.1 Hydrothermale Zirkulationen im Simplonmassiv

Die bis heute durchgeführten Untersuchungen im Simplonmassiv erlauben die Erstellung eines konzeptuellen Modells der hydrothermalen Zirkulationen dieses Massivs.

Ausgehend vom Nordportal in Richtung Südportal lassen sich 6 hydrogeologische Einheiten (HE) mit deutlich unterschiedlichen geologischen, hydrogeologischen, geochemischen und thermischen Charakteristiken ausscheiden (Tabelle 5.1; Figur 5.1). Tatsächlich zeigen die Schüttung, die Temperatur, die Salinität und der chemische Typ der erfassten Wässer bedeutende Variationen. Diese vor allem räumlichen, aber auch zeitlichen Variationen werden durch folgende Faktoren bestimmt:

- Durchlässigkeit der wasserführenden Gesteine
- Zusammensetzung der wasserführenden Gesteine
- Mächtigkeit der Überdeckung über der Tunnelachse
- Länge der unterirdischen Zirkulationswege
- Verweilzeit der unterirdischen Zirkulationen

HE Sion-Courmayeur (Zirkulationen in den Kalkglimmerschiefern)

Die grössten Wasseraustritte (einige Tausend l/min) wurden hier während des Tunneldurchstichs in der Nähe des nördlichen Portals und von km 3 angetroffen. Innerhalb weniger Monate nahm die Schüttung rasch ab und die Mehrheit der Quellen versiegt. Heute kann man abgesehen von einer kalten wasserführenden Zone in der Nähe des nördlichen Tunnelportals (ca. 100 l/min) und einiger Wasseraustritte zwischen km 2.4 und 3 (Gesamthaft ca. 200 l/min) einzig einige Sickerstellen beobachten. Die Wässer sind schwach mineralisiert (TDS < 500 mg/l) und die Temperatur erreicht maximal 20 °C.

Die Grundwasserneubildung dieses hydrogeologischen Systems erfolgt wahrscheinlich direkt in den über dem Tunnel gelegenen Regionen mit einer vertikalen Infiltration und die Fliessgeschwindigkeit der Wässer beim Tunnelportal muss hoch sein. Von km 3 an müssen die Zirkulationen relativ langsam sein (einige zehn bis einige hundert Jahre?), um eine Erwärmung des Wassers auf ca. 20 °C zu erlauben.

HE Berisal (Zirkulationen in den schiefrig-kristallinen Gesteinen)

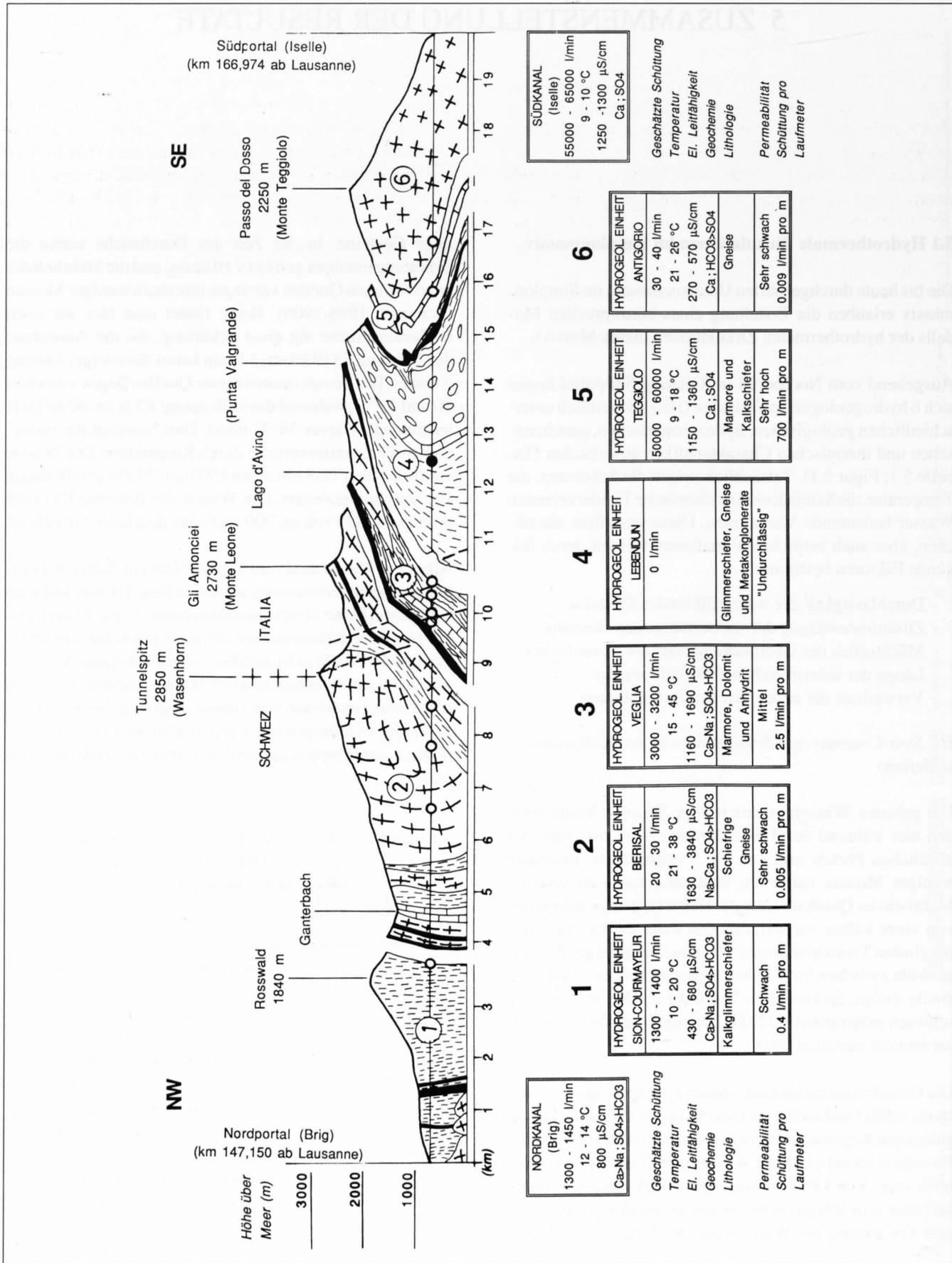
Diese hydrogeologische Einheit ist charakterisiert durch Wasserzirkulationen in den Brüchen und Klüften der kristal-

linen Gesteine. In der Zeit des Durchstichs waren die Schüttungsmengen gering (< 10 l/min) und die Mehrheit der angetroffenen Quellen versiegt innerhalb weniger Monate (SCHARDT, 1898-1906). Heute findet man hier nur noch 6 Wasseraustritte mit einer Schüttung, die mit Ausnahme der Bohrung F3 (9 l/min) 1 l/min kaum übersteigt (Anhang 5 und 6). Die Temperaturen dieser Quellen liegen zwischen 20 und 33 °C, während das in Bohrung F3 in ca. 60 m Tiefe austretende Wasser 38 °C misst. Dies bestätigt die bedeutenden Temperaturverluste durch Konduktion. Die Wässer sind mit einem TDS zwischen 2500 und 7900 mg/l (Bohrung F4) stark mineralisiert. Das Wasser der Bohrung F3 bildet mit einem TDS von ca. 700 mg/l eine deutliche Ausnahme.

Alle diese Wässer sind vom Typ der Natrium-Sulfat-Wässer. Sie sind stark reduzierend, enthalten kein Tritium und man beobachtet keine Mischungsphänomene. Diese Charakteristiken weisen zusammen mit den geringen Schüttungsmengen und der erhöhten Mineralisation auf sehr lange Verweilzeiten von mindestens einigen hundert Jahren, eventuell sogar von Tausenden von Jahren in gering durchlässigen, kristallinen Gesteinen hin. Die Zirkulationen verlaufen vermutlich zur Hauptsache vertikal, durch die Sohle des Tunnels.

Tabelle 5.1: Charakteristik der sechs hydrogeologischen Einheiten (HE) entlang des Tunnels (BIANCHETTI, in Vorbereitung).

HYDROGEOLOG. EINHEIT (HE)	KM AB NORDPORTAL	GEOLOGIE, BEMERKUNGEN, CHEMISMUS
Sion-Courmayeur	0 - 3.9	Termen- und Sion-Courmayeur-Zone (Kalkglimmerschiefer). Keine Wasserprobe
Berisal	3.9 - 9.4	Monte Leone-Decke und Berisal-Zone (schiefrige Gneise) Abschnitt praktisch trocken Bohrungen F3 (38°C) und F4 (7320 µS/cm), Quelle Q1 Natrium-Sulfat-Wässer
Veglia	9.4 - 10.7	Veglia-Zone (Kalkschiefer und Marmore) Quellen Q2 bis Q11, Bohrung F1 (45°C) Calcium-Sulfat-Wässer
Lebendun	10.7 - 15.3	Lebendun-Zone (Glimmerschiefer, Gneise, Metakonglomerate). Trockener Abschnitt Bohrung F2
Teggiolo	15.3 - 15.4	Teggiolo-Zone (Marmore und Kalkschiefer) Quellen mit sehr grossen Schüttungen (>1000 l/min). Infiltrat. Quelle Q12. Calcium-Sulfat-Wässer
Antigorio	15.4 - 19.8	Antigorio-Decke (Gneise) Nahezu trockener Abschnitt Quelle Q13. Calcium-Bikarbonat-Wässer



Figur 5.1: Die sechs hydrogeologischen Einheiten des Simplonmassivs und deren grundsätzliche Charakterisierungen (BIANCHETTI, in Vorbereitung). Mehr als 90% der Gesamtschüttung des Simplontunnels stammen aus der hydrogeologischen Einheit Teggiolo, die sich in verkarsteten Marmoren befindet.

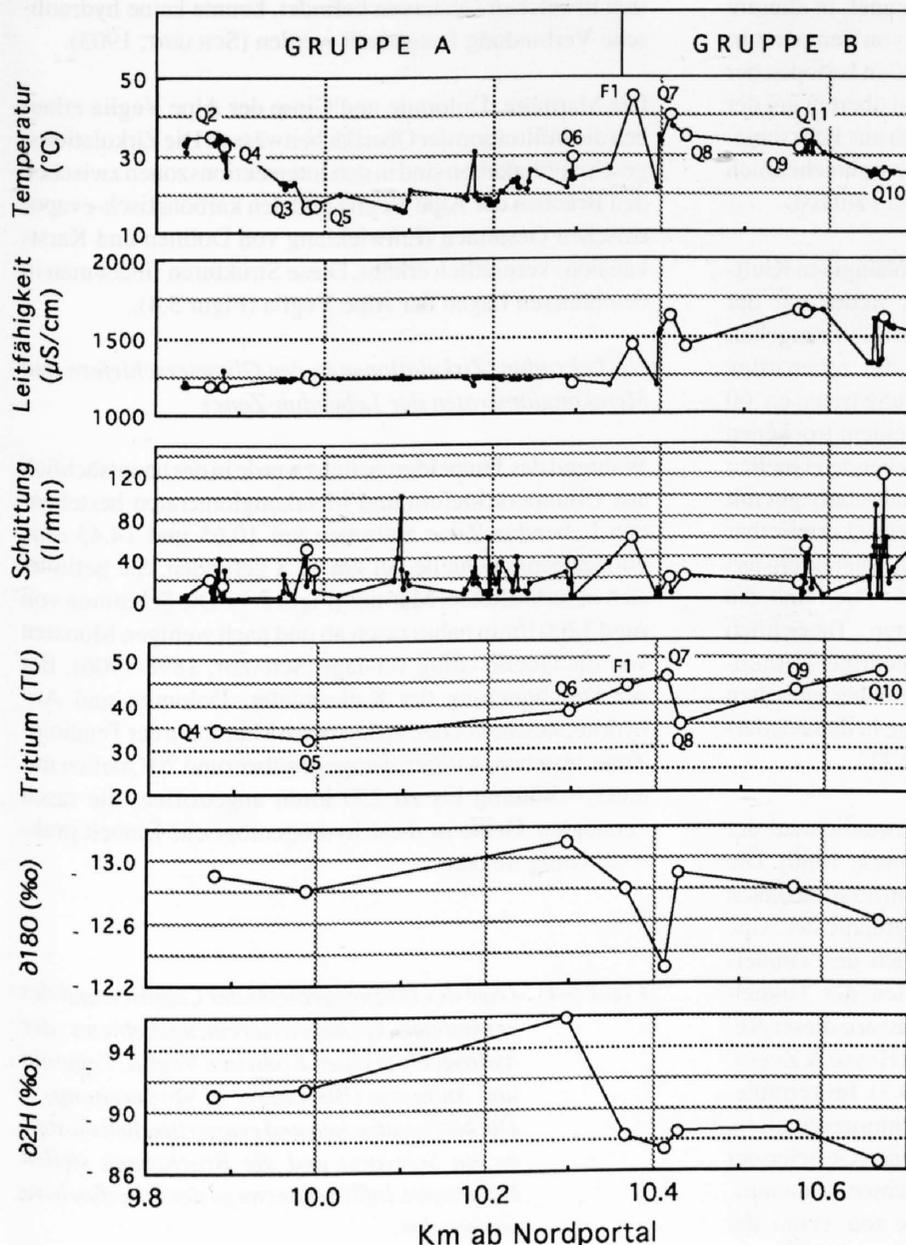
HE Veglia (Zirkulationen in den karbonatisch-evaporitischen Gesteinen der Veglia-Zone)

Während des Durchstichs wurden grosse Schüttungsmengen beobachtet, bei mehreren Quellen betragen sie mehr als 1000 l/min (SCHARDT, 1989-1906). Die Gesamtschüttung, welche von den zwei Tunnelröhren dräniert wurde, erreichte anfangs 1906 rund 20'000 l/min. Die Wässer waren sehr warm (zwischen 41 und 52 °C) und befanden sich im thermischen Gleichgewicht mit dem Gestein. Die Abnahme der Wassertemperatur zu Beginn des Jahrhunderts verlief unabhängig von der Schüttungsentwicklung. Die Schüttung hat nämlich im allgemeinen kaum abgenommen. Die hauptsächliche Ursache der Abkühlung ist daher nicht konduktiv und an die Durchquerung des abgekühlten Gesteins rund um den Tunnel gebunden, wie dies bei den hydrogeologischen Einheiten Sion-Courmayeur und Berisal der Fall ist.

Heute findet man hier mehr als 100 thermale und subthermale Wasseraustritte, das sind rund 75 % aller Quellen des

Tunnels, auf einer Länge von weniger als 1500 m. Die Wässer sind durch einen sehr homogenen Chemismus vom Typ Ca; SO₄ charakterisiert und enthalten wenig Alkalien und Chlorid. Die Wässer sind gesättigt mit Gips, Anhydrit und Calcit. Man beobachtet keine Mischungsphänomene mit wenig mineralisiertem „jungem“ Wasser (Schmelzwasser), was die Pufferwirkung aufgrund der doch mehrere Jahre dauernden Verweilzeit und der beträchtlichen Länge des Zirkulationssystems unterstreicht. Eine Unterteilung der Quellen dieser hydrogeologischen Einheit in zwei Gruppen kann aufgrund der hauptsächlich physikalischen und isotopischen Eigenschaften unternommen werden (Tabelle 5.2 und Figur 5.2).

Die Wässer der Gruppe A zeigen Werte von Temperatur, Mineralisation, Tritiumgehalt und schweren stabilen Isotopen, die tiefer sind als diejenigen der Gruppe B. Diese Tendenzen können mit einer rascheren Zirkulation und einer höheren Infiltrationskote der Wässer von Gruppe A erklärt werden. Sie sind deutlich erkennbar zwischen km 9.9



Figur 5.2: Temperatur, elektrische Leitfähigkeit und Schüttung der Wasservorkommen in der hydrogeologischen Einheit Veglia (BIANCHETTI, in Vorbereitung).

Die Zone zwischen km 9.9 und 10.4 ist hauptsächlich durch subthermale Quellen charakterisiert. Die Durchlässigkeit dieser Zone, die von den subvertikalen Brüchen der Alpe Veglia durchzogen wird, ist höher als diejenige der anderen Zonen.

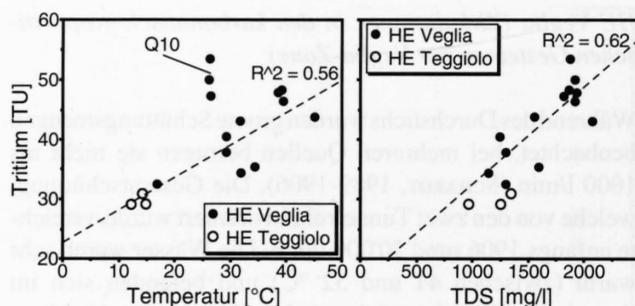
Tabelle 5.2: Unterteilung der Quellen der hydrogeologischen Einheit Veglia in zwei Gruppen und deren grundsätzliche Charakterisierung.

PARAMETER	GRUPPE A	GRUPPE B
Nr.	Q2 bis Q6	Q7 bis Q11, Bohrung F1
TDS (mg/l)	1150 bis 1350	1550 bis 2100
Temperatur (°C)	15 bis 35	24 bis 45
Totale Ergiebigkeit (l/min)	1700	1400
³ H (TU)	32 bis 38	35 bis 46
δ ¹⁸ O (‰)	-12.8 bis -13.1	-12.3 bis -12.9
δD (‰)	-91.0 bis -95.9	-87.4 bis -88.8

und 10.4, wo die Mehrheit der Wässer subthermalen Charakter aufweist (Figur 5.2). Die Durchlässigkeit in dieser Zone (Zirkulationen in zerklüfteten und verkarsteten Marmoren) muss gegenüber den umliegenden Zonen erhöht sein. Die Infiltration der Oberflächenwässer wird durch das System von E-W streichenden, subvertikalen Brüchen, welches in der Region der Alpe Veglia gut sichtbar ist, gefördert. Diese Brüche durchqueren den Tunnel in diesem Abschnitt (Figur 5.4). Die erhöhten Werte von Temperatur, Mineralisation, Tritium und schweren stabilen Isotopen der Wässer der Gruppe B stimmen ebenfalls gut überein mit der geologischen Umgebung, die hauptsächlich aus Kalkschiefern und schieferigen Kalken besteht und die wahrscheinlich keine raschen Zirkulationen in diesen Zonen zulässt.

Die Wässer zirkulieren in voneinander unabhängigen Kluftsystemen. Tatsächlich ist die Schüttung weder mit der Temperatur, der Mineralisation noch dem Tritiumgehalt korrelierbar. Die Bohrung F1 bestätigt die zellenartige Aufteilung des Aquifers: Aus dieser Bohrung treten ca. 60 l/min mit einer Temperatur von 45 °C in einem trockenen Abschnitt aus, ohne dass dadurch die umgebenden Quellen beeinflusst würden. Die Tritiumgehalte sind relativ gut mit der Temperatur und der Mineralisation positiv korrelierbar (Figur 5.3). Die langsamsten Zirkulationen, charakterisiert durch die höchsten Tritiumgehalte (> 35 TU), sind die wärmsten und am stärksten mineralisierten. Tatsächlich enthalten die Oberflächenwässer heute niedrige Tritiumgehalte zwischen 20 und 30 TU. Demgegenüber enthalten die in den 60er Jahren (hohe Tritiumgehalte in den Niederschlägen) infiltrierten Wässer mehr als 30 TU.

Das Einzugsgebiet dieser Wässer liegt vermutlich auf der Alpe Veglia (SCHARDT, 1903; HAYOZ & ZUBER, 1990). Die anhand der stabilen Isotope berechneten Infiltrationsknoten für das Wasser stimmen gut mit der Topographie der Alpe Veglia überein, die eine Mulde nordöstlich des Tunnels bildet. Auch zwischen den Isotopenwerten der Tunnelquellen und von mehreren Oberflächenwässern dieser Region zeigt sich eine gute Übereinstimmung (HAYOZ & ZUBER, 1990; BIANCHETTI, in Vorbereitung; Figur 4.3). Im vermuteten Einzugsgebiet kann man die aus Glimmerschiefern, Gneisen und Metakonglomeraten bestehenden Gesteine der Lebendun-Zone als undurchlässig betrachten (SCHARDT, 1910). Zwischen dem Tunnel und dem See von Avino, der



Figur 5.3: Korrelation zwischen Tritium, Temperatur und Mineralisation der Wässer der HE Veglia und Teggiolo (BIANCHETTI, in Vorbereitung). Mit Ausnahme der Quelle Q10, sind die ältesten Wässer (erhöhte Tritiumgehalte) am wärmsten und am stärksten mineralisiert. Bei einer Temperatur der Oberflächenwässer von 1 bis 2 °C, kann man deren Tritiumgehalt auf 23-25 TU extrapolieren. Dies entspricht den heute gemessenen Werten.

sich in solchen Gesteinen befindet, konnte keine hydraulische Verbindung festgestellt werden (SCHARDT, 1903).

Die Marmore, Dolomite und Gipse der Alpe Veglia erlauben die Infiltration der Oberflächenwässer. Die Zirkulationsgeschwindigkeiten sind in den Intersektionszonen zwischen den Brüchen der Alpe Veglia und den karbonatisch-evaporitischen Gesteinen (Entwicklung von Dolinen und Karstkanälen) vermutlich erhöht. Diese Strukturen findet man in den höheren Lagen der Alpe Veglia (Figur 5.4).

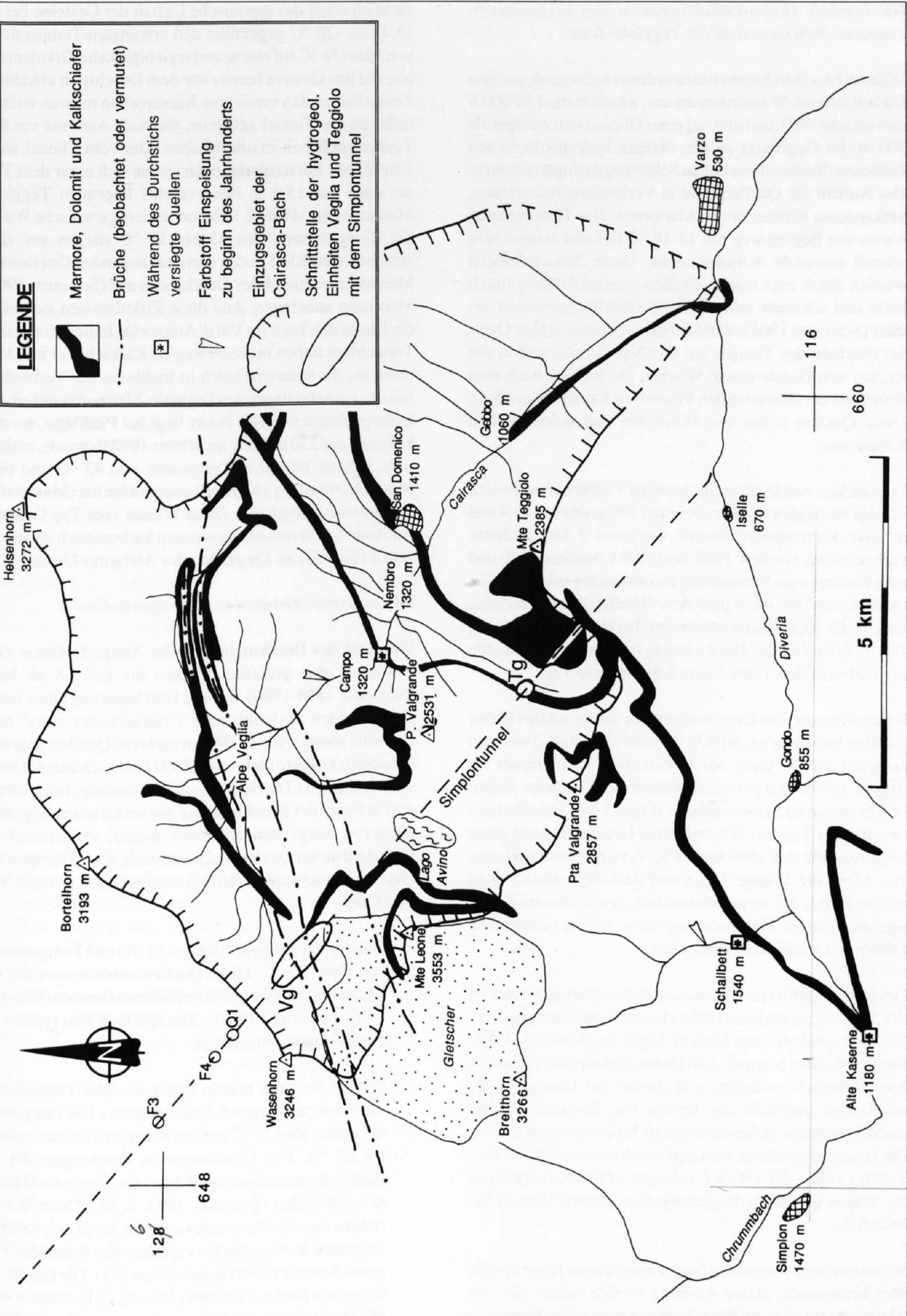
HE Lebendun (Zirkulationen in den Glimmerschiefern und Metakonglomeraten der Lebendun-Zone)

Während des Tunneldurchstichs wurde in der hauptsächlich aus Glimmerschiefern und Metakonglomeraten bestehenden Lebendun-Zone zwischen km 10.65 und 14.43 eine einzige grosse Quelle bei km 12.8 gefunden. Sie befindet sich in zerklüftetem Marmor (Figur 2.1). Die Schüttung von rund 1200 l/min nahm rasch ab und nach wenigen Monaten war die Quelle völlig versiegt (SCHARDT, 1898-1906). Bei der Durchquerung der Kalkschiefer, Dolomite und Anhydrite, welche vor den verkarsteten Marmoren der Teggiolo-Zone anstehen, wurden demgegenüber rund 20 Quellen mit einer Schüttung bis zu 250 l/min angetroffen, die rasch versiegten. Heute ist diese hydrogeologische Einheit praktisch völlig trocken.

Figur 5.4: Lage des Einzugsgebietes der Cairasca und des vermuteten Grundwassereinzugsgebietes der hydrogeologischen Einheiten Veglia, Teggiolo und Antigorio (BIANCHETTI, in Vorbereitung). Die karbonatischen und evaporitischen Gesteine (in Schwarz) und die Bruchzonen stellen bevorzugte Infiltrationswege der Oberflächenwässer dar.

LEGENDE

-  Marmore, Dolomit und Kalkschiefer
-  Brüche (beobachtet oder vermutet)
-  Während des Durchstichs versiegt Quellen
-  Farbstoff Einspeisung zu Beginn des Jahrhunderts
-  Einzugsgebiet der Cairasca-Bach
-  Schnittstelle der hydrogeol. Einheiten Veglia und Teggolo mit dem Simplontunnel



HE Teggiolo (Karst-Zirkulationen in den karbonatisch-evaporitischen Gesteinen der Teggiolo-Zone)

Während des Durchstichs traten in dieser hydrogeologischen Einheit enorme Wassermassen aus, nämlich rund 70'000 l/min im Jahr 1903, und dies auf einer Distanz von weniger als 100 m. Im Gegensatz zu den übrigen hydrogeologischen Einheiten, blieben diese hohen Schüttungsmengen erhalten. Der Austritt der Quellen steht in Verbindung mit offenen, verkarsteten Klüften in den Marmoren. Die Temperaturen waren von Beginn weg mit 11-18 °C tief und zeigten sehr schnell saisonale Schwankungen. Diese Schwankungen wurden durch eine rasche Grundwasserneubildung durch kalte und schwach mineralisierte Oberflächenwässer erklärt (SCHARDT, 1903). Tatsächlich versiegten einige Quellen oberhalb des Tunnels auf der Alpe Veglia und in der Region von Gondo einige Wochen bis Monate nach dem Anbohren der subthermalen Wässer im Tunnel (Figur 5.4). Diese Quellen traten aus Marmoren und dolomitischen Kalken aus.

Die Quellen von Campo auf der Alpe Veglia befanden sich in einer vertikalen Distanz von rund 700 m des km 15.4 und in einer horizontalen Distanz von rund 2 km. Mehrere Färbversuche wurden 1902 und 1903 durchgeführt und erlaubten es, eine Verbindung zwischen den subthermalen Quellen von km 15.4 und dem Wildbach der Cairasca, welche die Alpe Veglia entwässert, herzustellen (SCHARDT, 1903). Während des Hochwassers im Juni 1903 erreichte der Farbstoff den Tunnel innerhalb weniger Tage.

Heute schwankt die Gesamtschüttung dieser subthermalen Quellen zwischen ca. 40'000 l/min bei Niedrigwasser und mehr als 70'000 l/min bei Hochwasser (Hochwasser im August 1987). Die physiko-chemischen Parameter zeigen immer saisonale Schwankungen (Figur 3.10). Der Chemismus ist vom Typ Ca; SO₄, mit einer Gesamtmineralisation zwischen 900 und 1400 mg/l. Die Verweilzeiten sind zum Teil sehr kurz (einige Tage) und zum Teil relativ lange (einige Jahre). Sie weisen darauf hin, dass in diesem Karstaquifer mehrere Zirkulationssysteme mit verschiedenen Fließgeschwindigkeiten bestehen.

Das Einzugsgebiet der Cairasca, welches einen grossen Teil der Alpe Veglia umfasst, bildet ebenfalls das Einzugsgebiet der hydrogeologischen Einheit Teggiolo (SCHARDT, 1903; Figur 5.4). Zwei Marmor- und Dolomitbänder die senkrecht zum Wildbach verlaufen und diesen bei Campo (1320 müM) und unterhalb des Dorfes San Domenico (1280 müM) schneiden, stellen bevorzugte Infiltrationsstellen dar. Die Gehalte an stabilen Isotopen des Wassers ($\delta^{18}\text{O} = -12.8 \text{‰} \pm 0.1$; $\delta\text{D} = -91.1 \text{‰} \pm 1.4$) liegen sehr nahe denjenigen der Wässer aus der hydrogeologischen Einheit Veglia (Tabelle 5.2).

Schon vor dem Tunneldurchstich muss dieser Karstaquifer über bedeutende, aktive Austritte verfügt haben, dies im Gegensatz zu den anderen hydrogeologischen Einheiten des Simplonmassivs (BIANCHETTI, in Vorbereitung). Tat-

sächlich weist das thermische Defizit der Gesteine bei km 15.4 von -20 °C gegenüber den erwarteten Temperaturen von 36 bis 38 °C auf rasche und ergiebige, kalte Zirkulationen hin, die das Gestein bereits vor dem Durchstich abkühlten. Zusätzlich zu den versiegten Karstquellen müssen weitere, tiefer als der Tunnel gelegene, thermale Austritte vor dem Tunneldurchstich existiert haben. Die vom Tunnel angeschnittenen Karstzirkulationen setzen sich unter dem Tunnel nach km 15.4 in den verkehrt liegenden Teggiolo-Marmoren fort (Figur 2.1). Mineralisierte, artesische Wässer mit Temperaturen von 33 bis 35 °C stiegen aus einer subvertikalen Kluft in den darunter liegenden Gneisen und Marmoren während des Durchstichs auf (SCHARDT, 1903). Man kann annehmen, dass diese Zirkulationen sich bis in die Ebene des Toce im Val d'Antigorio (Italien) fortsetzen. Tatsächlich stehen in dieser Region Kalkschiefer und Marmore an, die wahrscheinlich in hydraulischer Verbindung mit den verkehrt liegenden Teggiolo-Marmoren stehen. Der hydrogeologisch tiefste Punkt liegt bei Piedilago, wo eine Bohrung auf 250 m Tiefe im Winter 1992 thermale, tritiumfreie Wässer mit einer Temperatur von 43 °C und einer Mineralisation von 1330 mg/l angetroffen hat (MARTINOTTI, persönliche Mitteilung). Diese Wässer vom Typ Calcium-Natrium-Sulfat entstammen einem karbonatisch-evaporitischen Horizont im Liegenden des Antigorio-Gneis.

HE Antigorio (Zirkulation im Antigorio-Gneis)

Während des Durchstichs war der Antigorio-Gneis zwar zerklüftet aber praktisch trocken bis km 3.8 ab Iselle (SCHARDT, 1898-1906). Bei der Durchquerung eines wenig durchlässigen Mylonitbandes ("micaschistes noirs" nach Schardt) wurden auf ca. 500 m mehrere Quellen angetroffen, deren Grösste mehr als 10'000 l/min schüttete (Quelle 11 S, Anhang 3). Die Schüttung ging allerdings rasch zurück und in Folge der Durchbohrung der verkarsteten Teggiolo-Marmore einige hundert Meter weiter, verschwand die Mehrzahl dieser Quellen nach und nach. Zwei Gruppen von Quellen konnten unterschieden werden (BIANCHETTI, in Vorbereitung):

- Wässer mit geringer Härte (< 25 °fr) und Temperaturen von unter 25 °C. Diese Quellen treten immer aus der Decke und fliessen in den zerklüfteten Gneisen (SCHARDT, 1902, 1905a und 1905b). Die Quelle 8 S ist typisch für diese Gruppe (Anhang 3).
- Wässer die unter hohem Druck aus dem Tunnelboden austreten (aufsteigende Zirkulationen). Die Temperaturen liegen über 25 °C und der Härtegrad ist stets grösser als 60 °fr. Der Chemismus ist demjenigen der am stärksten mineralisierten Wässer der Teggiolo-Marmore vergleichbar (SCHARDT, 1903, S. 53). Diese Wässer steigen aus der Tiefe auf, nachdem sie in den verkehrt liegenden, karbonatisch-evaporitischen Serien der Teggiolo-Zone zirkuliert haben (Figur 2.1). Die Quelle 9 S ist typisch für diese Gruppe (Anhang 3). Es können viele Mischungen mit den Wässern der ersten Gruppe beobachtet werden.

Die Quellen 8 S und 9 S existieren noch heute: nur wenige Meter voneinander getrennt, weisen sie verschiedene Charakteristiken auf. Die Quelle 60/Q13 (= 8 S) ist bloss 21 °C warm und weist eine elektrische Leitfähigkeit von 250-300 µS/cm auf. Es handelt sich um ein Wasser, das im Antigorio-Gneis fliesst. Die Quelle 59 (= 9 S) hingegen misst etwa 27 °C und weist eine elektrische Leitfähigkeit von 450-550 µS/cm auf. Diese Werte zeigen, dass sich noch heute zwei Wassertypen mischen.

Die Fliessgeschwindigkeiten sind relativ hoch, verbunden mit Verweilzeiten von ca. 10 Jahren. Die Gehalte an stabilen Isotopen sind mit denjenigen der Wässer der hydrogeologischen Einheit 5 vergleichbar. Das Einzugsgebiet befindet sich wahrscheinlich in den Gneishängen des Monte Teggiolo.

Durch den Bau des Tunnels wurden zahlreiche Spalten und Klüfte dräniert, so dass der hydraulische Druck dem atmosphärischen Druck angeglichen wurde. Hingegen haben die Bohrungen F1 und F3 unterhalb des Tunnelniveaus in zwei unterschiedlichen geologischen Einheiten mit unterschiedlicher Lithologie (Bündnerschiefer respektive Gneise) wasserführende Klüfte mit hydraulischen Drücken von mehreren (12 bis > 25 bar) angefahren. Diese Beobachtung bestärkt die Hypothese, wonach im Innern jeder hydrogeologischen Einheit nicht ein zusammenhängender Aquifer, sondern verzweigte, selbständig funktionierende Diskontinuitäten (Brüche, Schichtgrenzen) vorherrschen.

5.2 Geothermisches Potential

Verschiedene Möglichkeiten, das geothermische Potential des Simplonmassivs auszunutzen, wurden im Rahmen des Projektes für einen neuen Bahnhof in Brig studiert (KÄMPFEN, 1992). Die Bedürfnisse nach Heizung und Warmwasser in den Gebäuden und Depots könnten durch die Nutzung der geothermischen Energie abgedeckt werden. Die Energiebedürfnisse allein für die Bahnhofsgebäude wurden auf 815 kW berechnet. Mehrere Energiequellen geothermischen Ursprungs wurden bewertet und verglichen:

- **Nutzung des Wassers des nördlichen Kanals mittels Wärmepumpen.** Zwischen 1300 und 1450 l/min Wasser mit einer Temperatur von 12-14 °C werden heute von diesem Kanal gegen Brig geleitet, was einem thermischen Potential¹⁾ von 767 kWt entspricht. Eine Leistung von 1064 bis 1718 kW könnte je nach verwendetem Wärmepumpentyp genutzt werden (t = 8 °C). Die Hei-

zung des Bahnhofs aber auch der Depots könnte somit abgedeckt werden. Verglichen mit einer konventionellen Heizung mit Heizöl extra-leicht würde diese Installation zu einer jährlichen Verminderung der Emissionen von NOx um rund 1400 kg und von CO₂ um rund 350 kg führen. Mit einer Gas-Wärmepumpe wäre der Gestehtungspreis pro kWh (0.053 Fr./kWh) vergleichbar demjenigen einer Ölheizung. Das zur Verfügung stehende thermische Potential des südlichen Kanals beim Tunnelausgang in Iselle (Italien) beträgt rund 10 MWt (Schüttung = 50'000 l/min; Temperatur = 9 °C).

- **Fassung der warmen Wässer und Ableitung in isolierten Leitungen.** Einzig die Thermalquellen zwischen km 8.5 und 9.6 vor dem Tunnelscheitelpunkt würden genutzt. Die gesamte zur Verfügung stehende Schüttung würde also rund 250-300 l/min betragen, bei einer Temperatur von 31 °C am Nordportal. Dies entspricht einer Leistung von 533 kW, was zur Deckung der Energiebedürfnisse nicht ausreichen würde. Zusätzlich wären bedeutende Investitionen nötig (700 Fr./Laufmeter isolierte Leitung), was diese Lösung aus ökonomischer Sicht als ungünstig erscheinen lässt.
- **Ableitung der warmen Wässer aus der zentralen Tunnelpartie in den nördlichen Kanal.** Diese einfache und billige Lösung würde es erlauben, rund 1700 l/min Thermalwasser mit 23 °C in den nördlichen Kanal zu leiten. Der Gesamtabfluss am Nordportal würde also bei mindestens 3000 l/min mit einer mittleren Temperatur von 18 °C liegen. Damit könnte eine maximale Leistung von 4120 kW mittels Wärmepumpen genutzt werden (dt = 14 °C). Diese Lösung wäre aus wirtschaftlicher Sicht konkurrenzfähig. Da das abgeleitete Wasser aber auf italienischem Territorium austritt, müsste eine Konvention zwischen Italien und der Schweiz abgeschlossen werden.
- **Nutzung der Tunnelluft mit einer Wärmepumpe Wasser-Luft.** Die Lufttemperatur einige Kilometer im Tunnelinnern ist das ganze Jahr über stabil und erreicht 20-25 °C. Eine maximale Leistung von 2550 kW könnte ausgenutzt werden. Allerdings würde diese Lösung eine bedeutende Investition bedingen, was sie wirtschaftlich unrentabel macht.
- **Fassung der Thermalwässer der Veglia-Zone mittels einer Tiefbohrung.** Eine Vertikalbohrung, die zwischen km 8.5 und 9.03 (Grenze zu Italien) abgeteuft würde, könnte die wasserführenden Schichten der Veglia-Zone auf einer Tiefe zwischen 500 und 1000 m durchstossen. Die Wassertemperatur dürfte zwischen 60-80 °C liegen, je nach Tiefe der Bohrung. Für den Transport des Wassers nach Brig müsste eine isolierte Leitung erstellt werden. Falls die angetroffene Wassermenge hoch genug ist, könnten die hohen Investitionen für Bohrung und isolierte Leitung durch die billige Direktnutzung der Wärme mittels Wärmetauschern kompensiert werden.

¹⁾ Das theoretische thermische Potential (P) wurde nach folgender Formel berechnet (OFFICE FÉDÉRAL DE L'ÉNERGIE, 1992):

$$P = 6.97 \times 10^{-2} \times Q \times (T_q - T_r)$$

mit: P = theoretisches thermisches Potential (kWt)

Q = Schüttung (l/min)

T_q = Wassertemperatur (°C)

T_r = Rückgabtemperatur (°C), gemäss den Empfehlungen des Bundesamtes für Energiewirtschaft (BEW) auf 5 °C festgelegt.

- **Hot Dry Rock.** Diese Technik besteht darin, dass kaltes Wasser tief in ein zerklüftetes Gesteinsmassiv verpresst wird, wo es sich erwärmt und anschliessend zur Gewinnung von elektrischer oder thermischer Energie genutzt wird. Die Technologie ist noch relativ jung und wenig ausgereift. Bei den bisherigen Pilotprojekten ist es noch nicht gelungen alle Probleme in den Griff zu bekommen. Vor allem die kontrollierte, künstliche Zerklüftung des tiefliegenden Gesteins bereitet grosse Schwierigkeiten. Im Simplongebiet müsste eine Dublette in den Gneisen der Berisal-Zone oder der Monte Leone-Decke abgeteuft werden, welche als sehr gering durchlässig betrachtet werden können. Um zum Beispiel eine Fels-temperatur von 200 °C zu erreichen, müsste die Injektionsbohrung zwischen km 6 und 8 auf eine Tiefe von etwa 4000 m abgeteuft werden, unter der Annahme eines geothermischen Gradienten von 37 °C/km und einer Ausgangstemperatur von ungefähr 50 °C. Der produzierte Strom könnte direkt in die bereits im Tunnel verlaufende Hochspannungsleitung eingespeist werden. Die Investitionen wären sehr hoch: allein die Kaverne zur Installation des Bohrplatzes im Tunnel würde ca. 2,5 Mio. Fr. kosten, pro Bohrung müsste mit weiteren 4 Mio. Fr. gerechnet werden. Zusätzlich entstünden noch grosse Kosten bei der künstlichen Zerklüftung des Gesteins und dem Erstellen der Kraftwerkszentrale. Die Kosten und die technologischen Unsicherheiten lassen diese Lösung zur Zeit als kaum realisierbar erscheinen.

Ausserhalb des Tunnels liegen die Zonen, welche als besonders günstig für geothermische Untersuchungen erscheinen, in Italien, in den Regionen Premia-Piedilago und Iselle. Das Abteufen von Tiefbohrungen auf über 500 m Tiefe würde es erlauben, die thermalen Karstzirkulationen der verkehrt liegenden Teggiolo-Zone zu durchstossen. Die Wassertemperaturen können zwischen 35 °C (Iselle) und 50 °C (Premia-Piedilago) geschätzt werden. Die ausbeutbare Wassermenge könnte mehrere Tausend l/min überschreiten. Eine 250 m tiefe Forschungsbohrung wurde Ende 1992 bei Piedilago abgeteuft (MARTINOTTI, persönliche Mitteilung). Ein Pumpversuch zeigte ein bedeutendes Potential auf: Bei einer Absenkung von weniger als 2 m können 300 l/min mit 43 °C genutzt werden. Eine auf der anomal hohen Temperatur des Oberflächenaquifers in dieser Region basierende erste Abschätzung ergibt, dass ein Thermalwasservorkommen von rund 10'000 l/min bei 50 °C vorliegt.

Die Gemeinden Brig und Naters liegen am Rand der vom Tunnel durchstossenen geologischen Einheiten. Trotzdem würde eine in dieser Gegend abgeteuft Tiefbohrung vermutlich ebenfalls einen erhöhten geothermischen Gradienten antreffen. Die Durchlässigkeit der erbohrten Gesteine, der Gneise des Aarmassivs, dürfte aber gering sein.

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND VORSCHLÄGE

Die vorliegende geothermische und hydrogeologische Studie des Simplonmassivs während der Periode 1988-1992 hat folgende Resultate ergeben:

- Das Simplonmassiv ist ein "warmes Gebirge", charakterisiert durch erhöhte geothermische Gradienten (30-40 °C/km). Der mutmassliche Grund für diese thermische Anomalie ist die schnelle Hebung des Gebirges und die anschliessende Erosion, die sich im Zeitraum Pliocän-Quartär ereigneten und noch heute andauern (CLARK & JÄGER, 1969; GEOTERMICA ITALIANA, 1989; HUNZIKER et al., 1990). Die hohe Geschwindigkeit dieser Vorgänge hat noch keine vollständige Wiederherstellung des thermischen Gleichgewichts des Gesteins erlaubt. Der geothermische Gradient variiert zwischen 28 und 40 °C/km (NIETHAMMER, 1910; CLARK & NIBLETT, 1956; PAHUD et al., 1993, Bohrung F2). Die von NIETHAMMER (1910) berechneten Gradienten (37 °C/km) müssen aufgrund der vorliegenden, abkühlenden Wasserzirkulationen und der lateralen Wärmeverluste als minimale Werte angesehen werden. Die in den Bohrungen F2 und F4 angetroffenen Gradienten von > 50 °C/km müssen hingegen wegen ungenügender Bohrtiefe mit der nötigen Vorsicht aufgenommen werden, da die Abkühlungszone nicht vollständig durchquert wurde. Die infiltrierten Wässer erwärmen sich beim Durchfliessen des warmen Gesteins und erniedrigen regional die Felstemperatur. Die Abkühlung des Gesteins wurde noch verstärkt durch die in Folge des Tunnelbaus erhöhten Zirkulationsgeschwindigkeiten.
- Die Luftzirkulation im Eisenbahntunnel führte zu einer radialen Abkühlung des Gesteins in einer Zone von ca. 250 m rund um den Tunnel. In grösserer Distanz findet man wieder die ursprünglichen, während des Tunnelbaus angetroffenen Temperaturen von über 55 °C.
- Die Durchlässigkeit des schiefrigen Kristallins, der Tonschiefer und Glimmerschiefer ist gering und die Verweilzeiten in diesen Gesteinen sind sehr lange, wie die Abwesenheit des Tritiums zeigt. Die Zirkulationen in den karbonatisch-evaporitischen Gesteinen sind demgegenüber ziemlich schnell, mit einer Verweildauer von 1 bis 30 Jahren. In den verkarsteten Marmoren sind die Verweilzeiten sogar sehr kurz, erreichen die Fließgeschwindigkeiten hier doch bis zu 100 Meter pro Stunde.

- Der Tunnel dräniert das Gebirge nicht vollständig. Die Bohrungen F1 und F3 haben gezeigt, dass die Aquifere aus Kluftsystemen bestehen, die unabhängige Wasserzirkulationen aufweisen. Es bestehen somit gute Chancen, mittels Bohrungen weitere Thermalwässer in zum Teil grossen Mengen zu erschliessen.
- Der Chemismus der Wässer wird stark durch die durchströmten Gesteine bestimmt. Er kann sich in Abhängigkeit von Verweilzeit und Aquifertemperatur entwickeln. Die drei beobachteten geochemischen Familien, Calcium-Sulfat-, Natrium-Sulfat- und Calcium-Bikarbonat-Wässer, stammen jeweils aus unterschiedlichen geologischen Formationen, wie karbonatisch-evaporitischen oder kristallinen Gesteinen.
- Das mutmassliche Einzugsgebiet der karbonatisch-evaporitischen Aquifere befindet sich in der Region der Alpe Veglia (Italien), wo diese Gesteine anstehen. Es wird durch das Einzugsgebiet des Wildbaches Cairasca repräsentiert. Diese bereits zu Jahrhundertbeginn von Schardt aufgestellte Hypothese wird durch die Übereinstimmung zwischen den stabilen Isotopen der Oberflächenwässer dieser Region und den aus diesen Aquiferen stammenden Thermalwässern bestätigt. Zerklüftete und verkarstete Zonen erleichtern die Infiltration der Oberflächenwässer und die Zirkulationen in den Gesteinen. Der Fliessweg zum Tunnel ist in den stark zerklüfteten und/oder verkarsteten Zonen (Bruchzone von Veglia, Teggiolo-Karst) subvertikal und ziemlich direkt. Die langsameren Zirkulationen fliessen demgegenüber weniger direkt und folgen lithologischen Kontrasten zwischen den Schichten.

Programm der zukünftigen Untersuchungen und Nutzung des geothermischen Potentials.

Die vorliegende Studie, die im Rahmen des Programms GEOTHERMOVAL realisiert wurde, zeigt wie wichtig lange Messreihen nicht nur räumlicher (komplettes Profil des Tunnels), sondern vor allem zeitlicher Art sind, um die tiefreichenden Wasserzirkulationen im Simplongebirge zu erfassen. Das Fehlen von Messungen während ca. 80 Jahren verhindert Aussagen über das vorherrschende Regime. Auch wenn entsprechende Hinweise vorliegen, kann man nicht mit voller Sicherheit von einer Stabilisierung der physikalischen Parameter ausgehen.

Die Gefahr besteht, dass nach Abschluss des Programms GEOTHERMOVAL wiederum eine längere Messlücke entsteht, bis das Interesse an den tiefgreifenden Zirkulationen im Simplongebirge erneut entsteht. Im Hinblick auf einen neuen Simplonbasistunnel ist es aber wichtig diese Messungen in einem regelmässigen Rhythmus weiterzuführen. Im folgenden sind die minimalen Anforderungen an die weiteren Beobachtungen der physikalischen und chemischen Charakteristiken des Gebirgswassers sowie der Felstemperatur aufgezählt:

Dauer der Beobachtungen	Unbegrenzt
Frequenz der Beobachtungen	Alle Jahre während März und April (Tiefstand der Oberflächenwässer).
Beobachtungspunkte	Quellen Q0, Q1, Q5, Q9, Q12 und Q13; Bohrungen F1, F3 und F4.
Messungen	Schüttung, Temperatur, pH, Eh, elektrische Leitfähigkeit, O ₂ gelöst.
Analysen	Komplette chemische Analysen (Haupt- und Nebenelemente sowie Spuren). Isotopische Analysen (Sauerstoff-18, Deuterium, Tritium).
Totale Schüttung	Permanente Messungen der Kanalabflüsse im Norden wie im Süden.
Felstemperaturen	Ablesungen an den 12 kurzen, horizontalen Temperaturfühlern (10 m). Thermische Profile in den Bohrungen F1, F2, F3 und F4.

Die wohl einfachste und in naher Zukunft realisierbare Nutzung des im Simplontunnel vorliegenden geothermischen Energiepotentials liegt in der Installation einer Wärmepumpe Wasser/Wasser unter Ausbeutung des nach Norden dränierten Bergwassers. Bohrungen könnten direkt im Tunnel abgeteuft werden. Zwischen km 7 und 11 erreichen die Felstemperaturen in 200 m Tiefe wahrscheinlich zwischen 45 und 55 °C. Die Durchbohrung der wasserführenden Schichten der Veglia-Zone mit 200 bis 1000 m tiefen Bohrungen würde es erlauben, warme, artesische Wässer mit Temperaturen, die je nach Bohrtiefe zwischen 45 und 80 °C liegen würden, zu fassen. Auf lange Sicht ist ein Hot Dry Rock-Projekt (HDR) in Erwägung zu ziehen, was eine Tiefbohrung in den Kern des Simplongebietes verlangt. Diese noch nicht ausgereifte Technologie ist zur Zeit noch unwirtschaftlich, könnte aber in Zukunft ein wichtiges Energiepotential erschliessen.

LITERATURVERZEICHNIS

- BEARTH, P. (1956): Zur Geologie der Wurzelzone östlich des Ossolates. *Eclogae geol. Helv.*, 49/2, 267-278.
- (1973): Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000, Blatt 61 Simplon und Erläuterungen. *Landeshydrologie und -geologie*.
- BIANCHETTI, G. (in Vorbereitung): Circulations profondes dans les Alpes : hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de la Haute Vallée du Rhône (Valais, Suisse). *Projet du FNRS N° 21-26632.89 et 20-31186.91*, thèse de doctorat, CRSFA-CHYN.
- BORTOLAMI, G.C., RICCI, B., SUZELLA, G.F. & ZUPPI, G.M. (1979): Isotope hydrology of the Val Corsaglia, Maritime Alps, Piemont, Italy. In *Isotope Hydrology*. I.A.E.A., Vienna, 327-350.
- BRANDAU, K. (1910): Das Problem des Baus langer, tiefliegender Alpentunnel und die Erfahrungen beim Bau des Simplontunnels. *Rascher & Cie, Zürich*.
- BURRI, M. (1979): Les formations valaisannes dans la région de Visp. *Eclogae geol. Helv.* 72, 789-802.
- BURRI, M., FRANK, E., JEANBOURQUIN, P., LABHART, P., LISKAY, N. & STRECKEISEN, A. (1993): Geologischer Atlas des Schweiz 1:25'000, Blatt 93 Brig und Erläuterungen. *Landeshydrologie und -geologie*.
- CLARK, S.P. & NIBLETT, E.R. (1956): Terrestrial heat flow in the Swiss Alps. *Monthly notices of the Royal Astronomical Society. Geophys. Suppl.*, 7/4, 176-195.
- CLARK, S.P. & JÄGER, E. (1969): Denudation rate in the Alps from geochronologic and heat flow data. *Amer. J. Sci.* 267, 1143-1160.
- CRSFA (1988): Termes de référence concernant la recherche, l'évaluation et la mise en valeur des ressources géothermiques en Valais. *Bericht CRSFA/88.08*, Sion, 35 S., nicht publiziert.
- (1989): Programm GEOTHERMOVAL: Region Simplon, Zwischenbericht. *Bericht CRSFA/89.22*, Sion, 30 S., nicht publiziert.
- (1992): Programm GEOTHERMOVAL, Erforschung und Auswertung der geothermischen Ressourcen im Kanton Wallis: Simplon (Brig - Naters), Schlussbericht der Phase I. *Bericht CRSFA/92.08*, Sion, 52 S., nicht publiziert.
- DUBOIS, J.D. (1992): Typologie des aquifères du cristallin: Exemples des Massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges (Suisse, France, Italie). *Thèse Ecole polytechnique fédérale Lausanne*, N° 950, 324 S.
- GEOTERMICA ITALIANA (1989): Valutazione delle potenziale geotermiche della zona dell'Ossola (Alpi occidentali). *Relazione finale*. *Bericht*, 41 S., nicht publiziert.
- GERLACH, H. (1869): Die Penninischen Alpen. *Beitr. Geol. Schweiz. N. Denkschr. schweiz. Ges. Natw.* 23.
- GUDEFIN, H. (1967): Observations sur les venues d'eau au cours du percement du tunnel du Mont-Blanc. *Bull. BRGM*, 4, 96-107.
- HAYOZ, P. & ZUBER, F. (1990): Das Simplonmassiv: Hydrogeologische Untersuchungen der unterirdischen thermalen Wasserzirkulationen und ihrer Zusammenhänge mit dem Eisenbahntunnel. *Dipl. spécial. hydrogéologie*, Université de Neuchâtel, CHYN-CRSFA, 127 S., nicht publiziert.
- HUNZIKER, J.C. & BEARTH, P. (1969): Rb-Sr Altersbestimmungen aus den Walliser Alpen. Biotitalterswerte und ihre Bedeutung für die Abkühlungsgeschichte der alpinen Metamorphose. *Eclogae geol. Helv.* 62/1, 205-222.
- HUNZIKER, J.C., MARTINOTTI, G., MARINI, L. & PRINCIPE, C. (1990): The waters of the Simplontunnel (Swiss-Italian Alps) and of the adjacent Ossola district (Italy): geothermal considerations. *Geothermal Resources Council Transactions* 14/1, 1477-1482.
- HURFORD, J. (1986): Cooling and uplift patterns in the Lepontine Alps South Central Switzerland and an age of vertical movement on the Insubric fault line. *Contr. Mineral. Petrol.* 92, 413-427.
- JACQUIER, M. (1905): *Rapport sur les travaux du tunnel du Simplon*. Bernard Imprimeur-Editeur, Paris.
- JAMIER, D. (1975): Etude de la fissuration, de l'hydrogéologie et de la géochimie des eaux profondes des massifs de l'Arpille et du Mont Blanc. *Thèse Université Neuchâtel*, 153 S., nicht publiziert.
- JEANBOURQUIN, P. & BURRI, M. (1989): La Zone de Sion-Courmayeur dans la région du Simplon. *Landeshydrologie und -geologie, Geologischer Bericht*, 11.
- KÄMPFEN, E. (1992): Nutzung des geothermischen Energiepotentials im Simplontunnel. *Diplomarb. in Energie*, EPFL-CRSFA, 61 S., nicht publiziert.
- MANDIA, Y. (1991): Typologie des aquifères évaporitiques du Trias dans le bassin lémanique du Rhône (Alpes occidentales). *Thèse Ecole polytechnique fédérale Lausanne*, N°948, 345 S.
- MANCKTELOW, N.S. (1985): The Simplon Line: a major displacement zone in the western Lepontine Alps. *Eclogae geol. Helv.* 78, 73-96.
- (1990): The Simplon fault zone. *Beitr. geol. Karte Schweiz (N.F.)* 163.
- MILNES, A.G. (1973): Structural reinterpretation of the classic Simplon tunnel section of the central Alps. *Bull. geol. Soc. Amer.* 84, 269-274.

- NIETHAMMER, G. (1910): Die Wärmeverteilung im Simplon. *Eclogae geol. Helv.* 11, 96-120.
- OFFICE FÉDÉRAL DE L'ÉNERGIE (1992): Avant-projet d'installation de géothermie en Suisse. Aspects techniques et financiers. Commission féd. pour la mise en valeur de l'énergie géothermique et du stockage souterrain de la chaleur. Nicht publiziert.
- PAHUD, D. (1989): Stockage souterrain de chaleur: calculs de diffusion, mesures et comparaisons. Dipl. Univ. de Genève, GAP. Nicht publiziert.
- PAHUD, D., VUATAZ, F.D. & BIANCHETTI, G. (1993): Refroidissement de la roche dans le tunnel du Simplon. Modélisation par calcul analytique. *Ingénieurs et architectes suisses* 25, 490-498.
- PRESSEL, K. (1906): Bauarbeiten am Simplontunnel. Rascher & Cie., Zürich
- (1928): Experimentelle Methode der Vorausbestimmung der Gesteinstemperatur im Innern eines Gesteinsmassivs. Oldenburg Verlag München/Berlin.
- RODGERS, J. & BEARTH, P. (1960): Zum Problem der Lebendundecke. *Eclogae geol. Helv.* 53, 170-178.
- SCHARDT, H. (1898-1906): Rapports trimestriels au Conseil Fédéral Suisse sur l'état des travaux du percement du Simplon. Corbaz & Cie, Lausanne.
- (1902): Rapport sur les venues d'eau rencontrées dans le tunnel du Simplon du côté d'Iselle. Corbaz & Cie, Lausanne.
- (1903): Note sur le profil géologique et la tectonique du Massif du Simplon, suivi d'un rapport supplémentaire sur les venues d'eau rencontrées dans le tunnel du Simplon du côté d'Iselle. Corbaz & Cie, Lausanne.
- (1904): Die wissenschaftlichen Ergebnisse des Simplon-durchstichs. Vortrag gehalten an der 87. Jahresversammlung der Schweiz. naturforsch. Ges., Winterthur.
- (1905a): Les eaux souterraines du tunnel du Simplon. *La Géographie* XI/2, 81-96.
- (1905b): Percement du tunnel du Simplon. Géologie, hydrologie, thermique. *Bull. techn. de la Suisse Romande.*
- (1914): Die geothermischen Verhältnisse des Simplongebirges in der Zone des grossen Tunnels. *Festschrift der Dozent. Univ. Zürich.*
- SCHMIDT, C. & PREISWERK, H. (1908): Geol. Karte der Simplongruppe, Spezialkarte Nr. 48 mit Erläuterungen.
- SPRING, L., REYMOND, B., MASSON, H. & STECK, A. (1992): La nappe du Lebendun entre Alte Kaserne et le Val Cairasca (massif du Simplon): nouvelles observations et interprétations. *Eclogae geol. Helv.* 85/1, 85-104.
- STECK, A., RAMSAY, J.G., MILNES, A.G. & BURRI, M. (1979): Compte-rendu de l'excursion de la Société géologique Suisse en Valais et en Italie du nord du 2 au 5 oct. 1978. (Aarmassiv-Belalp; Nufenenpass-Griessee; entlang der Simplonstrasse, Visp-Visperterminen). *Eclogae geol. Helv.* 72/1, 287-311.
- STECK, A. (1987): Le massif du Simplon. Réflexions sur la cinématique des nappes de gneiss. *Schweiz. mineral. petrogr. Mitt.* 67, 27-45.
- VUATAZ, F.-D. (1982): Hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de Suisse et des régions alpines limitrophes. *Matér. Géol. Suisse, sér. Hydrol.*, 29, Kümmerly & Frey, Berne, 174 S.
- ZUBER, F. (1990): Etude des venues d'eau subthermales et thermales dans le tunnel du Simplon (Valais, Suisse). *Mém. 22nd Congress IAH 1990, vol. XXII, Lausanne, 645-653.*

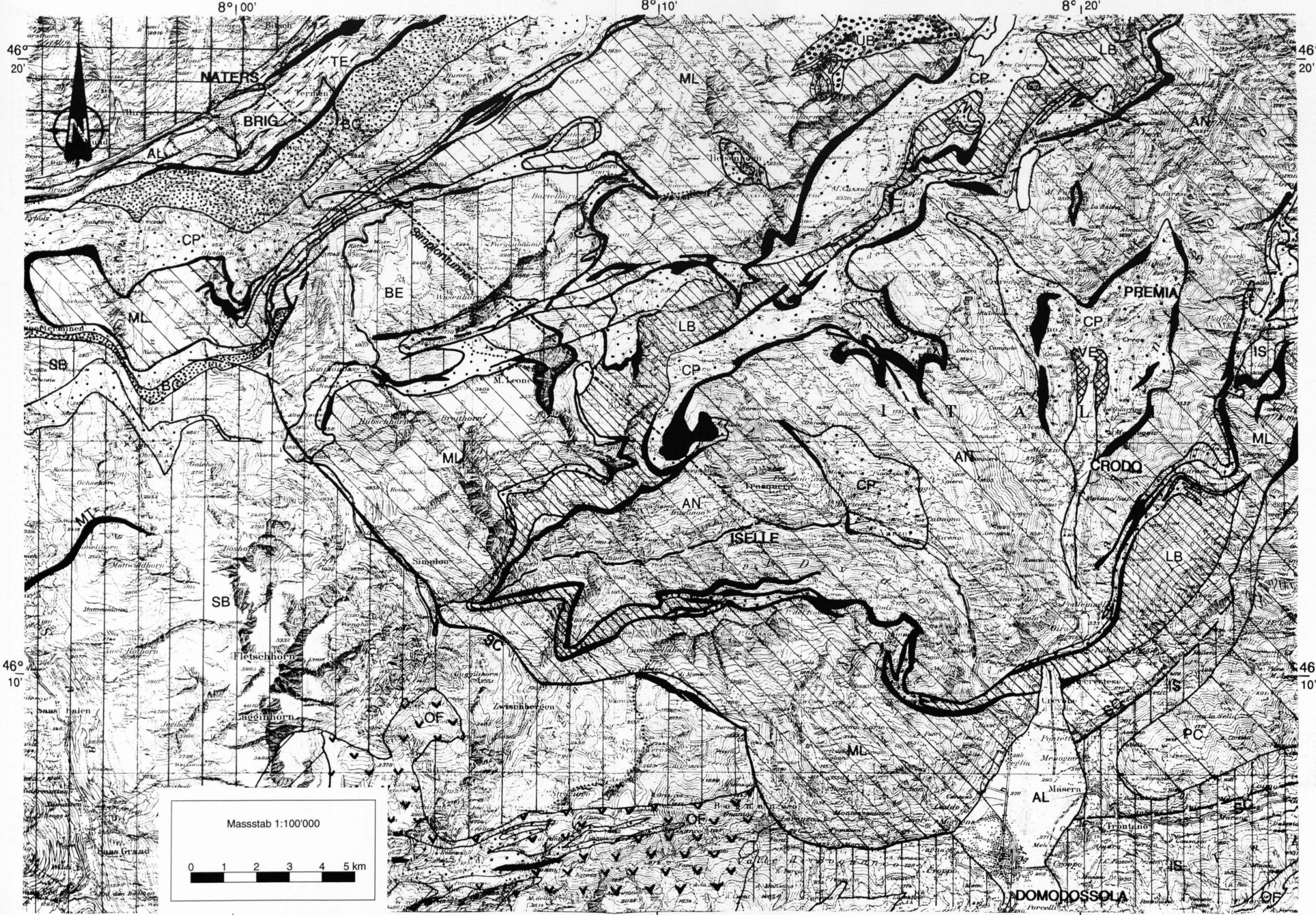
CENTRE DE RECHERCHES SCIENTIFIQUES FONDAMENTALES ET APPLIQUEES DE SION

PROGRAMM GEOTHERMOVAL
PHASE I (1988 - 1991)

STRUKTURGEOLOGISCHE KARTE VON SIMPLON UND VAL D'OSSOLA

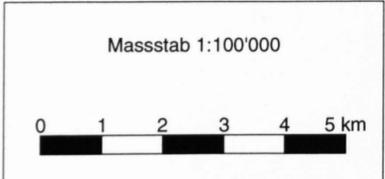
(nach GEOTERMICA ITALIANA 1989)

CRSFA/jdd 1992



LEGENDE:

- | | |
|------------------------------|---|
| AL | QUARTÄR
Alluviale Talfüllung |
| MESOZOISCHE BEDECKUNG | |
| BC | ZONE BRIG-SION-COURMAYEUR
Kalk- und Glimmerschiefer mit Marmor- und Metabasithorizonten |
| CP | Ober- und untere penninische Einheiten |
| MT | Hauptthorizonte des triadischen Marmors |
| OF | OPHIOLITHE
Serpentinite und Metabasite |
| PRÄTRIADISCHER SOCKEL | |
| MR | MONTE ROSA-DECKE
Metagranite, Gneise und Schiefer mit Marmor- und Metabasithorizonten |
| SB | GROSSER ST. BERN HARD (SB) - BERISAL (BE) -DECKE
Gneise und Schiefer mit Marmor- und Metabasithorizonten |
| BE | |
| IS | ISORNO - ISOLINA-EINHEIT
Gneise und Schiefer mit Marmor- und Metabasithorizonten |
| ML | MONTE LEONE-DECKE
Gneise und Glimmerschiefer |
| UB | |
| LB | LEBENDUN-DECKE
Gneise, Schiefer, Metakonglomerate und Marmorhorizonte |
| AN | ANTIGORIO (AN) - PIODA DI CRANA (PC) -DECKE
Überwiegend granitische Gneise und Schiefer |
| PC | |
| VE | VERAMPIO-EINHEIT
Granitische Gneise |
| MESOZOISCHE BEDECKUNG | |
| TE | ZONE VON TERMEN
Parautochthone, permo-jurassische Sedimente: Bündnerschiefer |
| MT | Triadische Marmorhorizonte |
| PRÄTRIADISCHER SOCKEL | |
| AR | AAR-MASSIV
Herzynisches Kristallinmassiv: Gneise |
| SC | TEKTONISCHE LINIE
Sempione - Centovalli Linie |



Kilometrierung nach Schardt		Abschnitt	Km ab		Länge (m)	Lithologie nach SCHARDT (1898-1906)	Zone oder Decke
von	bis		Nordportal von	bis			
0.000	0.677	Nord	0.026	0.703	677	Schistes argilo-calcaires riches en séricite, gris	ZTm
0.677	0.715	Nord	0.703	0.741	38	Gypses, anhydrites et dolomies plaquetées	ZTm
0.715	1.236	Nord	0.741	1.262	521	Schistes argilo-calcaires riches en séricite, gris	ZTm
1.236	1.443	Nord	1.262	1.469	207	Gypses et anhydrite grêue avec lits de dolomie	ZTm
1.443	1.501	Nord	1.469	1.527	58	Schistes argilo-calcaires riches en séricite, gris	ZTm
1.501	1.530	Nord	1.527	1.556	29	Anhydrite grêue	ZTm
1.530	3.843	Nord	1.556	3.869	2313	Schistes argilo-calcaires riches en séricite, gris	ZSC + NML
3.843	3.891	Nord	3.869	3.917	48	Calcaire dolomitique	NML
3.891	3.900	Nord	3.917	3.926	9	Schistes argilo-calcaires riches en séricite, gris	NML
3.900	3.901	Nord	3.926	3.927	1	Gneiss oëllé	NML
3.901	3.910	Nord	3.927	3.936	9	Calcaire dolomitique très fracturé ("cornieule")	NML
3.910	3.913	Nord	3.936	3.939	3	Dolomite plaquetée	NML
3.913	3.993	Nord	3.939	4.019	80	Gneiss schisteux	NML
3.993	4.050	Nord	4.019	4.076	57	Dolomie plaquetée et calcaire dolomitique	NML
4.050	4.080	Nord	4.076	4.106	30	Calcaire grênu, schiste gris-foncé et dolomite	NML
4.080	4.410	Nord	4.106	4.436	330	Gneiss schisteux	NML
4.410	4.693	Nord	4.436	4.719	283	Calcaire siliceux	ZSC
4.693	5.000	Nord	4.719	5.026	307	Alternance de micaschistes variées	ZSC
5.000	5.335	Nord	5.026	5.361	335	Gneiss à grenats et micaschistes	ZHo
5.335	5.548	Nord	5.361	5.574	213	Schiste micacé sans grenats	ZSC
5.548	5.733	Nord	5.574	5.759	185	Gneiss à faibles intercalations d'amphibolite	ZBe
5.733	7.247	Nord	5.759	7.273	1514	Gneiss schisteux + micaschiste avec intercalations amphibol.	ZBe
7.247	7.252	Nord	7.273	7.278	5	Schiste chloriteux à grenats + schiste calcaire	ZBe
7.252	8.145	Nord	7.278	8.171	893	Gneiss laminé à veinules d'anhydrite violacée et grenats	ZBe
8.145	8.185	Nord	8.171	8.211	40	Marbre blanc, schiste micacé très calc. et micaschiste blanc	ZSC
8.185	8.290	Nord	8.211	8.316	105	Micaschistes à faible teneur de quartz	ZSC
8.290	8.566	Nord	8.316	8.592	276	Micaschiste tendre à veinules d'anhydrite	ZSC
8.566	8.587	Nord	8.592	8.613	21	Quartzite calcarifère	ZSC
8.587	8.768	Nord	8.613	8.794	181	Gneiss à grenats	NML
8.768	8.787	Nord	8.794	8.813	19	Micaschiste tendre à veinules d'anhydrite	NML
8.787	9.269	Nord	8.813	9.295	482	Gneiss schisteux alternant avec micaschiste à grenats	NML
9.269	9.399	Nord	9.295	9.425	130	Micaschistes à faible teneur de quartz, avec grenats	NML ?
9.399	9.627	Nord	9.425	9.653	228	Calcaire dolom. alternant avec dolomite et lentilles d'anhydrite	ZVg
9.627	9.680	Nord	9.653	9.706	53	Alternance de calcaire stratifié, schistes calc. et bancs dolom.	ZVg
9.680	9.850	Nord	9.706	9.876	170	Schistes calcaires micacés	ZVg
9.850	10.378	Nord	9.876	10.404	528	Marbre saccharoïde et calcaire siliceux gris	ZVg
9.11	9.353	Süd	10.404	10.647	243	Calcaire grênu micacé, lité ou schisteux, fissuré	ZVg
7.16	9.11	Süd	10.647	12.597	1950	Schistes micacés à grenats, par endroits calcarifères	ZLe
7.11	7.16	Süd	12.597	12.647	50	Schistes micacés calcaires gris ou gris-blanc	ZLe
6.862	7.11	Süd	12.647	12.895	248	Marbre cipolin	ZLe
6.83	6.862	Süd	12.895	12.927	32	Schistes micacés calcaires	ZLe
5.325	6.83	Süd	12.927	14.432	1505	Gneiss feuilletés et micaschistes à galets ("pseudo-conglom.")	ZLe
4.94	5.325	Süd	14.432	14.817	385	Schiste calcaire foncé à lits calcaires	ZLe
4.786	4.94	Süd	14.817	14.971	154	Schiste calcaire micacé à veines d'anhydrite	ZLe ?
4.61	4.786	Süd	14.971	15.147	176	Anhydrite blanche, grossièrement grêue, avec zones dolomit.	ZLe ?
4.461	4.61	Süd	15.147	15.296	149	Schiste calcaire micacé avec lits d'anhydrite et dolomie	ZLe ?
4.419	4.461	Süd	15.296	15.338	42	Schiste calcaire micacé, tendre, broyé	ZLe ?
4.325	4.419	Süd	15.338	15.432	94	Marbre blanc à grisâtre, micacé, lité	ZTg
3.85	4.325	Süd	15.432	15.907	475	Gneiss "granitoïde" fissuré	NAn
3.83	3.85	Süd	15.907	15.927	20	Mylonite ("micaschiste noir")	NAn
3.553	3.83	Süd	15.927	16.204	277	Gneiss "granitoïde" fissuré	NAn
3.545	3.553	Süd	16.204	16.212	8	Mylonite ("micaschiste noir")	NAn
0	3.545	Süd	16.212	19.757	3545	Gneiss "granitoïde", compact ou schisteux	NAn

ZTm Termen-Zone

ZSC Sion-Courmayeur-Zone

NML Monte Leone-Decke

ZHo Zone Houillière

ZBe Berisal-Zone

ZVg Veglia-Zone

ZLe Lebendun-Zone

ZTg Teggiolo-Zone

NAn Antigorio-Decke

HE Sion-Courmayeur (linker Tunnel)

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)
22.09.1898	1 N	0,085-179 N		0.111	147.282	1500	11.1		37	Relation avec la source "Rati", qui a tari
30.10.1898	2 N	0,160-179 N	1 bis	0.186	147.357	3000				
30.12.1898			5			1800	11.5			
? .02.1899	3 N	0.677 N		0.703	147.874	24	16.2			Contact du gypse
? .02.1899	4 N	0.799 N		0.825	147.996	18	16.4			Plafond
? .12.1899	5 N	2.251 N		2.277	149.448	3	21.2			Fente au plafond
? .12.1899	8 N	2.260 N		2.286	149.457	10	21.4			Fente au plafond
? .12.1899	10 N	2.270 N		2.296	149.467	3	21.6			Fente au plafond
? .02.1900	11 N	2.443 N	6	2.469	149.640	20	22.2			Faillie
? .02.1900	14 N	2.445 N		2.471	149.642	10	22.6			Faillie
? .02.1900	15 N	2.446 N		2.472	149.643	6	22.6			
? .02.1900	16 N	2.468 N	7	2.494	149.665	100	23.8			Parois SW, de bas en haut
? .02.1900	18 N	2.476 N		2.502	149.673	450	21.2			Parois NE, en haut
? .02.1900	20 N	2.484 N		2.510	149.681	3	22.0			Faillie, parois SW
? .02.1900	21 N	2.542 N		2.568	149.739	40	22.7			Faillie, parois SW
? .02.1900	22 N	2.556 N		2.582	149.753	50	22.6			Plafond
? .02.1900	24 N	2.563 N		2.589	149.760	5	22.7			Plafond
? .02.1900	25 N	2.592 N		2.618	149.789	3	22.8			Plafond, côté SW
? .03.1900	26 N	2.677 N		2.703	149.874	30	23.2			Fissure, parois NE
? .03.1900	27 N	2.725 N		2.751	149.922	5	24.0			Fissure, parois SW
? .03.1900	28 N	2.774 N		2.800	149.971	5	24.9			Plafond, côté NE
? .04.1900	29 N	2.822 N		2.848	150.019	6	25.4			Plafond
? .04.1900	30 N	2.855 N		2.881	150.052	6	24.6			Plafond
? .04.1900	31 N	2.886 N		2.912	150.083	35	25.6			Plafond, 2 sources
? .04.1900	32 N	2,888-890 N		2.914	150.085	85	26.8			Plafond, 3 sources
? .04.1900	33 N	2.937 N		2.963	150.134	300	25.4			Parois SW
? .04.1900	34 N	2.954 N	9-10	2.980	150.151	2	25.5			Parois SW
? .04.1900	35 N	2.965 N		2.991	150.162	20	25.8			Parois SW
? .04.1900	36 N	2.966 N		2.992	150.163	25	25.5			Parois SW
? .04.1900	37 N	2.968 N		2.994	150.165	150	25.6			Plafond
? .05.1900	38 N	2,972-982 N		2.998	150.169	2000	25.0			Nombreuses sources, plafond et parois
30.06.1900						<1000				Le débit a diminué de plus de moitié
? .05.1900	39 N	2.978 N		3.004	150.175	15	25.1			Plafond
? .05.1900	40 N	2.991 N	11	3.017	150.188	15	25.2			Plafond, 2 sources
? .05.1900	41 N	2.993 N	12	3.019	150.190	5	25.1			Plafond
? .05.1900	42 N	2.995 N	13	3.021	150.192	50	25.1			Plafond, nombreuses sources
? .07.1900	43 N	3.294 N		3.320	150.491	5	28.0			Plafond, côté SW
? .07.1900	44 N	3,332-340 N		3.358	150.529	?				Infiltrations
? .08.1900	45 N	3.405 N		3.431	150.602	25	29.3			Parois SW
? .08.1900	46 N	3.527 N		3.553	150.724	3	29.5			Plafond
? .08.1900	47 N	3,538-549 N		3.564	150.735	?				Infiltrations
? .08.1900	48 N	3.610 N		3.636	150.807	30	28.9			Plafond
? .09.1900	49 N	3,695-749 N		3.721	150.892	?				Infiltrations
? .09.1900	50 N	3.712 N		3.738	150.909	30	28.7			Plafond
? .10.1900	51 N	3.768 N		3.794	150.965	21	28.6		66	Source séléniteuse
? .10.1900	52 N	3.775 N		3.801	150.972	10	28.8		67	Source séléniteuse
? .11.1900	53 N	3.813 N		3.839	151.010	10	29.0		55	Source séléniteuse
? .11.1900	54 N	3.816 N		3.842	151.013	20	29.4		51	Source séléniteuse

HE Berisal (linker Tunnel)

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)
? .?.1907	33" N	2.823 N		2.869	150.020	0				
? .?.1907	34" N	2.890 N		2.936	150.087	0				
? .?.1907	35" N	2,906-909 N	64	2.955	150.106	30	19.6			
? .?.1907	37" N	2.935 N		2.981	150.132	30	18.9			
? .?.1907	38" N	2.940 N		2.986	150.137	60	19.9			
? .?.1911						<1				
? .?.1907	39" N	2.945 N		2.991	150.142	0				
? .?.1907	40" N	2.956 N		3.002	150.153	1				
? .?.1911						0				
? .?.1907	41" N	3.109 N		3.155	150.306	0				
? .?.1907	42" N	3.251 N		3.297	150.448	0.1	25.1			
? .?.1911						0				
? .?.1907	43" N	3.363 N		3.409	150.560	0.1				
? .?.1911						0				
? .?.1907	44" N	3.422 N		3.468	150.619	3	27.0			
? .?.1907	45" N	3.527 N		3.573	150.724	3	27.5			
? .?.1907	46" N	3.682 N		3.728	150.879	0				
? .?.1907	47" N	3.704 N		3.750	150.901	0				
? .?.1907	48" N	3.729 N		3.775	150.926	6	28.0			
? .?.1911						0				
? .?.1907	49" N	3.757 N		3.803	150.954	0				
? .?.1907	50" N	3.757 N		3.803	150.954	0				
? .?.1907	51" N	3.758 N		3.804	150.955	0				
? .?.1907	52" N	3.770 N		3.816	150.967	0				
? .?.1907	53" N	3.772 N		3.818	150.969	0				
? .?.1907	54" N	3.788 N		3.834	150.985	6	27.0			
? .?.1907	55" N	3.789 N		3.835	150.986	0				
? .?.1907	56" N	3.804 N	65/Q0	3.850	151.001	0				

HE Berisal (rechter Tunnel)

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)
? .03.1901	55 N	4.641 N	14	4.667	151.838	300	31.6		38	Eau séléniteuse,plafond côté NE
? .03.1901	56 N	4.641 N		4.667	151.838	60	32.2			Eau séléniteuse, plancher
? .03.1901	57 N	4.652 N		4.678	151.849	?			38	Fortes infiltrations, eaux séléniteuses
? .06.1901	58 N	5.040 N		5.066	152.237	6	33.0		34	Plafond
? .06.1901	59 N	5.074 N		5.100	152.271	?				Forts suintements
? .06.1901	60 N	5.125 N		5.151	152.322	?				Forts suintements
? .11.1901	61 N	5.969 N		5.995	153.166	0.20	35.0		3	Faible infiltration
? .11.1901	62 N	6.039 N		6.065	153.236	1	36.8		3	Infiltration
? .11.1901	63 N	6.095 N		6.121	153.292		36.0			Transversale 32
? .02.1902	64 N	6.558 N		6.584	153.755	0.02	42.0		0.5	Plafond et parois NE
? .02.1902	65 N	6.623 N		6.649	153.820	12	44.3		0.5	Plafond
? .02.1902	66 N	6.682 N		6.708	153.879	1	40.0		0.5	Plafond
? .03.1902	67 N	6.745 N		6.771	153.942	6	45.4		0.5	Plafond et parois
? .05.1902	68 N	7.000 N		7.026	154.197	15	46.0	-400	0.5	Faible teneur en CaHCO3 et CaSO4
? .05.1902	69 N	7.040 N		7.066	154.237	1.50	47.4	-400	0.5	Faible teneur en CaHCO3 et CaSO4
? .05.1902	70 N	7.060 N		7.086	154.257	0.50		-400	0.5	Faible teneur en CaHCO3 et CaSO4
? .05.1902	71 N	7.080 N		7.106	154.277	12	49.0	-400	1	Transv. 38.
? .05.1902	72 N	7.087 N		7.113	154.284	5	48.5	-400	1	Faible teneur en CaHCO3 et CaSO4
? .05.1902	73 N	7.216 N		7.242	154.413	3	51.8	-400	1	Faible teneur en CaHCO3 et CaSO4
? .06.1902	74 N	7.300 N		7.326	154.497	0.50		>2000	96	Eau gypseuse
? .10.1902	75 N	7,881-885 N		7.907	155.078	0.05			37	Infiltrations le long d'une faille
? .10.1902	76 N	7.934 N		7.960	155.131	9	54.2		37	Plafond, fissure
? .10.1902	77 N	8.145 N		8.171	155.342	0.50	51.0		15	Plafond côté SW
? .10.1902	78 N	8.152 N		8.178	155.349	1	51.0		16	Plafond côté SW

* Gesamthärte

Anhang 3.2

HE Sion-Courmayeur (rechter Tunnel)

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)
? . ? .1907	2" N	0,166-172		0.218	147.369	200	10.4			
? . ? .1911						150	10.5			
? . ? .1907	2"bis N	0.184		0.230	147.381	20	10.2			
? . ? .1907	3" N	0.560		0.606	147.757	1	16.6			
? . ? .1911						0.5	13.5			
? . ? .1907	4" N	0.665		0.711	147.862	1	16.6			
? . ? .1911						0.3	13.5			
? .04.1899	5" N	0,790-800 N		0.836	147.987	100	14.8			Plafond, série de filets d'eau
? . ? .1907						60	14.2			
? . ? .1907	6" N	0.796		0.842	147.993	30	14.4			
? . ? .1907	7" N	0.816		0.862	148.013	0				
? . ? .1907	8" N	1.002		1.048	148.199	0				
? . ? .1907	9" N	1.038		1.084	148.235	0				
? . ? .1907	10" N	1.060		1.106	148.257	0				
? . ? .1907	11" N	1.080		1.126	148.277	0				
? . ? .1907	12" N	2.029		2.075	149.226	0				
? .01.1900	13" N	2.246 N		2.292	149.443	10	21.4			Plafond, côté NE
? . ? .1907						0				
? .01.1900	14" N	2.256 N		2.302	149.453	30	21.8			Plafond, côté SW
? . ? .1907						0.5	21.8			
? . ? .1911						0				
? .01.1900	15" N	2.440 N	62	2.486	149.637	60	21.4			Plafond, 3 orifices
? . ? .1907						4	19.8			
? . ? .1911						1.8	16.5			
? .01.1900	16" N	2.441 N		2.487	149.638	5	21.8			Emergence au plancher
? . ? .1907						5				
? .02.1900	17" N	2.441 N		2.487	149.638	30	21.6			Plafond, côté NE
? . ? .1907						9	18.2			
? . ? .1907	18" N	2.450		2.496	149.647	1				
? .02.1900	19" N	2.468 N	63	2.514	149.665	15	21.0			Plafond, côté NE
? . ? .1907						9	15.2			
? . ? .1911						2.4	14.0			
? . ? .1907	21" N	2.518		2.564	149.715	0				
? . ? .1907	22" N	2,535-541		2.587	149.738	0				
? .02.1900	23" N	2.561 N		2.607	149.758	30	23.6			Trois orifices
? . ? .1907						2	22.3			
? . ? .1911						0.7	17.5			
? . ? .1907	24" N	2.566 N		2.612	149.763	0				
? . ? .1907	25" N	2.567 N		2.613	149.764	0				
? . ? .1907	26" N	2.594 N		2.640	149.791	0				
? . ? .1907	27" N	2.618 N		2.664	149.815	45	21.2			
? . ? .1911						4.2	19.5			
? . ? .1907	28" N	2.672 N		2.718	149.869	9	22.8			
? . ? .1911						1.3	19.5			
? . ? .1907	29" N	2.722 N		2.768	149.919	0				
? . ? .1907	30" N	2.733 N		2.779	149.930	0.1				
? . ? .1911						0				
? . ? .1907	31" N	2.774 N		2.820	149.971	0				
? . ? .1907	32" N	2.774 N		2.820	149.971	0				

* Gesamthärte

HE Veglia (linker Tunnel)

Datum	Nr	Km	Nr	Km ab	Km ab	Schüttung	Temp.	TDS	G.H.*	Bemerkungen nach
	SCHARDT	SCHARDT	CRSFA	Nordportal	Lausanne	(l/min)	(°C)	(mg/l)	(°fr)	SCHARDT (1898-1906)
05.10.1903	123 N	9.950 N	34/Q3	9.976	157.147	210	49.0		162	Plafond, côté SW
07.01.1904						180	41.5		100	
30.06.1904						<50	36.8		70	
? . ? . 1904							32.3		70	
? . ? . 1911						72	23.0			
? . 12 . 1903	124 N	9.979 N		10.005	157.176	2	49.0		173	Plafond, côté SW, fissure
? . 12 . 1903	125 N	9.980 N		10.006	157.177	5	49.0		173	Plafond, côté NE, même fissure que 124
03.11.1903	126 N	10.063 N	36-37	10.089	157.260	1200	48.5		166	Plafond, parois et plancher. Fissures
07.01.1904						?	43.5		96	
? . ? . 1911						>100	30.0			
22.11.1903	127 N	10.144 N	39	10.170	157.341	3000	49.0		166	Parois SW. Fissure oblique
07.01.1904							47.5		156	
19.05.1904							46.5		86	
? . ? . 1911						15	30.5			
? . 03 . 1904	128 N	10.171-173 N		10.197	157.368	30	49.0		80	Parois SW, faille
? . 03 . 1904	129 N	10.174-175 N		10.200	157.371	20	47.0		86	Parois SW, faille
? . ? . 1911						2	31.0			
? . 03 . 1904	130 N	10.176 N		10.202	157.373	210	44.0		80	Parois NE, même faille que source 129
? . ? . 1911						>100	30.0			
? . 04 . 1904	131 N	10.190 N		10.216	157.387	60	47.0		88	Plafond, fissure E-W
? . 04 . 1904	132 N	10.219 N		10.245	157.416	3	43.0		142	Parois SW, près du plafond, fissure E-W
? . 05 . 1904	133 N	10.258 N		10.284	157.455	17	42.0		110	Parois SW et plafond, fissures
? . ? . 1911						12	42.0			
? . 05 . 1904	134 N	10.268 N	41-Q6	10.294	157.465	90	44.5		114	Plafond côté SW, fissure E-W
? . ? . 1911							42.0			
? . 05 . 1904	135 N	10.274 N		10.300	157.471	6	41.0		108	Plafond côté NE, fissure E-W
? . ? . 1911						4	41.0			
? . 05 . 1904	136 N	10.277 N		10.303	157.474	2	39.5		110	Plafond côté NE, fissure E-W
? . ? . 1911						<1	41.0			
? . 05 . 1904	137 N	10.308 N		10.334	157.505	2	45.0		130	Plafond côté SW, fissure E-W
? . ? . 1911							40.0			
? . 05 . 1904	138 N	10.317 N	42	10.343	157.514	120	46.0		122	Plafond côté NE, même fissure E-W
? . ? . 1911							35.0			
? . 06 . 1904	139 N	10.324 N		10.350	157.521	6	44.0		120	Plafond, fissure transversale
? . ? . 1911						<1	37.0			
? . 06 . 1904	140 N	10.343 N		10.369	157.540	180	46.0		120	Parois SW, fissure E-W
? . ? . 1911							38.0			
? . 06 . 1904	141 N	10.374 N	43	10.400	157.571	90	45.0		130	Plafond, fissure E-W
? . 06 . 1904	142a N	10.378 N		10.404	157.575	1800	43.0		102	Plafond côté SW
? . 06 . 1904	142b N	10.378 N		10.404	157.575	600	44.0		126	Avancement
07.03.1905	95 S	9.349 S		10.408	157.579	60	41.3		172	Côté NE, même fissure que 142
07.03.1905	94 S	9.331 S		10.426	157.597	60	45.0		154	Plafond, côté SW
07.02.1905	93 S	9.199 S		10.558	157.729	30	46.6		158	Parois NE
? . ? . 1911							42.0			
07.02.1905	92 S	9.196 S		10.561	157.732	60	46.8		154	Parois NE
07.02.1905	92b S	9.195 S		10.562	157.733	10	46.0		154	Plafond
07.02.1905	91 S	9.188 S	44	10.569	157.740	600	46.6		146	Plafond, côté SW
? . ? . 1911						>100	47.0			
11.01.1905	89 S	9.185 S	45/Q11	10.572	157.743	240	45.4		166	Fissures à l'avancement
? . ? . 1911						6	38.0			
11.01.1905	90 S	9.185 S	46	10.572	157.743	360	45.6		158	Fissures à l'avancement
? . ? . 1911						16	42.5			
11.01.1905	88 S	9.180 S		10.577	157.748	15	45.0		166	Plafond, fissure
11.01.1905	87 S	9.178 S	47	10.579	157.750	60	45.3		166	Plafond, fissure
06.09.1904	86 S	9.110 S	49-51	10.647	157.818	4200	44.0		150	Plafond côté NE, faille
09.10.1904						3600	45.4		136	
15.11.1904						1800	43.0		130	
13.12.1904						1200	41.0		126	
11.01.1905						1200	41.0		126	

* Gesamthärte

Anhang 3.4

HE Veglia (linker Tunnel)

Datum	Nr	Km	Nr	Km ab	Km ab	Schüttung	Temp.	TDS	G.H.*	Bemerkungen nach
	SCHARDT	SCHARDT	CRSFA	Nordportal	Lausanne	(l/min)	(°C)	(mg/l)	(°fr)	SCHARDT (1898-1906)
? . 11. 1902	79 N	8.285 N		8.311	155.482	0.10			8	Gouttes du plafond
? . 11. 1902	80 N	8.321 N		8.347	155.518	0.10			68	Gouttes du plafond
? . 11. 1902	81 N	8.428 N		8.454	155.625	0.02			120	Gouttes du plafond
? . 12. 1902	82 N	8.473 N		8.499	155.670	1	50.0		122	Parois SW et plafond, faille
? . 12. 1902	83 N	8.489-493 N		8.515	155.686	120	54.0	4378	152	Parois SW (chimisme Ca,Na>Mg ; SO4)
? . 01. 1903	84 N	8.505 N		8.531	155.702	1	51.0		144	Fissure au plafond
? . 01. 1903	85 N	8.515 N		8.541	155.712	25	52.0		152	Plafond
? . 01. 1903	86 N	8.518 N		8.544	155.715	1	51.0		164	Plafond
? . 01. 1903	87 N	8.530 N		8.556	155.727	1	50.0		168	Parois SW
? . 02. 1903	88 N	8.554 N		8.580	155.751	1	51.0		132	Plafond
? . 02. 1903	89 N	8.566 N		8.592	155.763	1	51.0		136	Plafond
? . 02. 1903	90 N	8.585 N		8.611	155.782	0.50	50.5		136	Parois SW
? . 02. 1903	91 N	8.595 N		8.621	155.792	0.25			136	Plafond
? . 02. 1903	92 N	8.622 N		8.648	155.819	0.20			114	Plafond
? . 02. 1903	93 N	8.655 N		8.681	155.852	0.50	52.0		82	Plafond, côté SW
? . 02. 1903	94 N	8.657 N		8.683	155.854	1.50	52.0		85	Plafond, côté SW, fissure
? . 02. 1903	95 N	8.702 N		8.728	155.899	0.20			90	Plafond
? . 02. 1903	96 N	8.756 N		8.782	155.953	0.25			46	Plafond
? . 03. 1903	97 N	8.767 N		8.793	155.964	1.50	52.0		54	Plafond, côté NE
? . 03. 1903	98 N	8.787 N		8.813	155.984	6	52.5		44	Trou de mine à l'avancement
? . 03. 1903	99 N	8.877 N		8.903	156.074	0.10			29	Plafond
? . 03. 1903	100 N	8.938 N		8.964	156.135	0.50			28	Plafond, côté SW, fissure
? . 04. 1903	101 N	9.043 N		9.069	156.240	6	51.5	>3000	75	Plafond, côté SW (chimisme Na>Ca ; SO4)
? . 05. 1903	102 N	9.194 N		9.220	156.391	2	51.0	>3000	46	Plafond, côté NE, fissure
? . 05. 1903	103 N	9.196 N		9.222	156.393	1.50	51.0	>3000	56	Plafond, côté NE, fissure
? . 06. 1903	104 N	9.306 N		9.332	156.503	0.5	52.0	>3000	49	Plafond, côté NE, fissure
? . 06. 1903	105 N	9.412 N		9.438	156.609	15	52.0		129	Plafond, côté SW. Ca>Na ; SO4>HCO3
? . 07. 1903	106 N	9.535 N		9.561	156.732	5	51.5		129	Plafond, fissure verticale
? . 07. 1903	107 N	9.546 N		9.572	156.743	0.5			158	Plafond, côté NE
? . 08. 1903	108 N	9.625 N		9.651	156.822	30	50.0		154	Parois NE en bas, fissure
? . 08. 1903	109 N	9.643 N		9.669	156.840	54	49.5		154	Plafond, côtés NE et SW, fissure
? . ? . 1911						<1	33.0			
? . 08. 1903	110 N	9.710 N		9.736	156.907	600	50.0		156	Parois SW et plancher, fissures
? . ? . 1911						3	40.0			
? . 08. 1903	111 N	9.710 N		9.736	156.907		50.0		148	Parois NE et plancher, fissures
? . 08. 1903	112 N	9.737 N		9.763	156.934		48.0		132	Parois SW, fissure oblique
? . 08. 1903	113 N	9.797 N		9.823	156.994	240	48.0		152	Plancher côté SW, fissure
? . ? . 1911						15	47.0			
? . 08. 1903	114 N	9.804 N	15-18	9.830	157.001	6	48.0		152	Parois SW
? . ? . 1911						15	48.0			
? . 09. 1903	115 N	9.838 N	19/Q2	9.864	157.035	2	49.0		148	Plafond, côté SW
? . ? . 1911						3	48.5			
? . 09. 1903	116 N	9.843 N	21	9.869	157.040	12	49.0		148	Plafond, côté SW, fissure
? . ? . 1911						18	48.5			
? . 09. 1903	117 N	9.845 N	25	9.871	157.042	90	50.0		150	Plafond, côté NE, même fissure que 116
? . ? . 1911						18	48.5			
? . 09. 1903	118 N	9.910 N		9.936	157.107	1			156	Plafond, côté NE, délit du schiste
? . 09. 1903	119 N	9.912 N		9.938	157.109	5	49.7		166	Plafond et parois SW, fissure
? . 09. 1903	120 N	9.916 N		9.942	157.113	6	50.0		156	Parois NE et plafond
? . ? . 1911						<1	36.0			
? . 09. 1903	121 N	9.936 N	30	9.962	157.133	2			171	Parois NE
? . ? . 1911						<1	36.0			
05.10.1903	122 N	9.948 N	32	9.974	157.145	300	49.0		160	Plafond, faille
07.01.1904						200	41.0		98	Chimisme Ca>Na ; SO4
30.06.1904						<50	36.0		74	
? . 09. 1904							33.4		74	
? . ? . 1911						31	27.0			

* Gesamthärte

HE Veglia (rechter Tunnel)

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)
05.07.1905	69° S	9.392 S		10.385	157.536	15	38.8		93	Plafond, fissure
? .?.1907						90	36.8			
? .?.1912							48.8			
05.06.1905	68° S	9.381 S	116	10.396	157.547	60	46.2		171	Fissure côté NE
? .?.1907						50	45.0			
? .?.1912							43.0			
? .?.1907	68bis° S	9.386 S	121/Q9	10.391	157.542	15	45.1			
? .?.1912							44.8			
18.05.1905	67° S	9,223-228 S		10.549	157.700	1200	46.4		146	
? .?.1907						150	47.5			
? .?.1912							45.6			
13.12.1904	66° S	9.153 S		10.624	157.775	1200	46.8		142	Plafond, fissure
? .?.1907						1500	48.7			
? .?.1912							35.5			
13.12.1904	65° S	9.146 S		10.631	157.782	60	47.0		142	Plafond, fissure
? .?.1907						1500	49.2			
? .?.1912							36.8			
15.11.1904	64° S	9,140-141 S		10.636	157.787	3000	46.4		170	Faille côté SW
13.12.1904							46.8		142	
11.01.1905							46.5		134	
? .?.1907						300	42.2			
? .?.1912							36.5			
15.11.1904	64b° S	9.141 S		10.636	157.787	120	46.0		166	Faille côté NE
15.11.1904	63° S	9.128 S	128	10.649	157.800	300	45.0		146	Plafond
13.12.1904						300	44.0		130	
? .?.1907						600	43.0			
? .?.1912							35.0			

HE Lebendun (linker Tunnel)

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)
? .07.1904	85 S	8.808 S		10.949	158.120	5	40.0		51	Plafond, même fissure que 84
? .07.1904	84 S	8.799 S		10.958	158.129	0.1			62	Parois NE, fissures
? .06.1904	83 S	8.745 S		11.012	158.183	0.1			70	Plafond, suintement par fissures
? .06.1904	82 S	8,700-710 S		11.057	158.228	0.5	41.0		70	Plafond, fissures
? .05.1904	81 S	8,601-607 S		11.156	158.327	10	41.0		118	Plafond, fissure NW-SE
? .05.1904	80 S	8.466 S		11.291	158.462	0.5			110	Plafond, fissure N-S
? .05.1904	79 S	8,412-416 S		11.345	158.516	45	41.0		142	Plafond, faille
? .05.1904	78 S	8.404 S		11.353	158.524	0.2			13	Plafond, fissure N-S
? .04.1904	77 S	8.311 S		11.446	158.617	0.1			146	Plafond. H2S
? .01.1904	76 S	7.885 S		11.872	159.043	0.5	~37		88	Plafond
? .01.1904	75 S	7.840 S		11.917	159.088	1	~38		98	Plafond
? .12.1903	74 S	7,622-630 S		12.135	159.306	3	39.0		128	Plafond, côté NE
? .11.1903	73 S	7.543 S		12.214	159.385	0.5			144	Plafond, fissure
? .11.1903	72 S	7.507 S		12.250	159.421	1.2	39.0		144	Plafond, fissure
? .11.1903	71 S	7.494 S		12.263	159.434	1.5	40.8		144	Plafond côté NE
? .10.1903	70 S	7.328 S		12.429	159.600	0.6			156	Plafond, faille
? .09.1903	69 S	7.198 S		12.559	159.730	1			138	Plafond, infiltrations du plafond
01.08.1903	68 S	6.943 S		12.814	159.985	1200	39.0		132	30 cm au-dessus du seuil, côté NE
12.08.1903						180	38.6			
09.09.1903						120	38.1			
06.10.1903						90	37.6			
? .05.1903	67 S	6.443 S		13.314	160.485	1	40.0		123	Plafond, fissures verticales. H2S
? .03.1903	66 S	6.210 S		13.547	160.718	0.1			128	Plafond
? .12.1902	65 S	5.790 S		13.967	161.138	0.1			146	Plafond, fort suintement
? .11.1902	64 S	5.663 S		14.094	161.265	0.5	34.0		144	Plafond côté SW

* Gesamthärte

Anhang 3.6

HE Veglia (rechter Tunnel)

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)
23.08.1903 23.11.1903 ?.?.1907	81" N	9.400 N		9.446	156.597	5 0,1 0	50.0		202 232	Fissure, côté SW
18.08.1903 ?.?.1907	82" N	9.420 N		9.466	156.617	12 0	50.5		224	Parois et plancher côté SW
23.11.1903 ?.?.1907 ?.?.1911	83" N	9.548 N		9.594	156.745	0,0 0.1 0			196	Plafond
23.11.1903 ?.?.1907	84" N	9.641 N		9.687	156.838	0,2 0	47.5		188	Parois NE, fissure de dissolution
23.11.1903 07.01.1904 10.03.1904 ?.?.1907 ?.?.1912	85" N	9.842 N	74/Q4	9.888	157.039	90 60 30	49.5 49.7 49.0 46.0		156 142 85	Plafond côté SW, fissure
07.01.1904 ?.?.1907 ?.?.1912	86" N	9.911 N	78	9.957	157.108	6 3	49.5 44.0 41.0		118	Plafond, côté SW, fissure oblique
?.?.1907 ?.?.1912	87" N	9.943 N	80/Q5	9.989	157.140	3.3	41.0 34.5			
?.02.1904 ?.?.1907 ?.?.1912	87bis" N	9.945 N	81	9.991	157.142	3 6	42.5 32.0 26.0		73	Parois NE, fissure
?.03.1904 ?.?.1907	88" N	10.047 N		10.093	157.244	3 1.4	40.0 29.4		77	
03.11.1903 07.01.1904	126 N	10.063 N		10.109	157.260	1200 ?	48.5 43.5		166 96	Plafond, parois et plancher. Fissures
?.03.1904 30.06.1904 01.10.1904 ?.12.1904 ?.06.1905 ?.?.1907 ?.?.1912	89" N	10.053 N	85	10.099	157.250	1200 ~1200 ? ? ~1000 1600	39.0 34.4 32.4 30.9 29.4 28.6 23.0		75 60 74	
?.03.1904 ?.?.1907	90" N	10.061 N		10.107	157.258	120 0	37.5		65	
?.?.1907 ?.?.1912	91" N	10.141 N	91	10.187	157.338	30	35.1 33.0			
?.?.1907 ?.?.1912	92" N	10.148 N	95	10.194	157.345	150	39.6 34.0			
?.?.1907 ?.?.1912	93" N	10.152 N	98	10.198	157.349	300	42.8 43.5			
?.?.1907 ?.?.1912	76" S	9.610 S		10.167	157.318	90	47.0 43.5			
05.07.1905 ?.?.1907 ?.?.1912	75" S	9.605 S		10.172	157.323	60 60	36.5 37.2 32.2		93	Plafond côté SW, fissure
05.07.1905 ?.?.1907 ?.?.1912	74" S	9.598 S	88	10.179	157.330	90 120	46.2 45.5 39.5		85	Plafond côté SW, fissure
05.07.1905 ?.?.1907 ?.?.1912	73" S	9.586 S	93	10.191	157.342	90 60	46.5 44.2 39.5		93	Plafond côté SW, fissure
05.07.1905 ?.?.1907	72" S	9.583 S		10.194	157.345	60 0	46.1		89	Plafond côté NE, fissure
05.07.1905 ?.?.1907 ?.?.1912	71" S	9.517 S	110	10.260	157.411	120 90	44.2 45.4 42.0		153	Plafond, fissure
05.07.1905 ?.?.1907 ?.?.1912	70" S	9.406 S	115/F1	10.371	157.522	60 45	46.0 46.6 48.0		137	Plafond côté SW, fissure

* Gesamthärte

HE Teggiolo (linker Tunnel)

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)
07.08.1902	40c S	4,412-20 S		15.345	162.516	60	15.0		60	Plafond, côté NE, fissure
02.09.1902						210	14.7		66	
03.10.1902						210	16.2		72	
04.11.1902						210	15.2		79	
02.12.1902						210	15.7		83	
07.01.1903						200	16.6		90	
28.01.1903						180	17.0		100	
03.03.1903						180	17.5		96	
11.05.1903						240	17.7		92	
10.06.1903						300	13.8		54	
08.07.1903						600	12.8		43	
02.12.1901	40b S	4,405-410 S	56	15.352	162.523	300	16.2		68	Transv. 21. Plafond, même fissure 40
11.02.1902						300	16.3		70	
03.04.1902						300	16.2		78	
02.06.1902						300	13.8		80	
02.07.1902						300	13.8		49	
07.08.1902						300				
02.09.1902						300	14.7		66	
03.10.1902						300	15.0		74	
04.11.1902						300	14.8		79	
02.12.1902						300	15.2		88	
07.01.1903						300	16.2		90	
28.01.1903						300	16.6		100	
03.03.1903						300	17.2		96	
01.04.1903						300	17.5		92	
05.05.1902	40b S	4,405-410 S		15.352	162.523	300	17.8		80	
02.06.1902						400	13.9		54	
02.07.1902						600	12.6		41	
02.12.1901	38 S	4.401 S		15.356	162.527	350	14.8		48	Parois NE, fissure
05.01.1902										
11.02.1902							14.5		63	
03.04.1902							13.2		76	
05.05.1902							12.8		78	
02.06.1902							12.6		84	
02.07.1902							12.5		62	
07.08.1902							11.4			
02.09.1902							14.7		67	
04.11.1902							11.9		71	
02.12.1902							11.8		69	
07.01.1903							11.6		68	
03.03.1903							11.4		85	
11.02.1902	40a S	4.401 S		15.356	162.527	200	11.5		75	
03.04.1902						150	11.3		76	
05.05.1902						100	11.2		79	
02.06.1902						100	11.0		84	
02.07.1902						100	11.4		50	
02.12.1901	40 S	4.399 S		15.358	162.529	4500	17.2		59	Parois SW, grande fissure oblique
05.01.1902						4500	16.2		63	
11.02.1902						4500	16.2		72	
03.04.1902						4500	16.3		80	
05.05.1902						4500	16.2		80	
02.06.1902						4500	15.2		80	
02.07.1902						4500	13.8		50	
07.08.1902						3000	14.5		68	
02.09.1902						3000	14.7		66	
03.10.1902						3000	15.0		74	

* Gesamthärte

Anhang 3.8

HE Lebendun (rechter Tunnel)

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)
? . ? . 1907	62* S	8,740-742 S		11.035	158.186	0.5				
? . 06 . 1904	58* S	8.526 S		11.251	158.402	0,0			110	Plafond, fissure
? . ? . 1907						0.1				
? . 06 . 1904	61* S	8.543 S		11.234	158.385	0,0			106	Plafond, fissure
? . ? . 1907						0.1				
? . 06 . 1904	60* S	8.539 S		11.238	158.389	0.06			98	Plafond, fissure
? . ? . 1907						0.1				
? . 06 . 1904	59* S	8.530 S		11.247	158.398	0,0			118	Plafond, fissure
? . ? . 1907						0.1				
? . 06 . 1904	57* S	8,495-505 S		11.272	158.423	0.05			122	Plafond, fissure
? . ? . 1907						1	35			
? . 06 . 1904	56* S	8,470-472 S		11.305	158.456	1			134	Plafond, fissure
? . ? . 1907						0.1				
? . 04 . 1904	55* S	8,220-222 S		11.555	158.706	0,1			130	Plafond, faille oblique. H2S!
? . ? . 1907						0				
? . 01 . 1904	54* S	7,870-883 S		11.894	159.045	0,1	~36		108	Plafond
? . ? . 1907						0				
? . ? . 1907	53* S	7.130 S		12.647	159.798	0.1				
? . ? . 1907	52* S	6.900 S		12.877	160.028	0				

HE Teggiolo (linker Tunnel)

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)
02.10.1902	63 S	5.270 S		14.487	161.658	30	29.3		129	Plafond côté SW
02.10.1902	62 S	5.259 S		14.498	161.669	240	29.3		121	Plafond côté SW
02.10.1902	61 S	5.251 S		14.506	161.677	120	29.0		121	Plafond côté SW
02.10.1902	60 S	5.224 S		14.533	161.704	6	29.0		121	Plafond côté NE
02.10.1902	59 S	5.206 S		14.551	161.722	45	28.4		7	Plafond côté SW
02.10.1902	58 S	5.204 S		14.553	161.724	12	28.4		123	Plafond côté NE
01.09.1902	57 S	5.182 S		14.575	161.746	1	28.4		141	Plafond côté NE
01.09.1902	56 S	5.180 S		14.577	161.748	2	29.0		141	Plafond côté NE
06.08.1902	53 S	5.026 S		14.731	161.902	180	26.2		140	Plancher NE
06.08.1902	54 S	5.026 S		14.731	161.902	12	26.2		140	Plafond côté SW
06.08.1902	55 S	5.026 S		14.731	161.902	120	26.9		140	Plancher SW
06.08.1902	52 S	5.025 S		14.732	161.903	3	26.2		132	Plafond
06.08.1902	51 S	4.970 S		14.787	161.958	90	25.7		142	Parois SW
02.10.1902						60	25.3			
06.08.1902	50 S	4.969 S		14.788	161.959	60	25.7		142	Plafond côté SW
02.10.1902						0				
06.08.1902	48 S	4.968 S		14.789	161.960	120	25.7		140	Plafond côté NE
02.10.1902						0				
06.08.1902	49 S	4.968 S		14.789	161.960	30	25.8		142	Plafond côté NE
02.10.1902						0				
06.08.1902	47 S	4.967 S		14.790	161.961	10	25.0		144	Plafond côté SW
02.10.1902						0				
? . 04 . 1902	46 S	4.580 S		15.177	162.348	120	19.1		134	Plancher NE
? . 03 . 1902	45 S	4.568 S		15.189	162.360	6	19.1		128	Parois NE
? . 03 . 1902	44 S	4.558 S		15.199	162.370	90	19.8		128	Parois NE
? . 03 . 1902	43 S	4.520 S		15.237	162.408		20.5		144	Plafond côté SW
? . 03 . 1902	42 S	4.460 S		15.297	162.468	1	19.8		124	Faible suintement
05.01.1902	41 S	4.425 S		15.332	162.503	10	18.6		72	

* Gesamthärte

HE Teggiolo (linker Tunnel)

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)
02.12.1901	35 S	4.391 S		15.366	162.537	600	15.1		43	Plafond côté NE, fissure
05.01.1902						600	13.5		68	
11.02.1902						800	13.0		73	
03.04.1902						900	15.1		80	
02.06.1902						900	15.0		81	
02.07.1902						600	12.8		42	
07.08.1902						600	13.4		60	
02.09.1902						550	13.9		71	
03.10.1902						500	14.4		77	
04.11.1902						450	13.8		83	
02.12.1902						300	14.0		82	
07.01.1903						290	14.5		90	
28.01.1903						290	14.8		95	
03.03.1903	35 S	4.391 S		15.366	162.537	290	15.0		86	
01.04.1903						120	16.6		81	
11.05.1903						210	14.6		82	
10.06.1903						300	13.2		54	
08.07.1903						400	12.0		39	
07.10.1901	35-40 S	4,390-400 S		15.367	162.538	12000	18.0		31	
28.10.1901						12000	16.2		34	
02.12.1901						12000	16.0		47	
26.09.1901	34 S	4.353 S	58	15.404	162.575	600	18.4		41	Parois NE, près du plancher Roche sèche dans le voisinage
28.10.1901						600	16.4		23	
02.12.1901						600	16.4		38	
05.01.1902						600	14.2		65	
11.02.1902						600	14.2		58	
03.04.1902						600	13.2		62	
05.05.1902						600	13.8		62	
02.07.1902						600	12.3		62	
02.07.1902						600	12.5		73	
07.08.1902						600	11.8		56	
02.09.1902						600	11.4		64	
03.10.1902						500	11.1		56	
04.11.1902						500	10.8		58	
02.12.1902						500	10.5		57	
07.01.1903						450	10.2		66	
28.01.1903						450	10.2		66	
03.03.1903						450	10.2		68	
01.04.1903						420	10.1		70	
11.05.1903						420	10.1		72	
10.06.1903						500	10.4		67	
08.07.1903						600	10.4		58	
26.09.1901	33 S	4.341 S		15.416	162.587	60	19.0		41	
05.01.1902							15.7			

HE Teggiolo (rechter Tunnel)

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)
? . ?.1907	51" S	5.300 S		14.477	161.628	0				
? . ?.1907	50" S	5.286 S		14.491	161.642	0				
? . ?.1907	49" S	5.272 S		14.505	161.656	2	23.4			
? . ?.1907	48" S	5.269 S		14.508	161.659	0.2				
? . ?.1907	47" S	5.254 S		14.523	161.674	0				
? . ?.1907	46" S	5.242 S		14.535	161.686	2	23.4			

* Gesamthärte

Anhang 3.10

HE Teggiolo (linker Tunnel)

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)
04.11.1902	40 S	4.399 S		15.358	162.529	2000	14.8		79	
02.12.1902						2000	15.8		83	
07.01.1903						1800	16.2		88	
28.01.1903						1800	16.6		96	
03.03.1903						1500	17.2		96	
01.04.1903						900	17.5		92	
11.05.1903						1200	17.7		86	
10.06.1903						1800	13.8		54	
08.07.1903						2400	12.6		41	
02.12.1901	37 S	4.398 S		15.359	162.530	300	14.8		48	Parois NE, fissure près du plancher
05.01.1902							14.8		60	
11.02.1902							14.5		63	
03.04.1902							14.4		70	
05.05.1902							12.8		78	
02.06.1902							12.6			
02.07.1902							12.9			
07.08.1902							13.5		60	
02.09.1902										
04.11.1902							12.2			
02.12.1902							11.9		71	
02.12.1901	39 S	4.398 S		15.359	162.530	6000	13.2		51	Jaillit du plancher
05.01.1902						6000	11.7		65	
05.05.1902	39 S	4.398 S		15.359	162.530	6000	13.8		79	
03.06.1902						6000	13.2		68	
02.07.1902						6000	12.8		69	
07.08.1902						6000	12.4		67	
02.09.1902						5000	11.4		66	
03.10.1902						5000	11.5		66	
02.12.1902						5000	11.4		69	
28.01.1903						4000	11.5		82	
03.03.1903						3000	11.0		85	
01.04.1903						3000	11.4		78	
11.05.1903	38-39 S	4,398-402 S	55	15.359	162.530	900	11.0		74	Sources 38 et 39 réunies
10.06.1903						900	12.7		75	
08.07.1903						1000	11.6		52	
28.10.1901	36-40 S	4,397-401 S		15.360	162.531		16.4		33	
02.12.1901						12000	14.8		51	
02.12.1901	36 S	4.397 S		15.360	162.531	300	13.8		51	Parois NE, près du plancher, fissure
05.01.1902						300	13.2		60	
11.02.1902						300	14.6		62	
05.04.1902						300	14.3		70	
03.06.1902						150	14.2		79	
02.07.1902						150	12.9			
02.09.1902						150	13.2		67	
04.11.1902						100	12.8		75	
02.12.1902						100	12.5		75	
07.01.1903						100	12.2		76	
03.03.1903						100	11.8		82	
02.12.1901	36-37 S	4,397-398 S	57	15.360	162.531	600	14.3		50	
05.01.1902							13.2		60	
11.02.1902							14.6		62	
03.04.1902							14.3		70	
02.06.1902							14.2		79	
02.07.1902							12.9			
02.09.1902							13.2		67	
04.11.1902							12.8		75	
02.12.1902							12.5		75	
07.01.1903							12.2		76	
03.03.1903							11.8		82	
11.05.1903						600	11.5		73	
10.06.1903						800	11.5		73	
08.07.1903						1000	11.6		46	

* Gesamthärte

HE Teggiolo (rechter Tunnel)

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr GRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)
02.12.1901	38" S	4.434 S		15.343	162.494	200	13.6		53	Parois NE, près du plafond, fissure
03.04.1902						200	14.0		85	
02.07.1902						200	13.5		67	
07.08.1902						200	14.7		67	
03.10.1902						180	15.0		75	
04.11.1902						79	14.8		79	
02.12.1902						120	15.6		82	
07.01.1903						120	16.2		90	
28.01.1903						120	16.2		100	
03.03.1903						120	17.0		95	
01.04.1903						120	17.3		92	
11.05.1903						120	17.7		90	
10.06.1903						180	13.8		55	
08.07.1903						300	12.6		45	
11.05.1903						120	17.7		90	
10.06.1903						180	13.8		55	
08.07.1903						300	12.6		45	
02.12.1901	37" S	4,429-431 S	141/Q12	15.346	162.497	6000	13.4		53	Parois NE, plusieurs fissures obliques
05.01.1902						6000	13.5		65	
11.02.1902						6000	13.2		68	
03.04.1902						9000	12.9			
05.05.1902						9000	12.4			
02.06.1902						9000	12.4			
02.07.1902						12000	12.4			
07.08.1902	37" S	4,429-431 S		15.346	162.497	12000	12.4			
02.09.1902						9000	12.9			
03.10.1902						9000	12.6			
04.11.1902						9000	11.8			
02.12.1902						9000	12.4			
07.01.1903						7000	12.8			
28.01.1903						7000	13.0			
03.03.1903						7000	13.9			
01.04.1903						7000	14.0			
11.05.1903						6000	13.7		87	
10.06.1903						9000	12.1		79	
08.07.1903						10000	11.4		50	
? . ?.1907						9000	13.6			
? . ?.1912							16.0			
02.12.1901	36" S	4.427 S		15.350	162.501	100	13.2		55	Parois NE, près du plafond, fissure verticale
05.01.1902						100	13.0		65	
11.02.1902						9000	12.9		68	
03.04.1902						9000	12.2		83	
05.05.1902						9000	11.8		78	
02.06.1902						9000	11.5		76	
02.07.1902						9000	12.2		63	
07.08.1902						9000	11.8		64	
02.09.1902						6000	12.0		70	
03.10.1902						6000	12.2		74	
04.11.1902						6000	12.2		75	
02.12.1902						6000	11.7		51	
07.01.1903						6000	11.9		81	
28.01.1903						6000	11.9		88	
03.03.1903						6000	11.8		85	
01.04.1903						6000	12.0		84	
11.05.1903						9000	12.1		80	
10.06.1903						10000	12.0		63	
08.07.1903						12000	11.2		56	
? . ?.1907						9000	13.0			

* Gesamthärte

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)
? . ? . 1907	45" S	5.010 S		14.767	161.918	0				
? . ? . 1907	44" S	4.619 S		15.158	162.309	0				
? . ? . 1907	43" S	4.614 S		15.163	162.314	0				
? . ? . 1907	42" S	4.552 S		15.225	162.376	0				
02.12.1901 05.01.1902 11.02.1902	41b" S	4.450 S		15.327	162.478	9000	15.0 14.0 13.9		56 64 74	
02.12.1901 05.01.1902	41a" S	4.448 S		15.329	162.480		15.0 12.6		56 68	
02.12.1901 05.01.1902 11.02.1902 02.06.1902 02.07.1902 07.08.1902 02.09.1902 03.10.1902 04.11.1902 02.12.1902 07.01.1903 28.01.1903 03.03.1903 01.04.1903 11.05.1903 10.06.1903 08.07.1903 ? . ? . 1907 ? . ? . 1912	41" S	4,447-450 S		15.327	162.478	9000 9000 9000 9000 12000 12000 10000 10000 10000 10000 8000 8000 8000 6000 6000 9000 12000 12000	15.0 14.0 13.9 13.4 12.3 13.8 14.6 13.2 14.8 15.4 16.2 16.6 17.3 17.5 17.9 13.9 12.5 18.0		56 64 74 84 69 64 66 69 78 82 90 100 96 89 92 55 42	Plafond, fissure longitudinale
02.12.1901 11.02.1902	40" S	4.439 S		15.338	162.489	300 300	17.0 17.0		60 64	
02.12.1901 11.02.1902 02.06.1902 07.08.1902 02.09.1902 03.10.1902 04.11.1902 02.12.1902 07.01.1903 28.01.1903 03.03.1903 01.04.1903 11.05.1903 10.06.1903 08.07.1903 ? . ? . 1907	39"-40" S	4,438-440 S		15.339	162.490	450 450 600 600 600 700 700 900 900 900 900 1000 2000 3000 3000	17.0 16.8 14.5 13.6 11.4 11.5 11.2 11.3 11.4 11.4 11.5 11.3 11.9 12.1 12.2 12.0		59 63 63 64 67 69 69 73 76 88 85 84 80 79 67	Pied de la parois SW, sources jaillissant de bas en haut de fissures parallèles
02.12.1901 11.02.1902	39" S	4.436 S		15.341	162.492	150 150	17.1 16.3		56 60	

* Gesamthärte

HE Teggiolo (rechter Tunnel)

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)
29.10.1901	31" S	4.385 S	148	15.392	162.543	10	15.5		27	Parois SW, fissure subverticale, jaillit 15 à 20 cm au dessus du plancher
02.07.1902						450	15.2		75	
07.08.1902						600	15.2		72	
03.10.1902						600	15.0		75	
04.11.1902						600	14.6		76	
02.12.1902						600	14.0		74	
07.01.1903						900	13.8		82	
28.01.1903						1200	13.8		92	
03.03.1903						3000	14.2		85	
01.04.1903						3000	14.2		84	
11.05.1903						3000	14.0		86	
10.06.1903						2500	14.8		85	
08.07.1903						3000	15.0		67	
? . ? .1907						1000	14.4			
? . ? .1912							14.4			
29.10.1901	30" S	4.383 S		15.394	162.545	15	15.4		26	

HE Antigorio (linker Tunnel)

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)
26.09.1901	32 S	4.251-257 S		15.506	162.677	40	21.4		40	
26.09.1901	31 S	4.248 S		15.509	162.680	600	20.0		35	Parois NE, fissure
02.06.1902						200	19.9		26	
02.07.1902						200	19.2		23	
07.08.1902						120	19.0		21	
04.09.1902						90	18.9		18	
07.01.1903						60	18.8		17	
03.03.1903						30	18.8		17	
01.04.1903						24	18.8		16	
11.05.1903						34	18.8		19	
10.06.1903						30	18.8		19	
08.07.1903						45	18.9		19	
26.09.1901	30 S	4.218 S		15.539	162.710	30	21.4		38	
27.08.1901	29 S	4.174 S		15.583	162.754	15	21.1			
27.08.1901	28 S	4.093 S		15.664	162.835	30	24.0		39	Même fissure que 27
27.08.1901	27 S	4.091 S		15.666	162.837	20	24.0		37	Même fissure que 28
23.07.1901	26 S	4.081 S		15.676	162.847	2	24.0		33	
23.07.1901	25 S	4.068 S		15.689	162.860	60	23.8		35	Plafond côté NE, délit entre gneiss et micaschiste noir
11.02.1902						100	21.6		15	
03.04.1902						100	20.5		12	
02.06.1902						120	20.5		12	
03.10.1902						45	21.4		12	
28.01.1903						30	21.0		13	
03.03.1903						30	21.0		12	
01.04.1903						10	20.9		13	
11.05.1903						9	21.0		12	
10.06.1903						9	20.9		13	
08.07.1903						15	20.8		14	
23.07.1901	24 S	4.066 S		15.691	162.862	30	23.8			
23.07.1901	22 S	4.011 S		15.746	162.917	40	25.0		39	Plafond
23.07.1901	23 S	4.011 S		15.746	162.917	50	25.0		39	Plancher
23.07.1901	21 S	4.008 S		15.749	162.920	60	25.4		46	
23.07.1901	20 S	4.007 S		15.750	162.921	60	24.8		38	

* Gesamthärte

HE Antigorio (linker Tunnel)

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)
11.06.1901	13 S	3.920 S		15.837	163.008	30	27.4		43	
11.02.1902	11b S	3,900-902 S		15.857	163.028	300	26.2		43	Même fissure que 11, jaillit de bas en haut
03.04.1902						250	26.4	44		
07.08.1902						90	27.2	50		
03.10.1902						120	26.7	49		
02.12.1902						90	26.7	57		
01.01.1903						90	26.7	56		
03.03.1903						70	26.7	56		
01.04.1903						70	26.7	55		
11.05.1903						50	26.8			
10.06.1903						50	26.8	55	Ca>Mg ; SO4	
08.07.1903				50	27.0					
11.06.1901	12 S	3.900 S		15.857	163.028	60	28.6		46	
11.06.1901	11 S	3,891-893 S		15.866	163.037	10000	28.0		40	Plafond, côté NE, même fissure ouverte
30.09.1901						6000	26.5	45	que 8 et 9, mélange des deux	
03.01.1902						500	25.0	62	Ca>Mg ; SO4	
11.02.1902	11a S	3,882-892 S		15.875	163.046	300	24.8		30	Plafond, côté NE, même fissure ouverte que
03.04.1902						200	23.2	20	8 et 9. Ca>Mg ; SO4	
05.05.1902						100	21.8	13		
07.08.1902							22.9	21		
03.10.1902						60	23.0	15		
02.12.1902						50	22.8	14		
07.01.1903						50	22.8	14		
03.03.1903						30	22.7	14		
01.04.1903						30	22.7	15		
11.05.1903						30	22.7	13		
10.06.1903	30	22.0	15							
08.07.1903				30	22.6			15		
23.07.1901	8 S	3.868 S	59	15.889	163.060	3000	25.7		17	Transv. 19. Plafond, même fissure E-W que
26.09.1901						2000	24.5	16	9 et 10	
03.04.1902						900	23.3	12		
05.05.1902						900	23.6	14		
02.06.1902						600	23.1	15		
07.08.1902						500	23.3	14		
02.09.1902						500	22.6	12		
03.10.1902						400	22.0	12		
04.11.1902						300	21.9	12		
02.12.1902						300	22.8	13		
07.01.1903						300	22.5	13		
28.01.1903						250	22.4	13		
03.03.1903						200	22.0	12		
07.04.1903						180	22.0	13		
11.05.1903						200	22.3	12		
10.06.1903						240	22.6	12		
08.07.1903	300	22.6	12							
23.07.1901	10 S	3.863 S		15.894	163.065	90	28.8		44	Transv. 19. Petite fissure vis à vis de 9
03.04.1902						25	28.1	57		
03.09.1902						15	29.6			
03.10.1902						6	29.6			
28.01.1903						5	30.4			
01.04.1903						5	30.3		80	

* Gesamthärte

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)
23.07.1901	19 S	3.999 S		15.758	162.929	600	24.6		34	Plafond, côté SW, fissure Ca>Mg ; SO4
11.02.1902						500	21.4		16	
03.04.1902						400	20.9		15	
05.05.1902						300	20.8		14	
02.06.1902						150	20.4		20	
07.08.1902						150	20.0		18	
02.09.1902						150	20.2		18	
03.10.1902						150	20.2		16	
02.12.1902						150	19.9		17	
07.01.1903						120	19.8		15	
28.01.1903						120	19.8		17 *	
03.03.1903						120	19.7		16	
01.04.1903						100	19.6		14	
11.05.1903						90	19.6		19	
10.06.1903						60	19.6		19	
08.07.1903						120	19.5		21	
23.07.1901	18 S	3.990-991 S		15.767	162.938	150	24.6		35	
23.07.1901	17 S	3.988 S		15.769	162.940	120	24.2		28	
23.07.1901	16 S	3.984 S		15.773	162.944	5	25.0		29	
23.07.1901	15 S	3.974-977 S		15.783	162.954	100	25.2		31	
11.06.1901	14 S	3.935 S		15.822	162.993	60	26.4		30	Plafond, fissure côté NE Ca>Mg ; SO4
05.01.1902						60	25.4		37	
03.05.1902						60	26.5		48	
03.06.1902									55	
02.09.1902	14a S	3.935 S		15.822	162.993		24.6		42	Plafond, diverses fissures E-W
03.10.1902							24.9		40	
04.11.1902							23.9		41	
02.12.1902							24.9		42	
07.01.1903							24.7		37	
28.01.1903							24.8		42	
03.03.1903							24.8		44	
01.04.1903							24.8		38	
11.05.1903							24.8		40	
10.06.1903							24.8		40	
08.07.1903							24.6		38	
02.09.1902	14b S	3.935 S		15.822	162.993		25.6		45	Plafond, diverses fissures E-W
03.10.1902							25.6		48	
04.11.1902							25.9		48	
02.12.1902							25.9		49	
07.01.1903							26.0		46	
28.01.1903							26.0		52	
03.03.1903							26.0		53	
01.04.1903							26.0		52	
11.05.1903							26.2		52	
10.06.1903							26.1		52	
08.07.1903							26.0		52	
02.09.1902	14c S	3.935 S		15.822	162.993		25.0		41	Plafond, diverses fissures E-W
03.10.1902							24.8		39	
04.11.1902							24.7		39	
02.12.1902							24.6		40	
07.01.1903							24.6		37	
28.01.1903							24.6		41	
03.03.1903	14c S	3.935 S		15.822	162.993		24.5		43	
01.04.1903							24.5		38	
11.05.1903							24.5		38	
10.06.1903							24.5		38	
08.07.1903							24.3		38	

* Gesamthärte

HE Antigorio (rechter Tunnel)

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)
11.02.1902 ?.?.1907	19" S	4.046 S		15.731	162.882	240 16	22.8 28.3		41	
25.07.1901 ?.?.1907	18" S	4.007 S		15.770	162.921	50 3	26.9 27.2		47	
25.07.1901 ?.?.1907 ?.?.1912	17" S	4.030 S		15.747	162.898	50 120	25.3 29.1 25.5		38	
03.04.1903	18a" S	4.033 S		15.744	162.895	120	29.5		91	
11.01.1902 ?.?.1907 ?.?.1912	16" S	4.019 S		15.758	162.909	10 30	24.0 27.0 27.0			
25.07.1901 ?.?.1907	15" S	3.977 S		15.800	162.951	5 10	25.2 18.0		30	
25.07.1901 03.04.1903 ?.?.1907	14" S	3.968 S		15.809	162.960	2 10 5	25.0 26.9 18.0		30 75	
25.07.1901 03.04.1903	13" S	3.951 S		15.826	162.977	50 15	26.0 26.3		28 56	
25.07.1901 ?.?.1907	12" S	3.950 S		15.827	162.978	30 12	24.1 23.0		28	
25.07.1901 ?.?.1907	11" S	3.941 S		15.836	162.987	30 15	25.6 25.0		25	
25.07.1901 03.04.1903 ?.?.1907 ?.?.1912	10" S	3.933 S		15.844	162.995	5 60 30	26.0 30.8 26.0 21.0		30 84	
25.07.1901	9" S	3.930 S		15.847	162.998	10	27.0		35	
25.07.1901	8" S	3.928 S		15.849	163.000	10	27.0		35	
25.07.1901	7" S	3.926 S		15.851	163.002	100	28.0		39	
25.07.1901 ?.?.1907	6" S	3.883 S		15.894	163.045	200 0	25.8		16	
25.07.1901 ?.?.1907	5" S	3.858 S		15.919	163.070	60 2	25.4 23.0		16	
?.05.1901 ?.?.1907	4" S	3.780 S		15.997	163.148	40 0	26.1		14	
?.05.1901 ?.?.1907	3" S	3.730 S		16.047	163.198	30 0	27.3		22	
?.05.1901 ?.?.1907	2" S	3.478 S		16.299	163.450	1 0	27.3		9	
?.02.1901 ?.?.1907	1" S	2.897 S		16.880	164.031	20 0.5	31.5 28.7		8	

* Gesamthärte

Anhang 3.18

HE Antigorio (linker Tunnel)

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)	
23.07.1901	9 S	3.861 S	60/Q13	15.896	163.067	4000	30.3		56	Transv. 19. Plancher, côté SW, même fissure que 8 et 10, émerge de bas en haut Ca>Mg ; SO4	
03.09.1901						3000	30.8		64		
03.04.1902						1800	31.4		64		
02.07.1902						1500	31.5				
07.08.1902						1500	31.8		73		
03.10.1902						1200	32.0		69		
02.12.1902						1200	32.1		78		
07.01.1903						1200	32.2		76		
03.03.1903						1200	32.2		78		
01.04.1903						900	32.2		92		
11.05.1903						900	32.2		72		
10.06.1903						900	32.2		72		
08.07.1903						900	32.4		75		
11.06.1901	7 S	3.843 S		15.914	163.085	60	25.0		26		Plafond. Ca>Mg ; SO4
13.05.1901	5-6 S	3.824-827 S		15.933	163.104	300	28.0		32		Parois et plafond, fissure. Ca>Mg ; SO4.
11.06.1901							28.6		44		
05.01.1902							22.6		12		
11.02.1902							25.4		12		
7.10.1900	4 S	2.848 S		16.909	164.080	120	32.3		0,8		
7.08.1901						7					
7.10.1900	3 S	2.839 S		16.918	164.089	10	31.5		0,8		
7.08.1901						2					
7.10.1900	2 S	2.831 S		16.926	164.097	5	31.8		1,0		
7.08.1901						1					
7.08.1900	1 S	2.510 S		17.247	164.418	0,2	33.2		6		
7.08.1901						0					

HE Antigorio (rechter Tunnel)

Datum	Nr SCHARDT	Km SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Km ab Lausanne	Schüttung (l/min)	Temp. (°C)	TDS (mg/l)	G.H.* (°fr)	Bemerkungen nach SCHARDT (1898-1906)
11.02.1902	29" S	4.250 S		15.527	162.678	1	20.0			
? . ? .1907						3	19.6			
11.02.1902	28" S	4.098 S		15.679	162.830	1	21.0		12	
? . ? .1907						0				
11.02.1902	27" S	4.096 S		15.681	162.832	1	21.0		40	
03.04.1903						1	23.0		52	
? . ? .1907						0				
11.02.1902	26" S	4.095 S		15.682	162.833	1	22.8		32	
? . ? .1907						0				
11.02.1902	25" S	4.085 S		15.692	162.843	2	22.5		33	
? . ? .1907						2	19.2			
11.02.1902	24" S	4.074 S		15.703	162.854	1	22.5		46	
? . ? .1907						2	19.0			
11.02.1902	23" S	4.063 S		15.714	162.865	1	20.5		42	
03.04.1903						1	24.0		78	
? . ? .1907						0				
11.02.1902	21" S	4.049 S		15.728	162.879	20	22.5		41	
11.02.1902	22" S	4.051 S		15.726	162.877	35	23.7		53	
03.04.1903						30	28.9		88	
? . ? .1907						2	17.3			
11.02.1902	20" S	4.046 S		15.731	162.882	60	22.3		62	
03.04.1903						60	28.9		88	
? . ? .1907						30	27.3			

* Gesamthärte

Linke Tunnelröhre (NW)

Nr	Km ab Lausanne	Km ab Nordportal	Parament
1	147.364	0.193	1.0 links
2	147.364	0.193	0.0 rechts
3	147.365	0.194	0.0 links
4	147.370	0.199	Querstollen
5	147.374	0.203	0.0 Nische link
6	149.620	2.449	0.30 links
7	149.663	2.492	0.60 links
8	150.109	2.938	2.50 links
9	150.129	2.958	3.40 links
10	150.133	2.962	rechts
11	150.189	3.018	1.0 links
12	150.193	3.022	Doppelquelle 1.0 links
13	150.197	3.026	0.0 links
14	151.834	4.663	1.80 rechts
15	157.005	9.834	rechts
16	157.007	9.836	rechts
17	157.008	9.837	rechts
18	157.009	9.838	links
Q2/19	157.037	9.866	0.0 links
20	157.039	9.868	0.50 links
21	157.040	9.869	0.10 links
22	157.041	9.870	0.10 links
23	157.041	9.870	rechts
24	157.042	9.871	rechts
25	157.046	9.875	0.10 links
26	157.047	9.876	0.10 links
27	157.048	9.877	0.10 links
28	157.054	9.883	links Rohr
29	157.054	9.883	rechts Rohr
30	157.131	9.960	0.50 links
31	157.135	9.964	0.30 rechts
32	157.148	9.977	links Rohr
33	157.149	9.978	links Rohr
Q3/34	157.150	9.979	links Rohr
35	157.151	9.980	links rundes Loch
36	157.270	10.099	0.30 links
37	157.272	10.101	
38	157.338	10.167	1.0 rechts
39	157.341	10.170	0.0 links
40	157.465	10.294	First links
Q6/41	157.467	10.296	links
42	157.510	10.339	0.0 links
43	157.567	10.396	1.50 links
44	157.745	10.574	0.0 rechts
Q11/45	157.746	10.575	0.20 links
46	157.750	10.579	0.20 links
47	157.754	10.583	0.50 links
48	157.766	10.595	0.20 links
49	157.820	10.649	0.20 links
50	157.822	10.651	0.30 links
51	157.823	10.652	0.0 links
52	157.830	10.659	0.00 links
53	157.833	10.662	0.10 links
54	157.834	10.663	0.3 links
55	162.525	15.354	3.0 links Rohr
56	162.525	15.354	rechts Kaverne
57	162.530	15.359	rechts Kaverne
58	162.566	15.395	0.10 links
59	163.058	15.887	Quergang
Q13/60	163.058	15.887	Quergang
61	163.064	15.893	0.10 links

Rechte Tunnelröhre (SE)

Nr	Km ab Lausanne	Km ab Nordportal	Parament
62	149.631	2.480	Nische links
63	149.668	2.517	0.30 Sinterquelle links
64	150.101	2.950	0.20 rechts
Q0/65	151.015	3.864	Doppelquelle links
F3/66	153.700	6.619	Nische
F4/67	154.961	7.819	Nische
68	155.106	7.955	Tropfenquelle rechts
Q1/69	155.692	8.541	Tropfenquelle rechts
70	156.350	9.199	Brunnen
71	157.028	9.877	0.10 rechts
72	157.029	9.878	0.20 links

Rechte Tunnelröhre (SE)

Nr	Km ab Lausanne	Km ab Nordportal	Parament
73	157.029	9.878	0.50 rechts
Q4/74	157.031	9.880	0.50 Doppelquelle rechts
75	157.031	9.880	0.30 links
76	157.033	9.882	0.50 Doppelquelle rechts
77	157.100	9.949	0.50 rechts
78	157.103	9.952	DQ links
79	157.104	9.953	rechts
Q5/80	157.140	9.989	0.20 links
81	157.141	9.990	0.50 rechts
82	157.169	10.018	0.20 rechts
83	157.234	10.083	0.50 Doppelquelle rechts
84	157.240	10.089	0.50 Doppelquelle rechts
85	157.243	10.092	0.20 Doppelquelle rechts
86	157.244	10.093	0.60 Rohr rechts
87	157.246	10.095	0.30 Nische rechts
88	157.329	10.178	0.20 rechts
89	157.330	10.179	0.10 links
90	157.332	10.181	2.20 Rohr links
91	157.334	10.183	0.10 links
92	157.336	10.185	0.50 Block links
93	157.343	10.192	0.20 links
94	157.344	10.193	0.10 links
95	157.346	10.195	0.60 Doppelquelle rechts
96	157.346	10.195	0.20 links
97	157.349	10.198	0.20 rechts
98	157.351	10.200	0.50 rechts
99	157.357	10.206	0.20 Doppelquelle rechts
100	157.360	10.209	0.50 Doppelquelle rechts
101	157.361	10.210	0.10 Rohr
102	157.363	10.212	1.0 Rohr
103	157.375	10.224	0.60 Eisenschacht rechts
104	157.377	10.226	0.60 rechts
105	157.380	10.229	0.50 links
106	157.381	10.230	0.40 rechts
107	157.383	10.232	0.30 links
108	157.391	10.240	0.60 rechts
109	157.395	10.244	0.40 rechts
110	157.397	10.246	0.40 rechts
111	157.440	10.289	0.40 rechts
112	157.443	10.292	0.20 Doppelquelle rechts
113	157.445	10.294	0.50 rechts
114	157.448	10.297	0.20 rechts
F1/115	157.518	10.367	Nische
116	157.549	10.398	0.10 rechts
117	157.554	10.401	0.50 rechts
Q7/118	157.564	10.413	0.70 rechts
119	157.566	10.415	0.0 rechts
Q8/120	157.581	10.430	0.30 rechts
Q9/121	157.718	10.566	0.3 rechts
122	157.720	10.569	0.10 rechts
123	157.721	10.570	1.80 Doppelquelle rechts
124	157.722	10.571	0.30 rechts
125	157.725	10.574	0.3 rechts
126	157.726	10.575	0.20 rechts
127	157.732	10.581	0.10 links
128	157.806	10.655	0.20 rechts
129	157.807	10.656	0.10 rechts
130	157.808	10.657	0.60 Doppelquelle rechts
Q10/131	157.818	10.667	0.60 rechts
132	157.818	10.667	0.20 rechts
133	157.821	10.670	0.50 rechts
134	157.822	10.671	0.20 rechts
135	157.824	10.673	
136	157.826	10.675	
137	157.829	10.678	0.20 links
138	157.829	10.678	Schacht links
139	157.851	10.700	Rohr rechts
140	162.505	15.354	Schacht rechts
Q12/141	162.511	15.360	Schacht rechts
142	162.514	15.363	Schacht rechts
143	162.516	15.365	Schacht rechts
144	162.520	15.369	Schacht links
145	162.522	15.371	Schacht links
146	162.525	15.372	Schacht rechts
147	162.537	15.396	Kaverne
148	162.566	15.415	2.0 Nische
149	162.566	15.415	0.0 Nische
150	162.567	15.416	Kaverne 3 Quellen

HE	Nr SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Temperatur (°C)					El. Leitfähigkeit (µS/cm)					Schüttung (l/min)					
				I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	
				12/87	4/88	8/88	2/89	12/89	12/87	4/88	8/88	2/89	12/89	12/87	4/88	8/88	2/89	12/89	
SC	2 N	1	0.193	9.1	9.8	9.5		9.3	673	638					50	10			30
SC	2 N	2	0.193	8.9	9.5	14.0	8.7	8.2	672	660	636	685	630		10	0.5	25	30	
SC	2 N	3	0.194	9.1	9.7	9.5		8.8	683	666			625	10	10			35	
SC	2 N	4	0.199	9.4	9.9	9.6	9.5	9.5	689	683		705	627	50	20		45	40	
SC	2 N	5	0.203	9.3	9.6	10.2		8.5	672	660	663		622	20	25	20		0.5	
SC	11 N	6	2.449	11.0	11.5	12.0	10.9	10.4	473	478	481	483	451	70	20	25	70	50	
SC	16 N	7	2.492	11.0	11.5	11.9	11.2	10.6	478	472	466	482	445	15	40	50	27	20	
SC		8	2.938	12.4	13.6	13.0		12.4	458	453			430	20				60	
SC	33 N	9	2.958	14.0	15.0	13.0			454	432				2	1			0	
SC	33 N	10	2.962	14.0	15.1	14.6				437					1			0.5	
SC	40 N	11	3.018	19.8	20.0	19.9		19.4	468	457			432	0.5	1			1.2	
SC	41 N	12	3.022	20.4	19.9	20.5	19.4	19.2	456	449	444	460	425	1	5	3	8	7	
SC	42 N	13	3.026	20.6	20.4	20.8	19.5	20.2	450	446	443	458	404	1	3	4	15	1	
Be	55 N	14	4.663	20.9	21.0	21.8	20.0	21.1	2900	2680	2650	2910	2460	0.5	1	1	1	0.5	
Vg	114 N	15	9.834	32.9	32.6	33.1	31.0	33.0	1267	1185	1190	1265	1127	2	3	7	2	20	
Vg	114 N	16	9.836	33.1	33.1	33.1	32.5		1186	1186		1216		4	4		12		
Vg	114 N	17	9.837	30.7	30.7	33.3	30.7		1214	1214	1170	1240		2	2	5	1	0	
Vg	114 N	18	9.838	34.3	34.3	30.8	33.0		1184	1184	1170	1230		6	6	1	15	0	
Vg	115 N	19/Q2	9.866	34.5	34.7	34.7	34.5	33.0	1196	1182	1142	1218	1189	20	20	30	50	30	
Vg		20	9.868	34.5	33.7	34.5	32.9	33.2	1195	1172	1141	1210	1093	10	10	8	8	7	
Vg	116 N	21	9.869	35.0	34.4	34.8	33.8	33.6	1193	1171	1141	1210	1085	20	20	15	30	25	
Vg		22	9.870	34.8	32.5	33.6	33.9	33.6	1194	1170	1141	1216	1090	5	4	10	25	10	
Vg		23	9.870	33.0	32.5	33.3	32.2	32.3		1170	1150	1218	1125		2	4	3	1.5	
Vg		24	9.871	33.6	33.5	33.7	33.2	33.9		1170		1220	1090		3	1	10	30	
Vg	117 N	25	9.875	32.7	35.1	35.1	34.9	33.8	1200	1167	1140	1210	1085	90	30	25	25	20	
Vg		26	9.876	34.8	34.8	34.9	34.7	34.3		1167	1140	1210	1085		20	12	20	40	
Vg		27	9.877	34.7	34.8	34.9	34.6		1194	1165	1140	1210		20	40	30	50		
Vg		28	9.883	34.0	34.2	34.3	33.8		1192	1186		1219		0.5	2		0.5	0	
Vg		29	9.883	24.7	24.6		29.5	33.5	1212	1158	1140	1213	1052	20	30	35	40	30	
Vg	121 N	30	9.960	22.1	22.2	22.5	22.1	22.3	1230	1221	1150	1279	1156	7	7	7	8	8	
Vg		31	9.964	17.4	22.7	23.5	22.3	22.4	1249	1229	1160	1269	1143	0.2	1.5	0.5	1	1	
Vg	122 N	32	9.977	16.5	16.6	16.6	16.9	17.2	1252	1240	1160	1312	1179	30	40	60	70	40	
Vg		33	9.978	16.1	16.4	16.3	16.5	16.5	1252	1240	1160	1304	1172	10	35	30	25	25	
Vg	123 N	34/Q3	9.979	16.0	16.2	16.1	16.2	16.3	1254	1245	1160	1310	1175	50	50	70	70	70	
Vg		35	9.980	16.6	16.7	16.7	16.8	16.7	1253	1246	1160	1302	1168	15	15	15	20	20	
Vg	126 N	36	10.099	18.1	18.2	18.3	18.2	18.3	1251	1229	1160	1298	1175	15	25	20		20	
Vg	126 N	37	10.101	20.6	20.7	20.8		20.6	1242	1230	1150		1154	10	15	15		8	
Vg		38	10.167	18.6	18.9	18.7		20.5	1244	1235			1123	4	5			5	
Vg	127 N	39	10.170	18.1	18.2	18.1		21.5	1245	1236				12	10			15	
Vg		40	10.294	21.5	23.8	24.4	21.9	21.7	1247	1224	1174	1282	1185	20	15	70	70	15	
Vg	134 N	41/Q6	10.296	29.2	29.4	29.3	29.2	28.4	1234	1200	1178	1237	1112	50	35	80	70	30	
Vg	138 N	42	10.339	26.2	26.5	26.5	26.3	25.6	1209	1183	1156	1239	1102	20	35	35	20	20	
Vg		CANAL	10.369	20.8					1224										
Vg	141 N	43	10.396	21.5	21.3	21.6	21.4				1165	1237			2	20	25		
Vg	91 S	44	10.574	30.8	30.9	30.1	29.8		1760	1690	1642	1758		30	60	70	75		
Vg	89 S	45/Q11	10.575	32.6	34.7	34.7	34.6	33.5	1738	1655	1626	1732	1545	5	50	50	40	35	
Vg	90 S	46	10.579	34.5	33.2	33.2	33.1	33.2	1736	1665	1641	1744	1545	40	50	35	25	20	
Vg	87 S	47	10.583	33.1	32.7	32.7	32.6	32.5	1743	1669	1648	1743	1561	20	17	8	20	20	
Vg		48	10.595	30.3	30.1	31.7	30.1	31.2	1747	1672	1648	1736	1558	2	3	10	1	3	
Vg	86 S	49	10.649	25.1	25.2	25.2	25.1	25.2	1357	1323	1300	1355	1227	10	20	15	15	15	
Vg	86 S	50	10.651	24.9	24.5	25.1	24.4	24.7	1356	1315	1297	1342	1227	5	4	1.5	1	1.2	
Vg	86 S	51	10.652	25.1	25.2	25.2	24.6	25.0	1356	1315	1296	1343	1230	20	40	25	18	20	
Vg		52	10.659	24.9	25.0	25.1		24.5	1357	1314	1290		1224	5	4	2		8	
Vg		53	10.662	25.2	25.4	25.4	25.3	25.3	1383	1325	1320	1375		30	50	40	60		
Vg		54	10.663	25.0	25.0	25.4		23.6	1363	1343	1330		1230	3	4	0.5		2	
Tg	38 S	55	15.354	20.0	16.1	12.5	15.4	16.4	1142	1345	990	1267	1253	20	30	20	24	15	
Tg	40 S	56	15.354	13.2	17.8	15.0	17.3	17.4	1132	1335		1341	1285	2000	3000			1200	
Tg	36-37 S	57	15.359	14.0	15.0	13.5	14.4	15.3		1360	979	1299	1285		600	690	450	900	
Tg	34 S	58	15.395	9.5	9.6	8.9	10.3	10.2		1145	1084	1245		2	2.5	4	3	1.5	
An	8 S	59	15.887	27.0	26.4	27.8	26.5		357	569	322	422	479		8	5	2		
An	9 S	60/Q13	15.887	21.1	21.2	21.5	21.0	21.6	251	290	249	263	263		35	15	12	10	
An		61	15.893	20.8	20.8	21.9	20.8	20.6	239	273	257	245	249	3	10	7	8	5	

Physikalische Charakteristiken der während der 5 Kampagnen ausgewählten Quellen
(linke Tunnelröhre)

HE	Nr SCHARDT	Nr CRSFA	Km ab Nordportal	Temperatur (°C)					El. Leitfähigkeit (µS/cm)					Schüttung (l/min)				
				I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
				12/87	4/88	8/88	2/89	12/89	12/87	4/88	8/88	2/89	12/89	12/87	4/88	8/88	2/89	12/89
SC	15" N	62	2.480	16.9	15.5	15.9	13.8	15.0	430	503	453	441	443	2	1	1	1	0.5
SC	19" N	63	2.517	13.7	14.4	14.0		13.8	454	457			432	0.5	2			0.5
SC	35" N	64	2.950	16.2	16.8	16.4	16.0	16.2	443	445	437	436	431	5	7	6	6	1.5
SC	56" N	65/Q0	3.864	20.5	22.3	21.1		22.1	1666	1631			1532	2	2			0.5
Be	-61" N	66/F3	6.619					(38,4)					(850)					(9)
Be	-69" N	67/F4	7.819					(29,2)					(7320)					(0,1)
Be	70" N	68	7.955	22.3	23.4	22.8		26.6	4050	3740			3650	3	1			0.5
Be	72" N	69/Q1	8.541	30.5	29.5	33.3	32.1		3990	3840	3690	3690		1	0.5	0.5	0.5	1
Be	77" N	70	9.199	23.8	24.5	25.1	22.5	24.3	2760		2700	2630	2540	7	15	10	10	7
Vg		71	9.877	32.7	33.0	32.4	33.0	32.2	1195	1174	1163	1162	1102	2	5	5	3	0.5
Vg		72	9.878	30.2	30.0	31.3	30.7	29.1	1204	1185	1157	1152	1114	4	10	5	7	8
Vg		73	9.878	32.3	32.5	32.7	32.0	31.9	1199	1182	1147	1138	1103	10	15	3	1	1.5
Vg	85" N	74/Q4	9.880	32.3	32.4	32.2	28.7	30.4	1200	1182	1154	1155	1104	0.5	3	1	2	0.5
Vg		75	9.880	29.8	29.0	30.2	30.0	27.9	1209	1206	1161	1155	1118	0.5	5	1	8	0.5
Vg		76	9.882	29.8	29.2	30.5	32.2	29.5	1211	1291	1159	1151	1113	0.5	4	0.5		0.2
Vg		77	9.949	23.2	22.7	23.8		21.1	1240	1222	1169		1154	0.5	10	2	6	9
Vg		78	9.952	24.4	22.8	23.1	24.1	22.2	1246	1222	1165	1193	1146	15	25	10	10	45
Vg		79	9.953	21.4	21.4	21.6	21.3	21.2	1243	1225	1156	1196	1154	15	30	25	21	30
Vg		80/Q5	9.989	16.7	16.7	16.8	16.7	17.0	1243	1239	1160	1222	1170	4	10	7		8
Vg	87" N bis	81	9.990	17.4	17.4	18.2		17.3	1238	1236	1162		1175	1	5	5	3	2
Vg		82	10.018	20.1	20.1	21.1	20.3	19.8	1230	1225	1152	1196	1158	5	18	18	10	10
Vg		83	10.083	16.5	16.5	17.3	17.1	16.8	1248	1242	1174	1214	1186	15	40	50	25	32
Vg		84	10.089	15.5	15.7	18.2	15.7	15.9	1245	1242	1159	1221	1222	40	100	100	60	50
Vg	89" N	85	10.092	15.2	15.2	15.3	15.2	15.6	1246	1244	1153	1215	1180	10	30	40	20	18
Vg		86	10.093	15.2	15.3	15.3	15.6	15.4	1248	1245	1153	1215	1180	5	12	12	12	24
Vg		87	10.095	15.6	15.6	16.1	16.3	15.6	1247	1240	1167	1194	1171	5	25	30	20	22
Vg		88	10.178	30.7	30.8	30.9	30.1	29.6	1198	1180	1140	1092	1102	1	15	7		8
Vg	74" S	89	10.179	19.5	19.5	20.4		19.1	1236	1231	1173		1162	45	40	43	35	15
Vg		90	10.181	19.1	19.8	19.8	19.2	19.2	1236	1238	1166	1052	1163	10	20	15	15	15
Vg		91	10.183	18.6	18.6	18.4	18.6	18.5	1236	1236	1163	1161	1161	5	15			10
Vg	91" N	92	10.185	18.3	18.3	18.3		18.2	1237	1232			1160	2	5			2
Vg		93	10.192	17.3	18.3	18.0		17.5	1238	1237			1171	2	7			1
Vg	73" S	94	10.193	18.3	18.3	18.3		17.5	1238	1234			1175	30	60	60	35	60
Vg		95	10.195	17.5	17.1	17.7	17.4	17.3	1237	1237	1172	1167	1175	3	4			4
Vg	92" N	96	10.195	17.0	18.3	17.8		17.5	1242	1234			1173	2	7			6
Vg		97	10.198	17.2	17.6	17.3		17.2	1240	1243			1175	30	32	35	25	45
Vg	93" N	98	10.200	17.1	17.1	18.1	17.6	17.2	1241	1237	1162	1167	1172	5	15			4
Vg		99	10.206	17.3	17.7	17.5		17.3	1240	1232			1178	10	25	25	15	25
Vg		100	10.209	20.2	20.3	20.6		20.1	1230	1224	1169	1150	1154	3	8			2
Vg		101	10.210	20.3	20.3	20.3		19.8	1231	1227			1111	40	36	32	35	20
Vg		102	10.212	20.3	20.3	21.6	20.5	20.3	1230	1224	1168	1161	1162	7	18			15
Vg		103	10.224	22.7	22.7	22.7		22.5	1232	1222			1155	2	8			1
Vg		104	10.226	23.3	23.2	23.4		22.5	1234	1220			1188	2	8			1
Vg		105	10.229	21.4	21.4	21.6	21.5	21.2	1230	1221	1158	1154	1165	28	32	28	30	30
Vg		106	10.230	23.8	23.9	24.0	23.7	23.3	1235	1221	1165	1146	1158	35	40	35	24	36
Vg		107	10.232	21.4	21.5	21.6		23.5	1230	1224			1046	5	10			4
Vg		108	10.240	20.6	20.7	20.6		20.4	1237	1217			1247	2	8			4
Vg		109	10.244	22.6	22.7	22.6		22.8	1227	1220			1233	1	5			3
Vg	71" S	110	10.246	25.7	25.7	25.9	25.2	25.2	1237	1221	1172	1043	1235	3	15	35	4	8
Vg		111	10.289	21.2	21.2	21.7	21.2	21.2	1244	1235	1179	1159	1254	15	25	30	12	25
Vg		112	10.292	25.0	25.1	25.0		24.6	1226	1212			1225	7	15			8
Vg		113	10.294	23.1	23.2	23.1	23.1	22.8	1231	1212			1237	2	3		0.3	2
Vg		114	10.297	24.7	23.8	25.0	23.9	23.6	1226	1213	1152	1078	1231	0.5	1	1	1	0.5
Vg	70" S	115/F1	10.367	36.8	34.8		35.7		1592	1510			1417	5	10	0.5	3	(60)
Vg	68" S	116	10.398	32.2	33.4				1602	1534				2	4	0.5		
Vg		117	10.401	40.1	40.3	39.2	38.6	38.4	1692	1625	1605	1511	1612	15	20	2	5	8
Vg		118/Q7	10.413	38.0	37.3	36.9	34.8	33.5		1625	1605	1447	1571	5	5	5	5	5
Vg		119	10.415	34.7	34.8	34.3	34.8	33.5	1471	1425	1395	1310	1401	20	22	14	18	16
Vg		120/Q8	10.430	31.8	31.9	31.9	32.0	31.8	1747	1674	1650	1578	1674	25	15	20	22	35
Vg	67" S	121/Q9	10.566	31.3	30.7	31.7	31.1	30.0	1744	1679	1650	1565	1668	8	4	4	10	3
Vg		122	10.569	31.0	30.8	31.8	30.7	29.9	1748	1675	1650	1578	1642	20	20	25	20	10
Vg		123	10.570	31.7	31.3	31.9	31.8	30.9	1744	1670	1650	1577	1666	3	5	12	3	2
Vg		124	10.571	31.7	31.3	31.9	31.8	30.9	1744	1678	1650	1579		70	50	60		
Vg		125	10.574	31.8	31.9	32.0	32.0		1747	1678	1650	1579	1669	15	15	12	70	30
Vg		126	10.575	31.7	31.8	31.9	32.0	31.2	1747	1678	1650	1579	1664	10	10	15	10	4
Vg		127	10.581	30.2	30.3	30.6	29.8	29.9	1732	1670	1640	1570	1664	60	40	30	20	80
Vg		128	10.655	25.2	25.7	25.2	24.8	25.2	1652	1603	1570	1508	1601	70	50	100	60	60
Vg		129	10.656	25.0	25.0	25.2	24.9	24.8	1655	1598	1570	1505	1591	80	90	75	56	50
Vg		130	10.657	25.1	25.1	27.2	24.9	25.0	1655	1597	1570	1511	1591	80	120	80	20	90
Vg		131/Q10	10.667	26.1	24.6	26.3	26.1											

Probe	Nr	Datum	Temperatur (°C)	El. Leitf. (µS/cm)	Schüttung (l/min)	pH	Eh (mV)	TDS (mg/l)	Li (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	Sr (mg/l)	F (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	SiO2 (mg/l)	Kationen (meq/l)	Anionen (meq/l)	Tritium (TU)	Deuterium (‰)	Sauerstoff-18 (‰)
SPN - 1	KANAL	24-Jan-92	12.4	722	1350			630	<0.1	46	1.9	20	106	2.9	0.4	2.5	250	191	9.5	9.1	8.4			
499	Q0	19-Dez-90	22.3	1660	3	7.83	-55	1652	0.02	118	6.5	83	242	10.3	0.4	0.3	1106	68	16.6	24.4	24.2	0.8	-112.3	-15.83
377	F3	19-Okt-90	40.3	1045	17	8.69		850	0.05	250	2.6	0.1	4.1	0.3	1.8	10.0	379	173	28.0	11.2	11.1	<1,1	-91.4	-13.15
477	F3	19-Dez-90	39.3	911	14	8.89	-293	777	0.04	215	2.2	0.1	3.0	0.3	1.7	8.1	340	182	24.2	9.6	10.4	<0.9	-90.2	-12.98
877	F3	24-Okt-91	38.5	857	9	9.31	-300	726	<0.1	205	2.0	0.1	4.2	0.3	1.7	6.4	290	191	24.8	9.2	9.4	<0.8		-13.06
977	F3	08-Apr-92	38.4	850	9	9.01	-306	718	0.03	197	2.7	0.2	4.8	0.3	1.7	6.2	287	194	23.5	8.9	9.4	<0.6		-13.12
Q1-2	Q1	18-Apr-88	29.5	3840	0.5	7		3769	0.90	765	22.5	98	270		1.0	8.5	2006	571	26.3	55.5	51.4			
Q1-4	Q1	19-Feb-89	32.1	3690	0.5	7.1		4363	0.90	877	18.0	101	276	5.1	1.2	9.1	2416	625	34.2	60.9	60.9			
475	Q1	19-Dez-90	32.1	4020	1	6.85	-25	4256	0.98	810	19.8	102	292	5.7	1.2	8.0	2375	595	45.0	59.0	59.5	0.3	-100.6	-14.83
875	Q1	24-Okt-91	33.2	4020	0.6	7.04	-45	4010	1.20	730	16.0	102	254	7.3	1.0	8.2	2250	598	41.3	53.6	56.9	<0.6		-14.87
978	F4	08-Apr-92	29.2	7320	0.01	6.06	-195	7877	26	1515	26.0	77	505	10.9	1.0	439	3290	1838	35.3	106	111	<1.0		-14.08
Q2-1	Q2	18-Dez-87	34.5	1196	20	7.9		1183	<0.1	3.1	3.9	26	300		0.2	0.3	761	82	6.7	17.2	17.2			
Q2-4	Q2	19-Feb-89	34.5	1218	50	7.8		1236	<0.1	1.7	2.6	26	312	4.3	0.3	1.1	780	103	5.6	17.9	18.0			
Q3-1	Q3	18-Dez-87	16.0	1254	50	7.8		1207	<0.1	2.1	3.0	25	310		0.2	0.3	780	81	5.5	17.6	17.6			
Q3-4	Q3	19-Feb-89	16.2	1310	70	8.0		1330	<0.1	1.6	2.6	20	334	4.3	0.3	0.5	857	104	4.9	18.5	19.6			
Q4-1	Q4	18-Dez-87	32.3	1200	10	7.7		1196	<0.1	3.7	3.2	24	309		0.2	0.4	770	81	4.9	17.6	17.4			
Q4-3	Q4	23-Aug-88	32.2	1154	3	7.5		1227	<0.1	1.9	2.7	28	307		0.2	0.3	803	79	5.0	17.8	18.0			
Q4-4	Q4	19-Feb-89	28.7	1155	1	7.7		1292	<0.1	2.4	2.6	29	314	4.7	0.3	1.0	832	101	4.7	18.3	19.0			
493	Q4	18-Dez-90	31.9	1175	4	7.32	112	1146	0.02	1.7	2.9	25	289	4.2	0.2	0.2	740	76	6.3	16.7	16.7	34.4	-91.0	-12.91
Q5-1	Q5	18-Dez-87	16.8	1243	15	8.0		1209	<0.1	3.2	3.3	21	313		0.2	0.3	782	82	4.2	17.6	17.6			
Q5-2	Q5	18-Apr-88	16.7	1239	30	7.7		1254	<0.1	4.0	2.4	30	316		0.2	1.2	813	81	6.4	18.5	18.3			
Q5-3	Q5	23-Aug-88	16.8	1160	25	7.8		1180	<0.1	1.8	2.7	24	300		0.2	1.5	757	88	5.0	17.1	17.3			
Q5-4	Q5	19-Feb-89	16.7	1222	21	8.1		1320	<0.1	1.3	2.6	20	336	4.3	0.2	0.5	844	107	4.4	18.6	19.4			
494	Q5	18-Dez-90	16.8	1223	18	7.52	171	1297	0.02	1.6	3.0	22	321	4.2	0.2	0.3	861	78	5.4	18.1	19.2	32.4	-91.4	-12.83
Q6-1	Q6	18-Dez-87	29.2	1234	50	7.9		1192	<0.1	2.9	3.1	28	310		0.2	0.1	759	82	6.2	18.0	17.2			
Q6-2	Q6	18-Apr-88	29.4	1200	35	7.4		1323	<0.1	3.4	2.9	33	310		0.1	1.4	886	81	5.3	18.4	19.8			
Q6-3	Q6	23-Aug-88	29.3	1178	80	7.50		1247	<0.1	2.4	2.9	22	315		0.3	1.0	810	88	5.7	17.7	18.4	40	-92.4	-12.96
Q6-4	Q6	19-Feb-89	29.2	1237	70	7.9		1301	<0.1	2.1	2.4	30	317	4.4	0.3	0.5	833	106	5.8	18.5	19.1	38	-95.9	-13.1
276	F1	30-Mai-90	44.2	1170	200	7.24	-220	1217	0.03	4.4	1.3	26	302	5.0	0.4	0.2	778	84	14.2	17.6	17.6	14.8	-89.9	-12.89
476	F1	18-Dez-90	45.1	1408	>150	7.30	-90	1552	0.03	6.2	2.0	34.0	410	5.6	0.3	0.5	1004	76	12.9	23.0	22.2	43.8	-88.3	-12.77
976	F1	08-Apr-92	45.0	1437	60	7.15	-155	1656	0.03	5.2	3.0	35	394	7.2	0.4	0.4	1118	79	12.8	23.0	24.6	30.0		-12.83
Q7-1	Q7	18-Dez-87	40.1	1693	0.5	7.7		1902	<0.1	10.3	2.6	38	475		0.3	0.3	1288	79	9.0	27.3	28.1			
Q7-2	Q7	18-Apr-88	40.3	1617	20	7.7		1835	<0.1	10.2	2.9	45	470		0.2	1.6	1212	84	9.2	27.7	26.7			
Q7-3	Q7	23-Aug-88	39.2	1605		7.3		1869	<0.1	8.6	2.6	49	463		0.3	2.3	1242	92	9.3	27.6	27.4	48	-89.8	-12.77
Q7-4	Q7	19-Feb-89	38.6	1511	5	7.5		1934	<0.1	7.3	2.7	35	492	6.4	0.3	0.5	1278	103	8.7	28.0	28.3	48	-93.3	-12.64
479	Q7	18-Dez-90	39.5	1595	4	7.21	125	1921	0.03	6.5	2.8	38	485	6.8	0.3	0.3	1290	79	12.0	27.8	28.2	46.4	-87.4	-12.25
Q8-1	Q8	18-Dez-87	34.1	1471	20	7.8		1566	<0.1	7.3	2.7	31	400		0.3	0.3	1034	81	9.0	22.9	22.9			
Q8-2	Q8	18-Apr-88	34.8	1425	22	7.3		1547	<0.1	6.2	2.6	35	399		0.2	1.7	1049	82	6.6	23.1	23.2			
Q8-3	Q8	23-Aug-88	34.3	1395	14	7.3		1612	<0.1	6.4	2.9	49	389		0.3	1.1	1062	93	7.9	23.8	23.7			
Q8-4	Q8	19-Feb-89	34.8	1310	18	7.5		1656	<0.1	4.9	2.6	34	404	5.6	0.3	0.7	1090	106	7.6	23.4	24.5			
495	Q8	18-Dez-90	34.3	1495	10	7.31	-200	1597	0.04	4.8	3.0	34	403	6.0	0.2	0.5	1060	75	9.4	23.4	23.3	35.3	-88.5	-12.88
Q9-1	Q9	18-Dez-87	31.8	1747	25	7.8		1936	<0.1	6.2	2.5	41	493		0.3	0.3	1300	84	8.9	28.3	28.5			
Q9-2	Q9	18-Apr-88	31.9	1674	15	7.5		1912	<0.1	6.4	2.5	30	489		0.2	0.9	1288	88	6.6	27.2	28.3			
Q9-3	Q9	23-Aug-88	31.9	1650	20	7.5		1993	<0.1	6.1	2.7	45	497		0.3	1.9	1335	96	9.2	28.8	29.4			
Q9-4	Q9	19-Feb-89	32.0	1578	22	7.6		1935	<0.1	4.4	2.4	42	508	6.6	0.3	0.3	1260	104	7.4	29.2	28.0			
496	Q9	18-Dez-90	31.8	1698	37	7.37	-170	2074	0.02	4.4	2.8	40	509	7.8	0.2	0.5	1415	84	9.2	29.2	30.9	43.0	-88.8	-12.78
Q10-1	Q10	18-Dez-87	26.1	1681	-80	7.8		1840	<0.1	5.0	3.0	36	465		0.2	0.1	1242	81	7.9	26.5	27.2			
Q10-2	Q10	18-Apr-88	24.6	1620	-120	7.5		1765	<0.1	4.2	2.4	10	466		0.2	1.1	1191	83	7.3	24.3	26.2			
Q10-3	Q10	23-Aug-88	26.3	1600	-80	7.5		1875	<0.1	4.4	2.4	39	473		0.3	2.8	1254	92	7.1	27.1	27.7	54	-88.2	-12.7
Q10-4	Q10	19-Feb-89	26.1	1524	-20	7.7		1921	<0.1	6	2.1	39	477	6.8	0.3	1.0	1274	108	7.0	27.5	28.3	50	-91.8	-12.66
480	Q10	18-Dez-90	26.4	1628	-70	7.42	-188	1818	0.03	3.0	2.6	37	473	7.1	0.2	0.3	1205	80	8.2	27.0	26.4	47.3	-86.5	-12.61
Q11-1	Q11	18-Dez-87	34.5	1736	40	7.9		1630	<0.1	19.3	2.6	43	478		0.3	0.3	991	85	10.5	28.2	22.1			
Q11-2	Q11	18-Apr-88	34.7	1655	50	7.5		1859	<0.1	8.8	2.8	38	484		0.20	1.3	1226	92	6.0	27.7	27.1			
Q11-3	Q11	23-Aug-88	34.7	1626	50	7.3		1909	<0.1	8.4	2.6	40	484		0.3	1.4	1270	99	12.3	27.8	28.1			
Q11-4	Q11	19-Feb-89	34.6	1732	40	7.9		1980	<0.1	6.5	2.5	44	494	6.9	0.3	1.3	1314	101	9.5	28.7	29.1			
Q12-2	Q12	18-Apr-88	16.0	1345	-800	7.6		1393	<0.1	3.2	5.2	23	361		0.10	1.2	909	85	5.6	20.2	20.4			
Q12-3	Q12	23-Aug-88	12.3	970	-120	7.8		964	<0.1	2.3	3.9	19	240		0.3	1.6	597	94	6.4	13.7	14.0	29	-90.1	-12.82
Q12-4	Q12	19-Feb-89	14.2	1195	-120	7.9		1350	<0.1	2.4	4.7	23	340	4.6	0.1	0.6	855	112	7.2	19.2	19.7	31	-93.1	-12.77
498	Q12	18-Dez-90	14.8	1325	-400	7.53	200	1252	0.01	2.6	5.2	20	336	5.3	0.1	0.2	790	83	9.3	18.8	17.8	29.1	-90.2</	

Im Simplon-Tunnel auf der Nordseite beobachtete Gesteinstemperaturen

Entfernung ab Nordportal [m]	Temperatur [°C]	
50	9.6	
100	10.6	
200	10.8	
300	12.2	
400	12.8	
500	14.5	
600	15.1	
700	15.9	
800	15.9	
900	16.4	
1000	16.7	
1200	17.4	
1400	18.4	
1600	19.7	
1800	20.0	
2000	20.8	
2200	21.0	
2400	21.2	
2600	22.2	
2800	23.9	
3000	26.0	
3200	26.8	
3400	27.8	
3664	28.6	
3800	28.6	
4000	28.5	
4200	28.9	
4400	29.4	
4600	30.2	
4800	31.0	
5000	32.0	
5200	32.5	
5400	33.9	
5600	34.1	
5800	35.4	
6000	36.8	
6200	39.0	
6400	38.6	
6614	42.3	
6800	42.9	
7000	44.8	
7200	49.8	
7344	52.2	
7460	53.0	
7504	53.6	
7572	54.1	
7801	55.2	
7981	55.2	
8110	55.4	
8197	53.7	
8466	54.5	
8609	54.0	
8804	53.0	
9041	52.4	
9264	52.1	
9311	51.9	
9405	50.0	
9450	51.0	
9612	49.0	
9702	48.6	
9807	48.2	
9860	49.5	
9900	49.0	
9928	48.0	
10020	47.5	
10047	48.5	
10096	47.5	
10164	46.0	
10279	47.0	
10314	47.5	
10376	Durchschlag	

Im Simplon-Tunnel auf der Südseite beobachtete Gesteinstemperaturen

Entfernung ab Südportal [m]	Temperatur [°C]	
50	12.5	
100	14.7	
200	16.2	
300	18.7	
400	20.8	
500	20.9	
600	23.9	
700	25.1	
800	26.2	
900	27.2	
1000	27.1	
1060	28.7	
1360	31.6	
1560	31.8	
1760	32.7	
1960	33.2	
2160	34.2	
2360	33.8	
2560	33.9	
2760	32.8	
2960	31.8	
3160	31.5	
3360	30.3	
3560	28.8	
3760	27.7	
3960	26.7	
4160	23.0	
4360	18.3	
4588	21.5	
4768	23.0	
4968	26.0	
5177	29.8	
5376	32.7	
5572	35.5	
5767	35.9	
5968	37.5	
6168	38.9	
6418	39.5	
6568	39.4	
6768	39.6	
6968	39.1	
7168	39.7	
7268	38.9	
7368	39.1	
7418	39.4	
7518	39.2	
7618	39.2	
7668	38.5	
7768	38.9	
7968	39.3	
8168	38.9	
8268	39.2	
8368	39.0	
8468	39.4	
8568	40.1	
8668	40.3	
8768	41.0	
8868	41.2	
8968	41.5	
9068	43.5	
9168	45.3	
9218	44.5	
9318	44.8	
9353	Durchschlag	

Etwas zu niedrig

Etwas zu niedrig

Um 1 - 2 ° zu niedrig

Um 2 - 3 ° zu niedrig

Um 3 - 5 ° zu niedrig

Um 1.5 - 2 ° zu niedrig

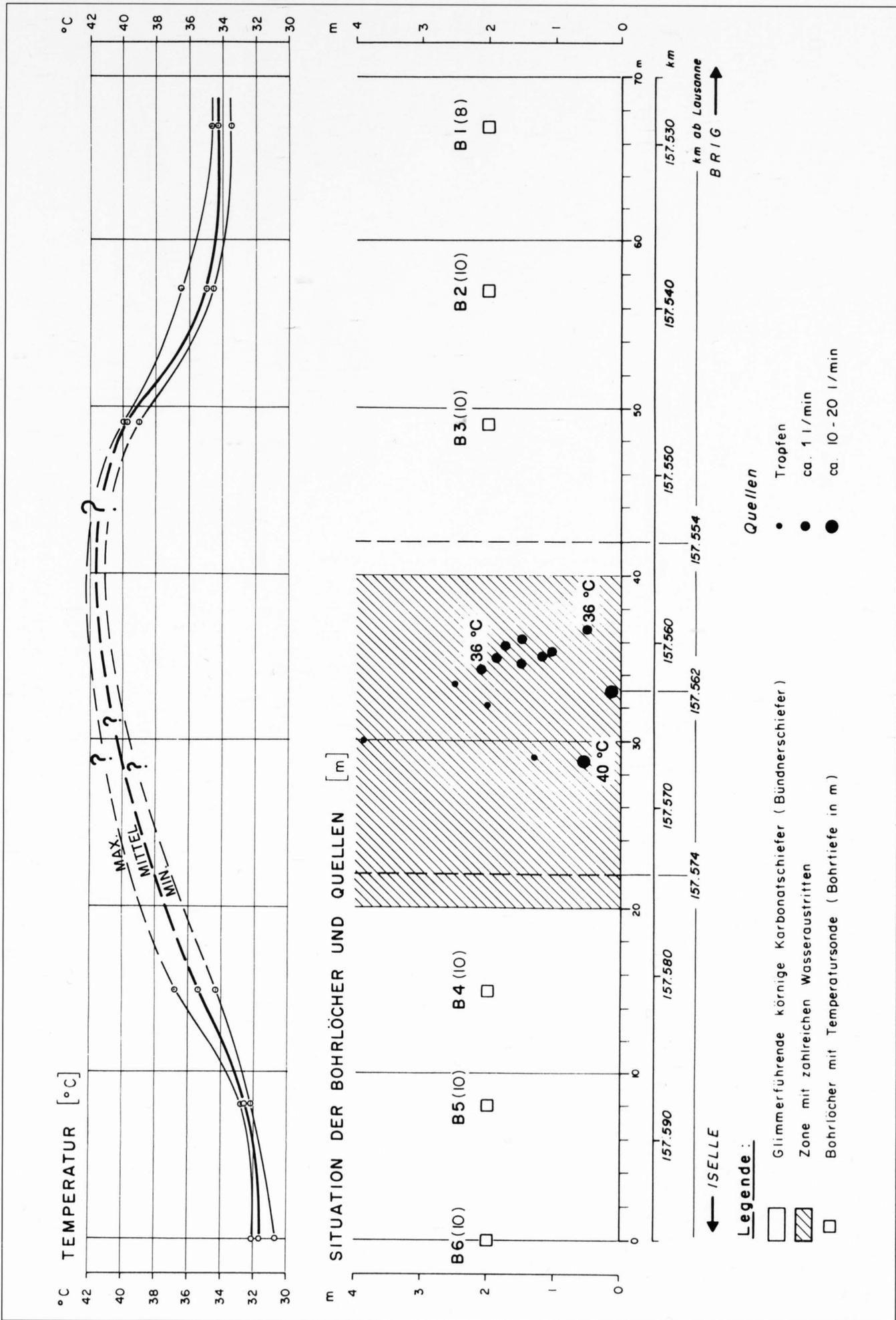
Korrigiert

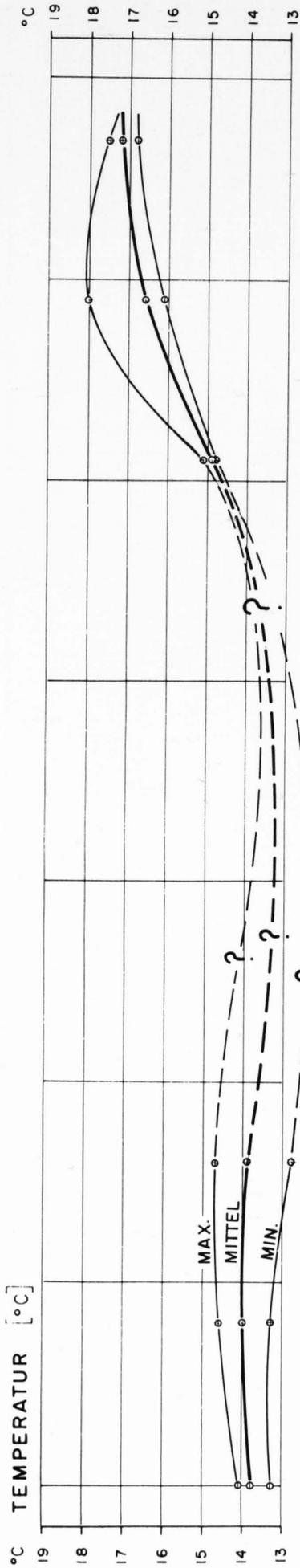
Korrigiert

Um 1.5 - 2.5 ° zu niedrig

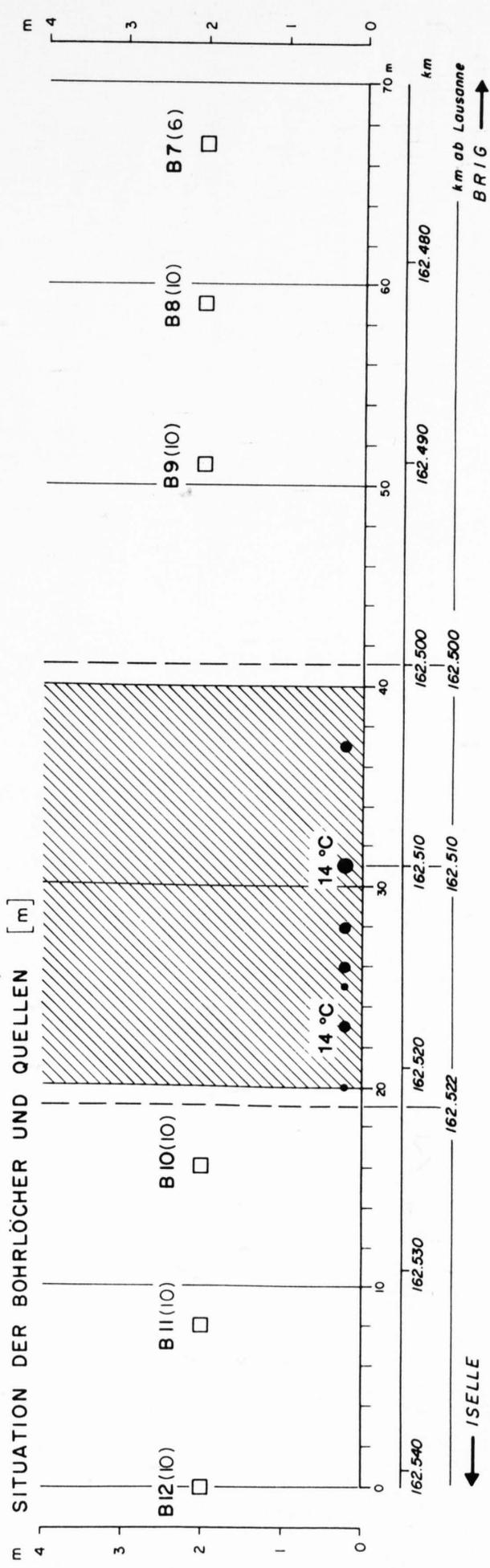
Felstemperaturen entlang des bestehenden Tunnels (1987 - 1988)

KM	RECHTER TUNNEL						LINKER TUNNEL						
	Dezember 1987		April 1988		August 1988		Dezember 1987		April 1988		August 1988		
	MAXIMALE FELSTEMP.	MITTLERE FELSTEMP.	FELSTEMP.	LUFTTEMP.	FELSTEMP.	LUFTTEMP.	FELSTEMP.	LUFTTEMP.	FELSTEMP.	LUFTTEMP.	FELSTEMP.	LUFTTEMP.	
0.5	21.9	16.5	21.9	16.7	19.4	18.7	17.5	18.1	11.5	9.0	12.1	17.5	19.1
1.0	20.3	15.6	20.3	16.3	19.2	19.0	18.4	18.3	8.1	10.0	11.8	16.1	16.1
1.5	21.9	17.1	21.9	17.0	19.5	16.7	19.2	18.8	16.0	8.9	12.6	14.7	16.5
2.0	24.2	17.4	24.2	18.5	19.4	19.0	20.1	19.4	10.6	10.3	14.0	15.2	14.6
2.5	26.2	18.7	26.2	18.8	20.5	20.0	21.0	21.0	13.2	14.5	15.0	15.9	15.0
3.0	27.5	21.3	27.5	20.4	25.7	25.0	24.9	24.0	14.7	13.1	17.5	17.7	18.9
3.5	24.7	20.7	24.7	0.0	21.8	21.7	22.5	22.3	16.2	13.2	22.3	16.9	17.2
4.0	27.6	21.3	27.6	22.2	22.6	22.0	22.8	22.6	16.6	14.4	20.1	17.9	17.5
4.5	28.4	22.0	28.4	23.3	22.8	20.6	23.7	23.6	16.6	21.7	21.3	19.1	18.8
5.0	28.0	21.8	28.0	23.4	21.6	20.7	23.1	22.3	17.2	19.4	21.5	19.5	19.3
5.5	30.2	24.3	30.2	24.6	23.7	21.4	24.5	22.8	23.4	17.5	23.8	20.0	20.4
6.0	31.2	24.9	31.2	24.8	27.8	25.6	26.0	25.5	23.4	17.7	20.7	20.3	19.2
6.5	27.2	24.1	27.2	25.2	25.4	26.2	26.6	26.4	23.0	20.0	21.0	21.4	20.9
7.0	27.6	24.3	27.6	25.2	25.5	22.4	26.9	26.7	22.0	20.6	21.3	22.6	21.4
7.5	28.6	25.1	28.6	25.4	24.3	22.2	25.9	23.9	25.4	20.8	23.5	23.5	23.3
8.0	33.8	26.2	33.8	21.4	25.4	25.6	25.9	25.2	26.3	21.6	22.8	24.2	21.2
8.5	27.2	21.7	27.2	23.8	25.7	24.4	26.9	26.8	27.2	21.7	25.9	24.2	22.5
9.0	27.6	21.5	27.6	23.3	23.8	23.0	27.4	27.6	27.3	23.3	25.0	25.2	23.9
9.5	31.5	26.2	31.5	0.0	23.3	23.0	27.0	26.8	31.5	27.3	24.3	26.2	25.8
10.0	30.0	25.7	30.0	23.0	22.6	21.0	24.7	24.0	25.5	23.8	24.5	26.6	26.1
10.5	30.4	26.1	30.4	23.4	25.1	21.6	26.4	26.4	24.3	25.3	23.8	26.3	26.6
11.0	30.6	26.4	30.6	25.6	22.9	21.7	26.2	26.2	29.1	22.4	23.9	25.7	26.0
11.5	30.2	26.8	30.2	24.5	23.7	23.5	26.2	26.3	29.4	23.8	25.2	26.0	25.9
12.0	32.4	27.2	32.4	25.3	26.0	25.6	26.4	26.5	32.4	24.2	25.9	26.6	26.3
12.5	31.5	28.0	30.7	24.3	24.2	24.1	26.4	26.4	31.5	24.6	28.1	27.1	27.3
13.0	32.9	27.2	28.0	24.4	23.5	23.0	26.2	26.4	32.9	24.6	25.9	26.8	26.3
13.5	31.0	26.4	25.5	24.0	23.6	23.6	25.5	25.8	31.0	25.3	25.0	27.0	26.6
14.0	29.7	26.0	26.3	23.8	22.8	22.4	25.0	25.2	29.7	25.3	25.4	26.8	26.3
14.5	30.7	26.5	30.7	22.5	21.8	19.8	23.4	23.4	30.7	24.9	25.0	27.2	27.2
15.0	29.5	24.9	25.6	21.9	20.4	19.4	22.7	23.0	29.5	23.7	24.9	26.5	26.6
15.5	31.1	24.5	25.7	21.2	18.7	16.7	21.6	22.0	31.1	22.1	24.6	25.4	26.5
16.0	24.5	21.5	24.0	19.1	18.1	17.2	21.6	22.2	21.5	20.0	19.6	24.1	24.5
16.5	23.7	20.8	19.6	17.9	17.9	16.8	21.3	21.6	23.7	20.7	19.1	23.1	23.4
17.0	22.8	20.6	21.4	17.9	18.5	17.4	20.5	20.7	21.2	21.0	19.5	22.4	22.8
17.5	29.8	21.9	21.0	17.9	18.2	16.6	20.3	20.4	29.8	21.1	20.0	22.1	22.5
18.0	22.0	20.1	21.1	18.1	16.0	14.2	19.8	19.7	21.1	19.2	20.6	21.8	22.0
18.5	24.3	19.6	19.8	16.8	14.1	13.7	19.0	18.8	24.3	18.7	19.2	21.4	21.5
19.0	25.1	20.0	22.5	16.0	13.8	12.6	18.0	17.9	25.1	18.5	19.4	21.1	19.0
19.5	20.4	17.0	18.0	14.8	12.9	10.6	17.0	15.7	16.0	15.8	17.6	20.4	20.3
20.0	20.9	10.0	20.9	10.0	12.9	10.6	17.0	15.7	19.6	14.6	19.8	20.4	20.9





SITUATION DER BOHRLÖCHER UND QUELLEN [m]



Legende:

- Glimmerführende körnige Karbonatschiefer (Bündnerschiefer)
- Zone mit zahlreichen Wasseraustritten
- Bohrlöcher mit Temperatursonde (Bohrtiefe in m)

Quellen:

- 0 - 20 l/min
- 20 - 50 l/min
- 50 - 100 l/min

