

Geothermie-Bohrung Pro San Gian, St. Moritz

Autor(en): **Aemissegger, Beat**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin der Vereinigung Schweiz. Petroleum-Geologen und -Ingenieure**

Band (Jahr): **60 (1993)**

Heft 136

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-216869>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Geothermie-Bohrung Pro San Gian, St. Moritz

mit 8 Figuren und 2 Tabellen

von BEAT AEMISSEGGER*

Abstract:

During summer 1991 the first geothermal deep drilling project of the Alpine region was realized in the major fault system of the Engadine Line near St. Moritz (Grisons, Switzerland). The localization of the borehole with a total depth of 1600 m was based on the projection of surface geology and three vibroseismic profiles. Due to an unexpectedly low permeability, especially in the deeper section, a geothermal utilization of the deep water was not yet attempted. However some new geologic and hydrogeologic results were obtained. In a depth of 1600 m the geothermal gradient of about 30/ K/km results in a temperature of 50°C. The strongly mineralized water (14 g/l), flowing in 540-750 m below surface, is especially rich in sodium and hydrogen carbonate, similar to mineral springs of Scuol. Periodic water/CO₂-eruptions are a characteristic feature in the deep water hydrology.

Résumé:

Le premier forage géothermique profond (1600 m) des Alpes a été effectué à St. Moritz (canton des Grisons) dans la zone tectonisée de la ligne le l'Engadine. Trois profils sismiques et la projection de la géologie exposée ont permis de déterminer son implantation. Contrairement aux prévisions, la perméabilité trop faible, surtout dans la partie inférieure du puit, exclut une exploitation géothermique du forage. Les connaissances concernant la géologie régionale et particulièrement les conditions hydrogéologiques des eaux profondes ont toutefois progressé. La température de 50°C à la base du puit implique un gradient géothermique d'environ 30 K/km. L'eau riche en hydrogénocarbonate et de sodium présente des similitudes avec celles des sources minérales de Scuol et provient des zones fracturées étroites, située entre 540 et 750 m de profondeur. Avec une valeur de 14 g/l elle s'avère être fortement minéralisée. Depuis la fin du forage le comportement hydrologique se caractérise par des éruptions périodiques de gaz (CO₂) et d'eau.

Zusammenfassung:

Im Sommer 1991 wurde bei St. Moritz (Kt. Graubünden, Schweiz) die erste Geothermie-Tiefbohrung im Alpenraum in das grossräumige Störungssystem der Engadiner Linie abgeteuft. Der Standort der 1600 m tiefen Senkrechtbohrung wurde aufgrund der Oberflächengeologie und dreier vibroseismischer Profile festgelegt. Wegen unerwartet geringer Durchlässigkeit v.a. im tieferen Bohrabschnitt kommt eine geothermische Nutzung nicht in Frage. Die Bohrung lieferte aber neue Erkenntnisse bezüglich regionaler Geologie und v.a. Hydrogeologie. Das Tiefenwasser als Natrium-Hydrogenkarbonat-Sulfat-haltiger Säuerling, vergleichbar mit einigen Quellen von Scuol, strömt in 540-750 m Teufe zu und ist mit 14 g/l sehr stark mineralisiert. Seit Abschluss der Bohrung bestimmen periodische Wasser/CO₂-Ausbrüche das hydrologische Verhalten.

Einführung

Die Nutzung geothermischer Energie reicht bis ins letzte Jahrhundert zurück, beschränkte sich aber auf vulkanisch aktive Gebiete mit hohen geothermischen Gradienten. Seit den sechziger Jahren dieses Jahrhunderts werden als Nebenprodukt der Erdöl- und -gas-Exploration auch Warmwasservorkommen ausserhalb vulkanischer Gebiete (z.B. Pariser Becken) genutzt. In der Schweiz wurden Geothermie-Tiefbohrungen erst wirtschaftlich realisierbar, seit Bund und Kantone diese mit Risikodeckungs-Garantien unterstützen.

* BEAT AEMISSEGGER, Büchi und Müller AG, Quaderstr. 5, 7002 Chur 2

Nach den ersten drei schweizerischen Tiefbohrungen zur Nutzung geothermischer Energie in Riehen, Reinach und Kreuzlingen wurde 1991 in St. Moritz eine erste Geothermie-Tiefbohrung im alpinen Raum abgeteuft. Frühe Anstösse dazu in den 1970er Jahren gehen (neben einem Vorprojekt in Davos) auf U.P. Büchi zurück. Die Tiefbohrung Pro San Gian wurde im Auftrag der Gemeinde St. Moritz in die grossräumige Verwerfungszone der Engadiner Linie ausgeführt.

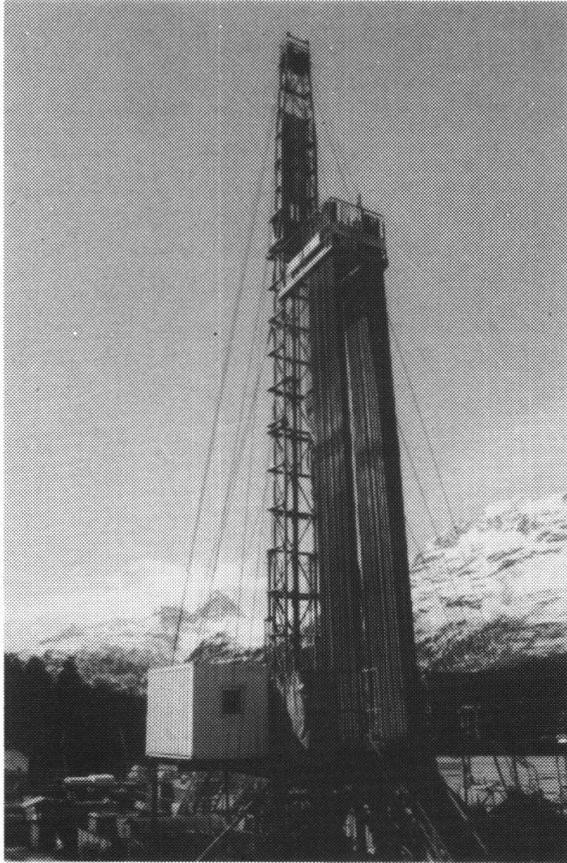


Fig. 1: Bohranlage für die Geothermie-Tiefbohrung Pro San Gian, St. Moritz

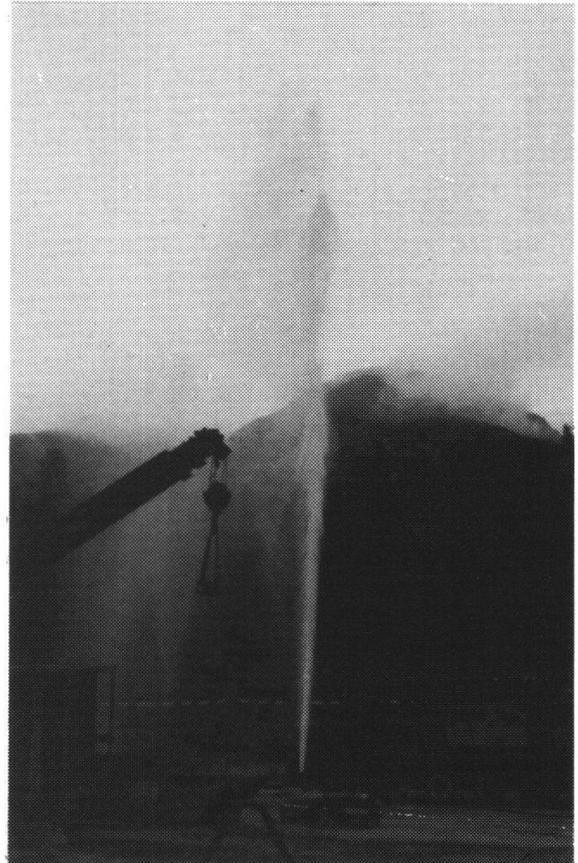


Fig. 2: Wasser/CO₂-Aufstoss mit gut 20 m hoher Fontäne nach Abschluss der Bohrung, am 14.10.1991

Geologischer Rahmen

Die Talachse des Engadins verläuft etwa senkrecht zum Streichen des mit 20-30° nach Nordost einfallenden Deckenbaus, sodass von Südwesten nach Nordosten sukzessive höhere tektonische Einheiten aufgeschlossen werden (Fig. 3).

Der Deckenstapel wird im Südwesten von den Bergeller Intrusiva durchschlagen. Die Engadiner Linie (siehe unten) versetzt das Gebirge nördlich und südlich des Engadins gegeneinander. Beidseits der Engadiner Linie entsprechen sich die tieferen Sella-Corvatsch- und Grevasalvas-Decken sowie die höheren Bernina- und Julier-Decken (u.a. Finger 1978 und Trümpy 1992). Die im Norden unter der Julier-Decke mächtig entwickelte Samadener Zone (verschuppte mesozoische Sedimente der Err- und Julier-Bernina-Decken mit Trias und unterem Lias typisch unterostalpinen Fazies) findet mit dem Err-Kristallin südlich der Engadiner Linie kein vergleichbares Äquivalent. Die rund 450 m mächtig erbohrte Chastelets-Serie unter der Corvatsch-Decke als Äquivalent der tiefsten unterostalpinen Carungas-Roccabella-Einheiten wird mangels Ophiolithen tektonisch definitionsgemäss dem Unterostalpin zugeordnet. Die sedimentäre

Fazies steht den Sedimenten der Platta-Decke (DIETRICH 1970, MÜLLER 1982) jedoch wesentlich näher. Die Bohrung setzt im Dach der Corvatsch-Decke an, durchörtert die Chastelets-Serie und reicht knapp 400 m in die Platta-Decke.

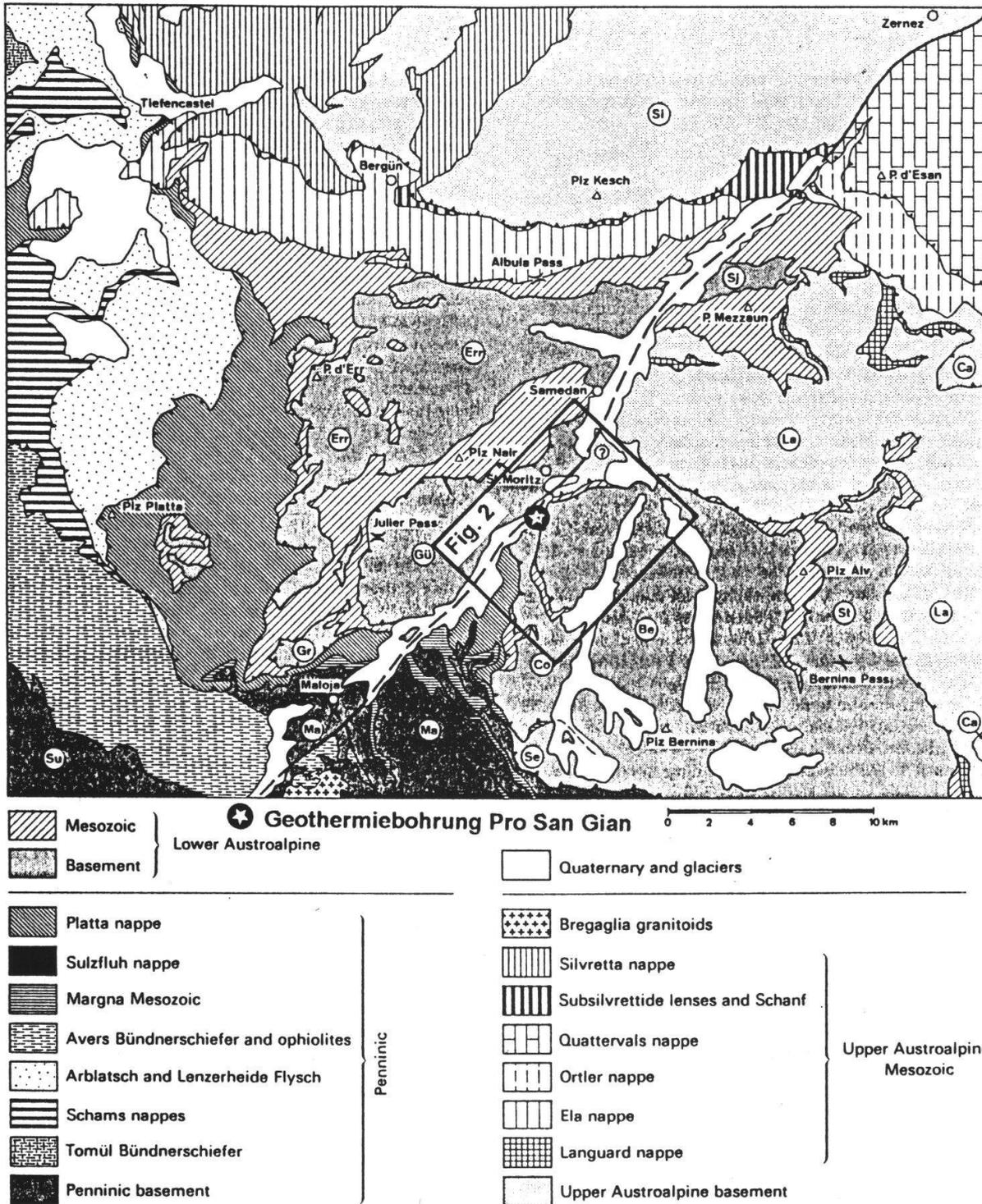
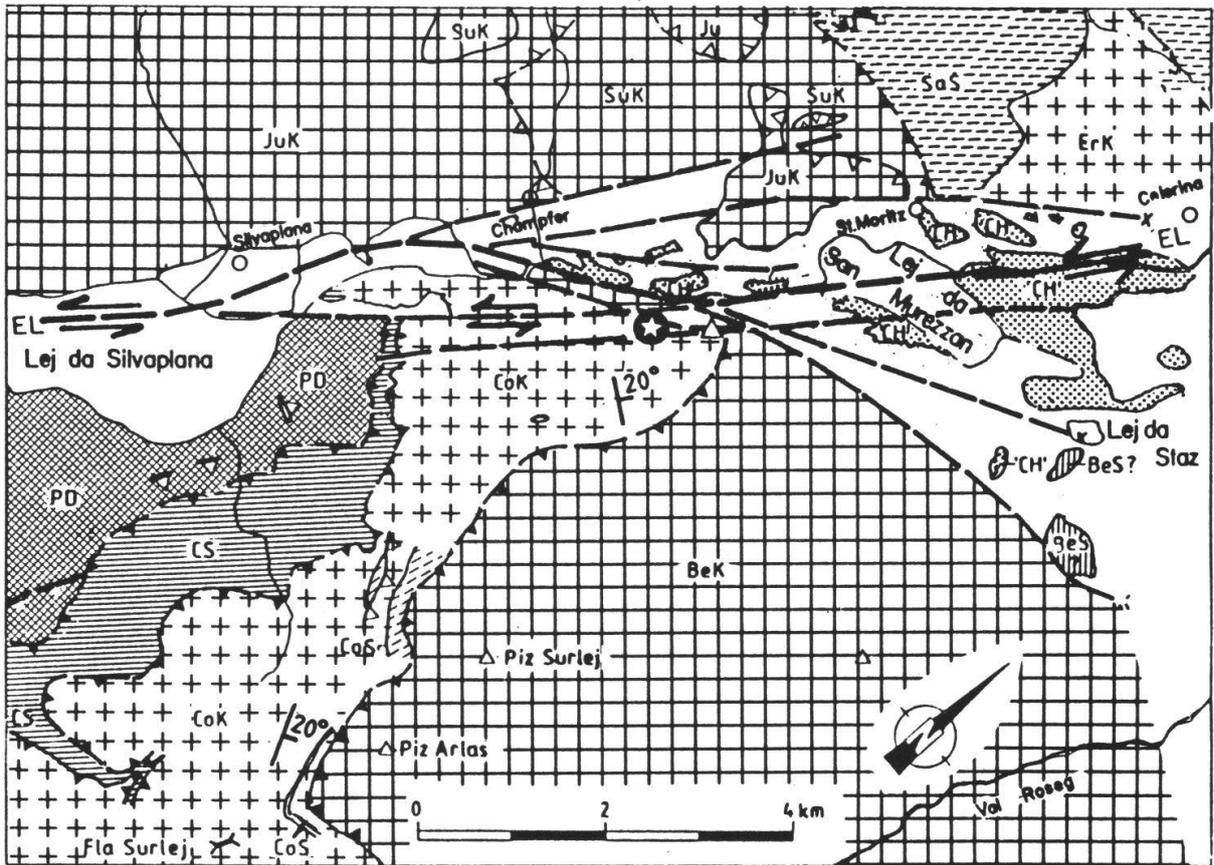


Fig. 18. Tectonic sketch map of the Upper Engadine and vicinity.

Fig. 18. Esquisse tectonique de la Haute Engadine et de son voisinage.

Penninic basement nappes: Su = Suretta, Ma = Margna. - Lower Austroalpine basement nappes: Se = Sella, Co = Corvatsch, Be = Bernina, St = Stretta, Sj = Soja, Err = Err, Gr = Grevasalvas, Gü = Güglia (Julier). - Upper Austroalpine basement nappes: La = Languard, Ca = Campo, Si = Silvretta.

Fig. 3: Tektonische Übersichtsskizze des Untersuchungsgebiets (aus TRÜMPY und TROMMSDORF (1980), mit freundlicher Genehmigung Prof. R. Trümpys)



Legende:

- Lockergestein
- "Charnadüra-Serie" STAUBS (1946): Mylonite, Kataklastite, Glimmer- und Chloritschiefer ungeklärter tektonischer Zugehörigkeit: vermutl. z.T. Suvretta-Schuppe, z.T. Languard-Kristallin
- Bernina-Sedimente? (tektonische Stellung unsicher)
- Bernina- (BeK) und Julier Kristallin mit Julier-Decke s.s. (JuK) u. Suvretta-Schuppe (SuK)
- Samadener Zone (SaS: Sedimente der Err- und Julier-Bernina-Decken)
- Corvatsch-Sedimente (CoS)
- Corvatsch- (CoK) und Err-Kristallin (ErK)
- Chastelets-Serie (CS)
- Platta-Decke (PD: Ophiolithe mit geringmächtigen Sedimentschuppen)
- Engadiner Linie mit Seitenstörungen
- Geothermie-Tiefbohrung Pro San Gian
- Mauritius-Quelle, St. Moritz-Bad

Fig. 4: Geologisch-tektonische Situation (modifiziert nach CORNELIUS (1932) und STAUB (1946))

Die *Engadiner Linie* als grossräumige sinistrale Verwerfung versetzt im Oberengadin den Deckenstapel. Sie lässt sich vom Bergell über das Unterengadin bis gegen Innsbruck verfolgen (TRÜMPY 1977). Das Einfallen der Engadiner Linie und die relativen

Versetzungen variieren beträchtlich. Mit grossen Unterschieden bezüglich Mächtigkeit und Fazies lassen sich Nord- und Südblock nur beschränkt korrelieren, weswegen diese die Talanlage des Engadins bestimmende Verwerfung bis heute viele Fragen offen lässt. Im Oberengadin ist die Engadiner Linie zumeist von der quartären Talfüllung überdeckt und nur spärlich aufgeschlossen. Zwischen dem Nord- und Südblock sind im Dreieck Champfèr-Pontresina-Celerina Kataklastite, Glimmer- und Chloritschiefer ungeklärter tektonischer Zuordnung aufgeschlossen (vermutlich z.T. Languard-Parakristallin, z.T. Suvretta-Schuppe der Julier-Decke), die wir in Fig. 4 gemäss STAUB als Charnadüra-Serie bezeichnen. Im Raum St. Moritz-Silvaplana zeichnen sich durch lithologische Versetzungen, Kataklasten wie auch morphologisch verschiedene Seitenstörungen zur Engadiner Linie ab, die sich in St. Moritz-Bad schneiden. Die verschiedenen Mineralquellen von St. Moritz-Bad zeigen wie jene von Scuol (WEXTEEN 1988) mit z.T. starker Mineralisation und gasförmigen CO₂-Austritten eine *erhöhte Wasserführung entlang des Engadiner Störungssystems* und eine Herkunft des Wassers aus dem tieferen Untergrund an. Sie treten als kaltes Wasser aus; Warmwasser mit 38°C speist dagegen ausserhalb des Engadiner Störungssystems am Südrand der Bergeller Intrusion die Thermen des Val Masino.

	<i>südlich der Engad. Linie</i>		<i>nördlich der Engad. Linie</i>
	<i>oberostalpine Decken</i>	Bergeller Intrusiva Engadiner Linie	<i>oberostalpine Decken</i>
<i>unter- ostalpine Decken</i>	Bernina-Decke		Julier-Decke
	Corvatsch-Decke		Samadener Zone (Sedimente der Err-und Julier-Decken)
	Chastelets-Serie		Grevasalvas- und Err-Decken
<i>penni- nische Decken</i>	Platta-Decke		Carungas-Roccabella-Decke
	Margna-Decke		Platta-Decke
	Suretta-Decke mit Averser-Bündnerschiefern	Margna-Decke	
			Suretta-Decke mit Averser Bündnerschiefern

Tab. 1: Tektonische Einheiten im Oberengadin

Ziel der Bohrung war, aus durchlässigen Störungszonen, unter Annahme eines leicht erhöhten geothermischen Gradienten von rund 3°/100 m, Warmwasser zu fördern und dessen geothermische Energie zu nutzen. Da sich in der Region St. Moritz-Bad verschiedene Störungen schneiden, das Bad und nahegelegene öffentliche Gebäude mit geothermischer Wärme versorgt werden sollten, wurde der Bohrstandort nach seismischen Untersuchungen bei Pro San Gian (SSW der Tennishalle) gewählt. Mit zwei Zementationsabschnitten und Verrohrung bis 500 m Tiefe wurde einer Beeinträchtigung der Mauritiusquelle und Grundwasserfassung San Gian (im Alluvium) vorgebeugt. Der Bohrstandort liegt am äusseren Rand der Schutzzone 3 zur Grundwasserfassung und musste deshalb mit einem Asphaltbelag versehen werden.

Seismische Voruntersuchungen und Interpretation

Zur Bestimmung des Bohrstandorts wurden durch die Prakla-Seismos AG drei vibroseismische Profile quer bzw. schief zur Talachse aufgenommen. Die geologische Aus-

wertung war allerdings schwierig. Wenngleich verschiedene Störungen zu erkennen waren, liessen sich die Reflektoren auch nach der Bohrung nur mit grosser Unsicherheit interpretieren. Selbst die Grenze Lockergestein/Fels war durch die Seismik nicht sicher zu definieren. Reflektoren innerhalb des Kristallins zeichneten sich mit ähnlicher Intensität ab wie solche im Sediment oder zwischen Sediment und Kristallin. Die petrophysikalischen Messungen im Bohrloch (Array Sonic- und Dichte-Log) ergaben ähnliche Impedanz-Unterschiede zwischen Kristallin und Sediment wie innerhalb Kristallin- und Sediment-Serien. Die diversen steilstehenden Störungsflächen dürften die seismischen Signale verschiedentlich reflektiert, refraktiert und viel Energie absorbiert haben, wodurch z.T. auch Scheinhorizonte vorgetäuscht wurden. Aufgrund der Oberflächengeologie und der Seismik wurde die Bohrung über dem Schnittbereich zweier Störungen 500 m SSW der Mauritiusquelle angesetzt (Koord. 783'699/149'742/1796 m ü.M.).

Bohrung

Nach der Installation des Bohrplatzes begann die Firma Fehlmann Grundwasserbauten AG, Basel die *Rotary-bohrung* am 1.7.1991 abzuteufen und erreichte in der 12. Woche am 18.9.91 die angestrebte *Bohrteufe von 1600 m*. Insgesamt wurden *fünf Bohrkerne* à 9 m Länge entnommen: 2 Kerne im Dach der Chastelets-Sedimente (766-784 m Teufe, wenig unter dem Corvatsch-Kristallin), einer in der unteren Chastelets Serie (1100-1107 m), ein Kern im Diabas der Platta-Decke und ein letzter in kieseligem, serizitischem Kalkmarmor der Platta-Decke im untersten Bereich des Bohrlochs (1562-1571 m). Die Kernlängen bis über 2 m (cm-dm im phyllitischen 3. Kern) zeigen gesunden, kaum zerrütteten Fels. Klüfte quer und parallel zur Schichtung/Schieferung sind weitgehend mit Calcit und Quarz verheilt. Die wenigen, kurzen Bohrkerne sind für eng begrenzte, wasserhöfliche Bruchzonen allerdings nicht repräsentativ.

Bis zur ersten Zementierung in 156 m Teufe wurde mit einem 17½''-Rollenmeissel, danach bis zur zweiten *Zementation und Verrohrung in 494 m* mit 13¾'' Querschnitt gebohrt. Der weitere Vortrieb bis zur Endteufe erfolgte mit 8½'' und 8¾''. Der Bohrabchnitt unterhalb 494 m wurde nicht zementiert, bis 750 m aber mit einem lose eingehängten 7''-Filterrohr gegen Wandausbrüche geschützt.

Das Corvatsch-Kristallin (vorwiegend Grano- bis Monzodiorite) bot dem Vortrieb erheblichen Widerstand. Erhöhte Meissellast führte zu drei Gestängebrüchen und einer *Abweichung der Bohrachse* von 5.75° vom Lot nach SSE in 290 m Teufe. Bis zum Doppelkern von 18 m Länge in 760 m Teufe konnte die Abweichung auf 2° reduziert werden, knickte beim Kern aber nach SW ab und nahm bis zur Endteufe auf 15° zu. Die Bohr-Endteufe von 1600 m liegt in 1581 m unter OK Terrain bzw. 215 m/ü.M und 165 m SW vom Bohransatzpunkt entfernt.

Bis 930 m wurde mit Bentonitpülung gebohrt, darunter mit Marmorspülung und Polyesterzusatz, um die Bohrwand und offene Klüfte weniger zu kolmatieren bzw. mit der vorgesehenen Säuerung wieder öffnen zu können. Starke CO₂-Führung liess die Marmorspülung v.a. in den tieferen Chastelets-Sedimenten wiederholt schaumig werden und erschwerte die Steuerung der Viskosität.

Aus den täglichen Spülbilanzen wurden nur im Corvatsch-Kristallin nennenswerte *Spülvverluste* festgestellt. Der grösste Verlust von 9 m³ beim Vortrieb zwischen 239-262 m Teufe liegt im zementierten Bohrlochabschnitt. Nach weiteren, geringeren Verlusten unterhalb 650 m wurde in 706 m Teufe ein Schöpftest durchgeführt. Wegen starkem Wasserzufluss konnte der Wasserspiegel nur um 160 m abgesenkt werden. Die

Absenkung und Druckentlastung in der Spülung führte zu verstärktem Gasaufkommen: der CO₂-Gehalt stieg auf über 20%. Da sich starker Geruch nach Schwefelwasserstoff verbreitete, wurde der Schöpftest aus Sicherheitsgründen abgebrochen, die Konzentration in der Spülung lag jedoch noch unter der Messbarkeitsgrenze von 1 ppm H₂S. Das Bohrloch wurde raschestmöglich mit Spülung verfüllt, weswegen der Anstieg des Wasserspiegels nicht beobachtet und der Wasserzufluss nicht bestimmt werden konnte. Im gesamten Bohrlochabschnitt *unter dem Corvatsch-Kristallin* wurden *keine weiteren Spülungsverluste* mehr festgestellt.

Bohrloch-Geophysik

Nach Abschluss der Bohrung führte die Firma Schlumberger am 19.9.91 die in Tabelle 2 zusammengestellten Messungen durch:

Untersuchungsmethode		Messbereich Teufe [m]	Untersuchungszweck
Lithologische Logs:			
GR	Gamma Ray-Log	0-1600 m	Lithologie
LDL	Litho-Density-Log	500-1600 m	Lithologie
CNL	Compensated Neutron-Log	500-1600 m	Porosität
SDT	Array Sonic-Log	500-1600 m	Lithologie, Klüftung, Porosität
SP	Self Potential-Log	500-1600 m	Gesteinswechsel
DLL	Dual Latero-Log	500-1600 m	Porosität, Klüftungsgrad
FMS	Formation Microscanner	500-1600 m	Schichtung, Schieferung, Klüftung
Bohrtechnische Logs:			
CBL	Cement Bond-Log	0-500 m	Zementation
VDL	Variable Density-Log	0-500 m	Zementation
CCL	Casing Collar Locator	0-500 m	Verrohrung
CAL	Caliper Log	500-1600 m	Bohrloch-Erweiterungen

Tab. 2: Petrophysikalische Untersuchungen im Bohrloch

Im verrohrten und zementierten Bohrabschnitt von 0-500 m Teufe wurden nur die zur Prüfung der Zementation und Verrohrung relevanten Logs und der Gamma-Ray-Log zur Eichung gefahren. Die übrigen Logs würden im ausgebauten Abschnitt keine interpretierbaren Ergebnisse liefern.

Bohrprofil

Die lithologische Beschreibung beruht auf der Untersuchung der Spülproben unter dem Binokular und der fünf Bohrkerne (ohne Dünnschliffe oder Labormethoden) unter Berücksichtigung der petrophysikalischen Messungen.

Das Bohrprofil gliedert sich summarisch in folgende Abschnitte (vgl. Fig. 5):

- 0-31 m: Quartär: Bachschutt
- 31-754 m: Corvatsch-Kristallin mit zwei geringmächtigen Sediment-Einschuppungen
- 754-1218 m: Chastelets-Serie
- 1218-1600 m: Platta-Decke: vorwiegend Diabas und Serpentin mit geringmächtigen Sediment-Einschuppungen.

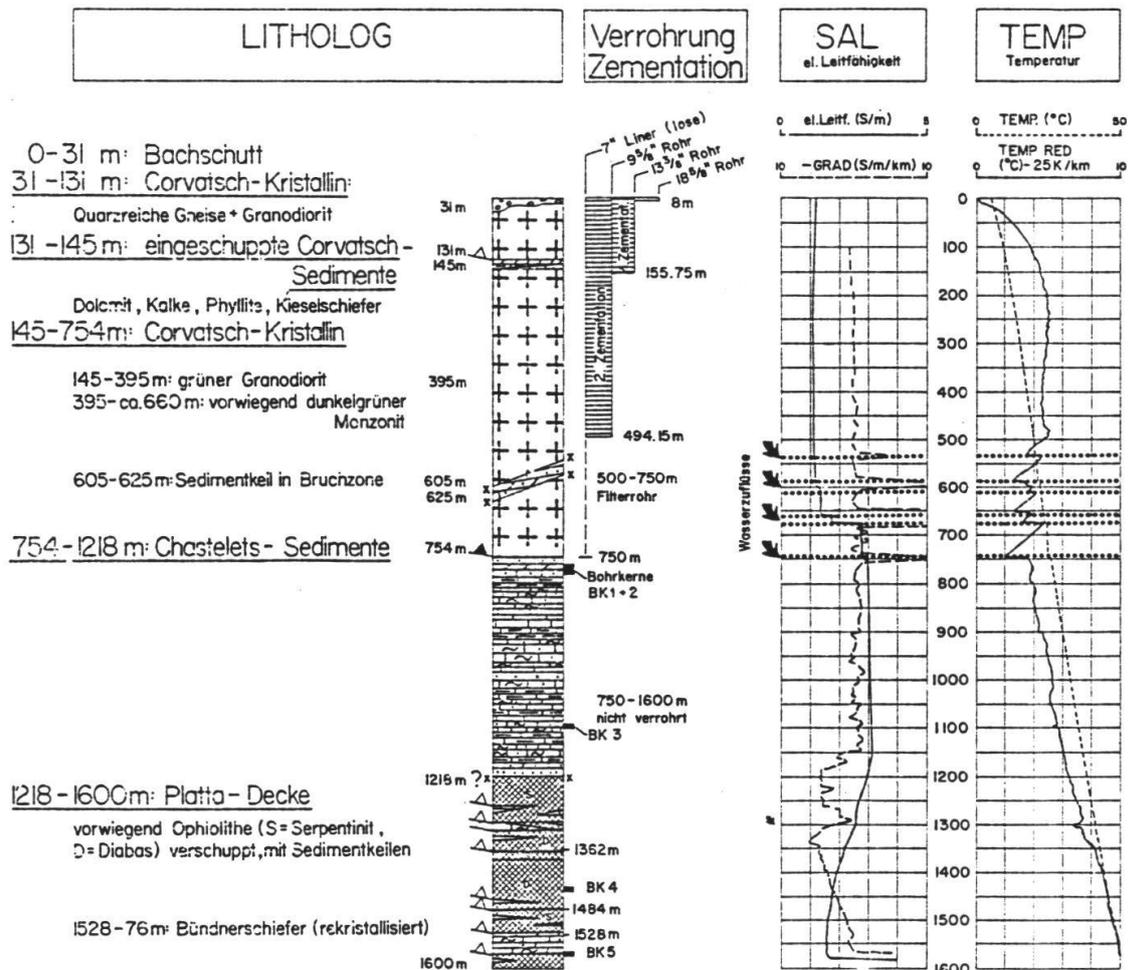


Fig. 5: Bohrprofil mit Verrohrungsschema und Temp/Sal-Log (2. Run vom 27.4.1992)

Der *Bachschutt* von 0-31 m setzt sich zu 65-90% aus feinkörnigem Diorit der Bernina-Decke zusammen, dem 10-30% Granodiorit (Corvatsch-Kristallin), bis 5% meist dunkelgraue Kalke (Corvatsch-Sedimente aus verschwemmter Moräne) und Spuren von Radiolarit beigemischt sind.

Quarzreicher, muskovitführender Gneis und Schiefer (31-98 m Teufe) wird im *oberen Corvatsch-Kristallin* von grünem, saussuritisierendem Granodiorit (98-125 m) unterlagert. Mit quarzreichen Schiefen und grauschwarzen, z.T. kalkigen Phylliten verschuppter Dolomit, grauer, kieseliger Kalkmarmor (Allgäu-Schichten) und wenig Kieselschiefer markieren eine *Sediment-Einschuppung* in 131-145 m Teufe. Sie dürfte dem von STAUB (1946) kartierten tieferen Corvatsch-Sedimentzug am Westfuss des Piz Surlej entsprechen. Grüner, stark saussuritisierter Granodiorit (145-395 m) wird von einem dunkler grünen, quarzarmen Monzodiorit unterlagert. Mafische Gemengteile sind in den Spülproben des Corvatsch-Kristallin makroskopisch nicht erkennbar. Im Abschnitt 605-625 m wurden weisse, quarzische Spülproben mit gelblichem, kieseligem Dolomit und weissem Calcit gefördert. Starke Auskesselung des Bohrlochs und Wasserzutritte (Temp/Sal-Log) zeigen stärkere Zerrüttung an. Es dürfte sich um eine Verwerfungszone mit eingeschuppten Sedimenten handeln.

Die 465 m mächtige *Chastelets-Serie* mit vorwiegend dünnbankten, z.T. kieseligen Kalkmarmoren und phyllitischen Einschaltungen wurde in 754-1218 m Teufe durchfahren. Im Dach stehen blassgrüner, kalkiger Quarzit (vermutlich Radiolarit) und grauschwarzer, feinspätiger Dolomit an, der zum Liegenden wechsellagernd in grauweis-

sen, kieseligen, schwach gebankten, z.T. feinlaminierten serizitischen Kalkmarmor übergeht (Bohrkerne 1 und 2, 766-884 m; schwach metamorphe Allgäu-Schichten?). Dunkelgraue, phyllitreiche Einlagerungen (Emmat-Serie, Unterkreide?) wurden in 798-815 m, 905-920 m, 1025-1040 m, 1020-30 m, 1060-70 m und 1120-40 m Teufe durchfahren. In der Mitte der Chastelets-Serie (995-1000 m) und an der Basis wurden grünliche, kalkige Kieselschiefer beobachtet. In der unteren Chastelets-Serie (unter 1175 m) sind rötliche Manganmineralien (Mn-Calcit bis Rhodochrosit und Rhodonit) verbreitet; vermutlich hydrothermale Bildungen in der Nähe eines basalen Radiolarits. Das granodioritische kristalline Substrat der Chastelets-Sedimente (MÜLLER 1982) konnte in der Bohrung nicht nachgewiesen werden, fehlt möglicherweise als tektonischer Hiatus.

Unterhalb 1218 m Teufe bis zur Endteufe wird die Chastelets-Serie von der *Platta-Decke* mit verschupptem Serpentin, Diabas und geringmächtigen Sedimenten unterlagert:

1218-1304 m: oberer Serpentin

1304-1315 m: Schuppenzone von Serpentin und Chastelets-Sedimenten

1315-1362 m: oberer Diabas, mit Serpentin und Chastelets-Sedimenten verschuppt

1362-1380 m: tieferer Serpentin mit wenig Fremdmaterial

1380-1484 m: Diabas vermutlich ohne eingeschupptes Fremdgestein (Bohrkern 4)

1484-1528 m: mit kieseligem Kalkmarmor und Diabas verschuppter Serpentin

1528-1576 m: rekristallisierte Bündnerschiefer der Platta-Decke (Bohrkern 5)

1576-1600 m: Schuppenzone von Serpentin mit Kalkmarmor und Diabas

Die eingeschuppten Sedimente sind in den Spülproben von den Chastelets-Lithologien nicht unterscheidbar.

Hydrogeologie und Gasführung

Nach abgeschlossener Bohrung und den petrophysikalischen Messungen wurde die Bohrspülung durch Bachwasser ersetzt. Befürchtete Gasausbrüche blieben dabei aus. Das Wasser floss mit 6.1 l/Min. natürlich aus. Das *Tiefenwasser* ist also *leicht artesisch gespannt*. Aus dem Schüttungs/Absenkungs-Diagramm der folgenden Schöpftests liess sich ein artesisches Niveau 20-50 m über Oberkante Bohrung ableiten.

Das *hydrogeologische Untersuchungsprogramm* umfasste folgende Tests:

- 2 Temperatur/Leitfähigkeits-Logs (Temp/Sal-Logs), nach Bohrabschluss und im Ruhezustand)
- Schöpftest mit Packer in 743 m Teufe (Bohrlochabschnitt 743-1600 m)
- 2 weitere Schöpftests ohne Packer mit Steigversuchen
- Klarspülung zur Reinigung der Bohrlochwand
- Airlift
- 6-tägiger Kurzpumpversuch
- Tiefendruckmessung während einer Woche

Ein erster Temp/Sal-Log zwei Tage nach dem Ersatz der Bohrspülung durch Wasser zeigte bereits, dass unterhalb 750 m keine nennenswerten Wasserzuflüsse ins Bohrloch zutraten. Ein Schöpftest aus dem Bohrabschnitt 743-1600 m, bei dem der obere Bohrlochabschnitt mit einer Verrohrung und einem Packer in 743 m abgedichtet wurde, lieferte aus dem tieferen Bohrabschnitt bei einer Wasserspiegelabsenkung von 321 m lediglich 3.3 l/Min. Wasser. Aus zwei weiteren Schöpftests wurden *Ergiebigkeiten* des gesamten Bohrlochs von 18 l/Min. bei 100 m und von 33 l/Min. bei 200 m Absenkung errechnet. Die Schüttungen lagen somit *weit unter den Anforderungen für eine geother-*

mische Nutzung. Die Ergiebigkeit des tieferen Bohrlochabschnitts 750-1600 m mit höheren Temperaturen kann gegenüber dem Abschnitt 500-750 m vernachlässigt werden.

Um die Bohrlochwand und Klüfte von Spülrückständen zu reinigen, wurde das Bohrloch von unten her mit maximalem Wasserdurchfluss klargespült.

Mit dem *Airlift* wurde zur weiteren Stimulation der Schüttung versucht, die Wassersäule wiederholt schockartig abzusenken bzw. zu entlasten und durch möglichst hohe Druckdifferenz zwischen Felswasser und Bohrloch wasserführende Klüfte zu öffnen. Beim *Airlift*-Verfahren wird durch ein Gestänge Druckluft ins Bohrloch gepresst und die darüberliegende Wassersäule verdrängt. Probleme beim Druckaufbau ermöglichten jedoch nur eine Wasserspiegel-Absenkung um 220 m.

Da die Ergiebigkeit durch den *Airlift* nicht signifikant gesteigert werden konnte und die Wasserzuflüsse im Kristallin lagen, wurde auf eine Säuerung zur weiteren Stimulation verzichtet und zur Sicherung des wasserführenden Bohrabschnitts gegen Wandausbrüche ein lose eingehängtes Filterrohr von 500-750 m Teufe eingeführt.

Obwohl beim ersten Schöpftest und während dem Bohrvortrieb bis zur Endteufe wiederholt beträchtliche Gasmengen aufstiegen (überwiegend Kohlendioxid neben sehr geringen Kohlen- und Schwefelwasserstoff-Anteilen), blieb die Wassersäule nach Abschluss der Bohrung bis zum letzten Schöpftest ruhig, selbst bei der grössten Absenkung um 324 m beim Schöpftest mit Packer. Erst beim Beginn des 4. Schöpftests kam es zu einem kräftigen Gasauftoss mit einer über 20 m hohen Wasserfontäne. Während der folgenden Klarspülung stieg in unregelmässigen Abständen wenig Gas auf.

Bei der Demontage der Bohranlage stellten sich periodische *Wasser/Gasaufstösse* (Fig. 2) ein. Vom 7.-10.10.1991 verlängerten sich die Ausbruchsintervalle kontinuierlich von 3¼ auf 6 h. Die Ausbruchsdauer nahm gleichzeitig von 3¼ auf 5¼ Min. zu. Nach den «Eruptionen» stieg der Wasserspiegel langsam bis OK Bohrloch an. Bis zum nächsten Aufstoss blieb der artesischer Ausfluss praktisch aus.

Pumpversuch mit Wasser/Gas-Aufstößen

Obwohl die Gasauftösse Probleme erwarten liessen, wurde vom 16.-21.10.91 ein Pumpversuch unternommen. In Anbetracht der geringen Schüttung war der Einsatz einer *Centrilift*-Pumpe mit einem Entgasungsaggregat in grosser Tiefe aus Kostengründen nicht gerechtfertigt. Eine konventionelle Pumpe (ohne Degazer) wurde in der maximalen Teufe von 140 m gesetzt. Während zwei Tagen wurde versucht, mit langsamer, kontinuierlicher Wasserspiegel-Absenkung die Entgasung minimal zu halten. Der Wasserspiegel liess sich lediglich um 40 m absenken, worauf Gasbildung die Pumpe durchdrehen liess und abstellte. Der Pumpversuch mit der vorgesehenen *kontinuierlichen Wasserentnahme und Absenkung konnte nicht realisiert werden. Der Pumpbetrieb* verhinderte während der ersten beiden Tage grössere Gas/Wasserauftösse und *führte zu einer stärkeren permanenten Entgasung mit kleineren Ausbrüchen und verkürzten Intervallen* von 1-2 Stunden.

Am dritten Tag wurde die Pumpe abgestellt, um das natürliche Eruptionsverhalten zu beobachten. Die Ausbruchsintervalle verlängerten sich auf 8 Std. ± 15 Min. bei einer Ausbruchsdauer von 7 Min.. Pro Ausbruch wurde 5-7 m³ Wasser ausgeworfen, was einer Druckverminderung bzw. Absenkung einer gasfreien Wassersäule von rund 150 m entspricht. Die Entgasung reichte in weit grössere, nicht genauer bestimmbare Tiefen. Ein erneuter Pumpeneinsatz leitete umgehend wieder einen kleineren Gasauftoss mit einem Druckabfall um 40 m ein, ohne die achtstündige Periodizität zu stören.

Der mit einer Drucksonde kontinuierlich aufgezeichnete Wasserspiegel stieg nach

neun beobachteten Eruptionen in drei Tagen praktisch kongruent an. Die aus der Anstiegsgeschwindigkeit und dem Rohrquerschnitt errechneten *Ergiebigkeiten von 50 l/Min. bei 100 m Absenkung bzw. 30 l/Min. bei 50 m Absenkung* (instationäre Absenkung) liegen über den langfristig förderbaren Schüttungen bei stationärer Absenkung. Aus der Extrapolation der Wiederanstiegskurve liess sich ein artesisches Niveau von 15-20 m abschätzen.

Tiefendruckmessung zur Beobachtung der periodischen Wasser/Gas-Aufstösse

Während des Winters 1991/92 blieb das Bohrloch offen, sodass sich das natürliche hydrologische Regime des Tiefenwassers einstellen konnte. Ein halbes Jahr nach dem Pumpversuch wurde das natürliche Ausbruchverhalten mit einer Tiefendruckmessung während einer Woche beobachtet. Eine Drucksonde in 908 m Teufe (d.h. unter den Wasserzuflüssen und unter dem Entgasungsbereich) zeichnete die Druckschwankungen und damit die Wasserspiegelabsenkungen vom 29.4.-6.5.1992 kontinuierlich auf, woraus sich die Aufstossintervalle, Absenk- und Anstiegsgeschwindigkeiten bzw. Schüttungen in Abhängigkeit der Wasserspiegelabsenkung berechnen liessen.

Während sieben Tagen ereigneten sich sieben Wasser/Gasaufstösse mit Ausbruchintervallen zwischen 25½ und 30¼ Stunden. In 7-9 Minuten wurde der Wasserspiegel um 220 ± 3 m abgesenkt. Der Anstieg bis OKT dauerte 5 h mit sehr gleichmässigem Aufstiegsverhalten (Fig. 6). Bei 200 m (instationärer) Absenkung schüttete das Bohrloch rund 80 l/Min., bei 100 m 42 l/Min. und bei 50 m Absenkung 25 l/Min.. In der Ruhephase zwischen abgeschlossenem Anstieg und der folgenden Eruption floss praktisch kein Wasser aus. Die Druckschwankungen waren minim und vermutlich auf leichte Gasführung (Blasen) zurückzuführen.

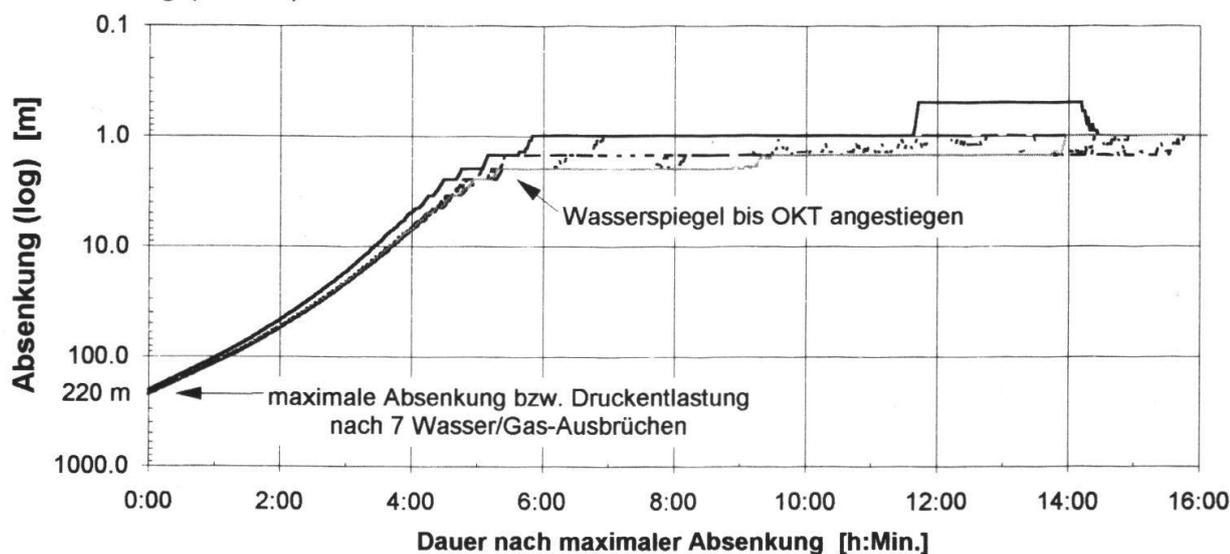


Fig. 6: Wasserspiegel-Anstieg nach 7 überlagerten Wasser/Gasausbrüchen (Tiefendruckmessung vom 28.4. - 6.5.1992).

Die Tiefendruckmessungen gaben wertvolle Anhaltspunkte auf die maximale Ergiebigkeit bei instationärer Absenkung. Die Schüttung bei dauernder (stationärer) Wasserentnahme liegt unter den oben aufgeführten Werten.

Die natürlichen periodischen Gas/Wasseraufstösse (Fig. 2) sind ein interessantes und wenig bekanntes Phänomen. Sicher hängen sie mit der Entgasung des CO₂-gesättigten Wassers durch Druckentlastung beim Aufstieg zusammen. Unklar ist jedoch, warum sich das Wasser beim Aufsteigen im Bohrloch nicht allmählich entgast. Über den Aus-

löser der Ausbrüche kann derzeit erst spekuliert werden. Verschiedene Beobachtungen könnten folgendermassen erklärt werden: Die Druckentlastung beim Ausbruch führt in den gering durchlässigen Zuflusswegen zu einer langsamen Entgasung (Bildung von CO₂-Blasen), die Wasser verdrängt und den Anstieg des Wasserspiegels im Bohrloch beschleunigt. Der Wasserspiegel steigt leicht überproportional zur Absenkung. Nach Abschluss des Wasserspiegel- und Druckanstiegs löst sich das freie Kohlensäuregas in den Zuflusswegen wieder; die damit verbundene Volumenreduktion kompensiert den Wassernachfluss praktisch und damit auch den natürlichen Überlauf aus dem Bohrloch.- Ein Zusammenhang der Wasser/Gas-Aufstösse mit periodischen Gaszutritten böte einen anderen Erklärungsansatz.

Temperatur/Leitfähigkeits-Log (Temp/Sal-Log, vgl. Fig. 5)

Zwei Temp/Sal-Logs zeigen die Wasserzutritte ins Bohrloch an. Ein *erster Run* wurde am 22.9.1991, zwei Tage nach dem Ersatz der Bohrspülung durch Bachwasser im unverrohrten Bohrabschnitt (500-1600 m) aufgenommen und blieb in 1290 m stecken (Auskesselung). Die geringe Schüttung vermochte die Salinität des Bachwassers beim ersten Run erst relativ schwach zu verändern.

Beim *zweiten Run* nach sieben Monaten (27.4.92, im Ruhezustand) mit eingeführtem Filterrohr bis 750 m Teufe zeichneten sich die Wasserzutritte durch scharfe Diskontinuitäten im Temperatur- als auch im Leitfähigkeitsprofil scharf ab (Fig. 5). Der Run wurde von oben nach unten gemessen. Als die Sonde 1298 m Teufe erreichte, ereignete sich ein kräftiger Gas/Wasserausbruch. Kleine Temperaturunterschiede werden durch die «reduzierte Temperatur» (Differenz zwischen der gemessenen Temperatur und der linearen Temperaturzunahme mit der Tiefe) hervorgehoben. Im oberen Teil des zementierten und verrohrten Bohrlochs stieg die Temperatur bis in ca. 150 m überdurchschnittlich an und bildet die Abkühlung von der Erdoberfläche her ab. Kleine Unstetigkeiten in 250-280 m Teufe, wo beim Bohrvortrieb die grössten Spülungsverluste verzeichnet worden waren, zeigen Wasserzirkulation ausserhalb der Verrohrung und Zementation an. Von 540-750 m Teufe nimmt die elektrische Leitfähigkeit (bzw. Mineralisierung oder Salinität) sprunghaft zu. In der Fliessrichtung des aufsteigenden Wassers (von unten nach oben) fallen Salinität und reduzierte Temperatur bei 747-750 m (stärkster Temperatursprung: 2°C), 678 m (stärkster Salinitätsabfall: 1 S/m), 654-660 m und bei 538 m Teufe. Ein unruhiger Temperaturverlauf bei 590-620 m Teufe mit leichtem Salinitätsabfall liegt in der Störungszone mit Sedimenten im unteren Corvatsch-Kristallin. Die sprunghaften Temperatur- und Salinitätsabnahmen im aufsteigenden Tiefenwasser mit langsamer Erwärmung bis zum nächsthöheren Zufluss zeigen, dass das zufließende *Wasser aus höheren, kühleren und schwächer mineralisierten Bereichen stammt*.

Unter dem tiefsten Wasserzutritt in 750 m Teufe stieg die Salinität beim 2. Run von 2.95 S/m (= 29'500 µS/cm) bis zum Maximum von 3.1 S/m (Mineralisierung ≈ 35 g/l gelöste feste Stoffe) in 1150 m stetig an und fiel bis zur Endteufe wieder kontinuierlich auf 1.6 S/m. Abgesehen von minimalen Unregelmässigkeiten (bzw. Wasserzutritten in 900 m, 1030 m, 1100 m und 1300-1340 m) nahm die Wassertemperatur im Bohrloch von 25°C in 750 m Teufe gleichmässig auf 50°C in 1580 m Teufe zu.

Beim ersten Run hatte die Salinität lediglich ein Maximum von 1.3 S/m in 1150 m Teufe erreicht, das sich auf 0.2 S/m in 950 m bzw. 0.3 S/m in 1300 m Teufe verflachte: ein schwacher Wasserzutritt in 1300 m hatte in den zwei Tagen seit dem Spülungsersatz das Bachwasser erst wenig zu mineralisieren vermocht, was die sehr geringe Ergiebigkeit des Bohrlochs unterhalb des Corvatsch-Kristallins bestätigt. Die Temperatur lag beim

ersten Run bis in 1050 m Teufe leicht über dem 2. Run, unterhalb 1050 m leicht unter dem 2. Run. Das Bohrloch hat sich im Bereich der grössten Wasserzuflüsse um 3.5-4° abgekühlt.

Aufgrund der beiden Temp/Sal-Logs dürfte das Tiefenwasser v.a. in den Chastelets-Sedimenten mineralisiert werden.

Wasseranalysen

Das *hydrochemische Untersuchungsprogramm* des Tiefenwassers Pro San Gian umfasste

- 3 chemische Standardanalysen, wovon eine mit zusätzlicher Untersuchung von Spurenelementen
- Isotopenuntersuchungen von Tritium (^3H) zur Altersbestimmung, Kohlenstoff-13 (^{13}C) und Kohlenstoff-14 (^{14}C) ebenfalls zur Altersbestimmung Deuterium (^2H) für die Bestimmung der mittleren Höhe des Wasser-Neubildung Sauerstoff-18 (^{18}O) für die Bestimmung der mittleren Höhe des Wasser-Neubildung

Zum Vergleich mit dem Tiefenwassers Pro San Gian wurde die Mauritius-Quelle in die Isotopenuntersuchungen einbezogen.

Mit 13.3-14 g/l Trockenrückstand ist das *Tiefenwasser Pro San Gian* 8-9 mal so stark mineralisiert wie die Mauritiusquelle und damit vergleichbar mit den sehr stark mineralhaltigen Tarasper Luzius- und Emerita-Quellen im Unterengadin. Das Wasser ist aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung als *Natrium-Hydrogenkarbonat-Sulfat-haltiger Säuerling* mit extrem hohem Kohlensäure-Gehalt (= Hydrogenkarbonat = HCO_3^-) zu klassieren (Fig. 7).

Das Tiefenwasser schmeckt äusserst kräftig, prickelnd und salzig, riecht wie jenes der Mauritiusquelle leicht nach Schwefelwasserstoff (H_2S) und lässt im Geschmack den hohen Eisengehalt erkennen (100 mg Fe^{2+} /l). Rotbraune Eisen-Ausscheidungen im Bohrkeller sind auf Oxidation des zweiwertigen Eisens im *sauerstofffreien Tiefenwasser* (siehe Gasanalyse) zu dreiwertigem Eisen zurückzuführen (Ausfällung an der Luft). Der schwache Geruch nach verbranntem Gummi weist auf organische Stickstoff-Schwefel-Verbindungen hin, die in der Gasanalyse nachgewiesen wurden. Der *hohe Natrium-Gehalt*, der auch den Tarasper Luzius- und Emerita-Quellen sowie der Passugger Fortunatus-Quelle eigen ist, kann der geringen Chlorid-Konzentration (Cl^-) wegen nicht aus gelöstem Salz (NaCl) stammen, sondern ist vermutlich auf Kationen-Austausch im Kristallin zurückzuführen.

Die *Mauritius-Quelle* als *Calcium-Natrium-Hydrogenkarbonat-haltiger Säuerling* ist wesentlich geringer mineralisiert (rund 1620 mg/l) als das Tiefenwasser, da es mit oberflächennahem Lockergesteins- und Calcium-reicherem Grundwasser (ev. aus den Corvatsch-Sedimenten) vermischt ist. Calcium ist im Mauritius-Wasser prozentual stärker, Natrium weniger vertreten als im Tiefenwasser Pro San Gian (Fig. 7 und 8).

Aufgrund der *Spurenelemente* lassen sich keine klaren Beziehungen zwischen Tiefenwasser und Mauritius-Quelle ableiten. Die beiden stark mineralisierten Tarasper Quellen unterscheiden sich durch einen rund fünf Mal höheren Bromid-Gehalt und v.a. durch einen ungewöhnlich hohen Bor-Gehalt vom Tiefenwasser Pro San Gian.

Tritium, das nur im Niederschlagswasser der letzten 35 Jahre vorkommt, konnte im Tiefenwasser Pro San Gian nicht oder nur in sehr geringen Mengen nachgewiesen werden. Daraus kann auf ein *Alter des Tiefenwassers von 35 Jahren oder mehr* geschlossen werden. Der ^{14}C -Gehalt lag wegen des hohen Hydrogenkarbonat- (HCO_3^-) und Koh-

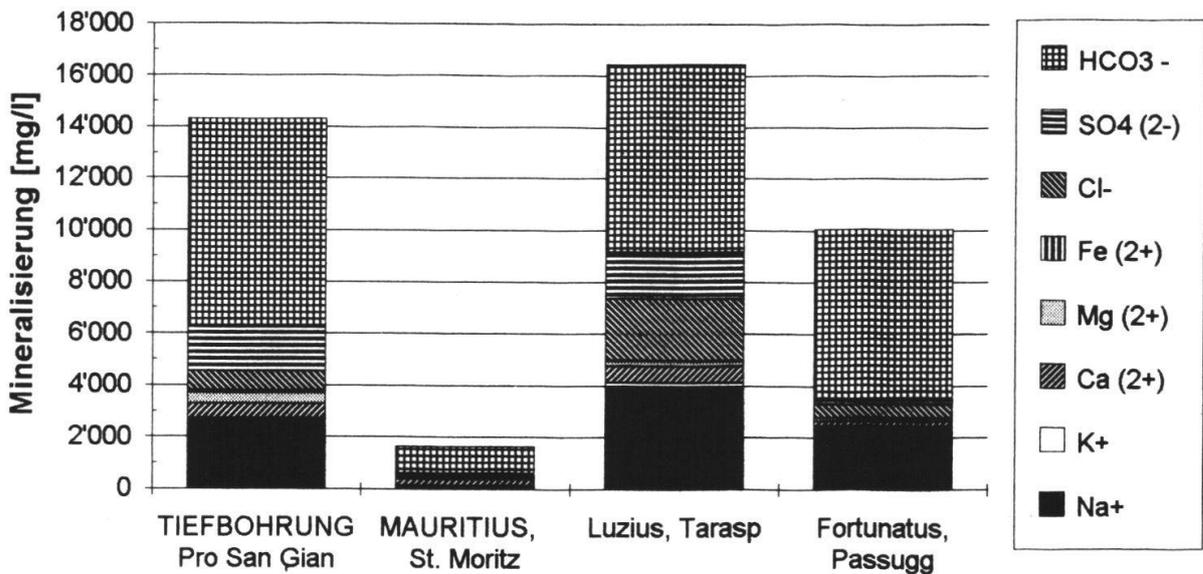


Fig. 7: Mineralisierung des Tiefenwassers Pro San Gian und der Mauritius-Quelle im Vergleich mit der Luzius-Quelle (Tarasp, ebenfalls entlang der Engadiner Linie) und der Fortunatus-Quelle, Passugg. Analysen von Mauritius-, Luzius- und Fortunatus-Quellen aus Högl (1980).

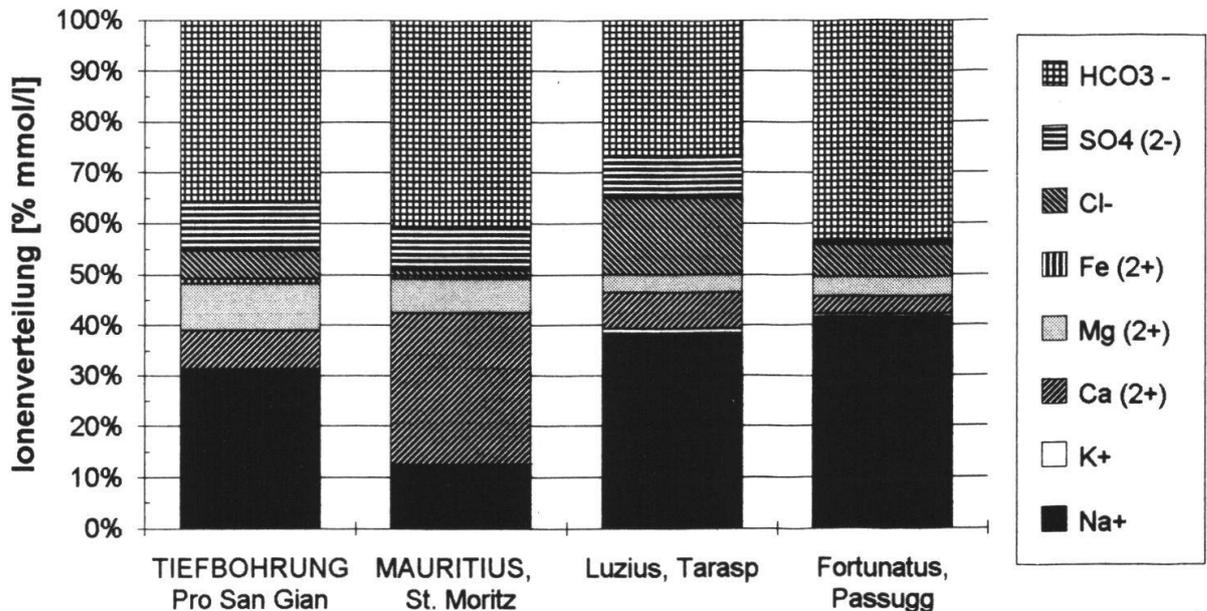


Fig. 8: Ionenverteilung [% mmol/l] im Tiefenwasser Pro San Gian und der Mauritius-Quelle im Vergleich mit der Luzius-Quelle (Tarasp, ebenfalls entlang der Engadiner Linie) und der Fortunatus-Quelle, Passugg. Analysen von Mauritius-, Luzius- und Fortunatus-Quellen aus HÖGL (1980).

lendioxid-Gehalts (CO_2) unter der Nachweisbarkeitsgrenze, sodass daraus keine genauere Altersbestimmung möglich war. Das Wasser der *Mauritiusquelle* setzt sich aus einem tritiumfreien Anteil (Tiefenwasser) von maximal 40% und jüngerem, 2-8-jährigem, oberflächennahem Grundwasser zusammen.

Die Deuterium/Sauerstoff-Verhältnisse ($-98.9\text{‰} \pm 1.5\text{‰} \delta^2\text{H}$ und $13.78\text{‰} \pm 0.15\text{‰} \delta^{18}\text{O}$) in der Tiefbohrung; $-97.9\text{‰} \pm 1.5\text{‰} \delta^2\text{H}$ und $-13.55\text{‰} \pm 0.15\text{‰} \delta^{18}\text{O}$ in der Mauritius-Quelle, bezogen auf VSMOW-‰) weisen auf eine *vergleichbare Höhenlage der Einzugsgebiete des Tiefenwassers Pro San Gian und des alten Anteils des Mauritius-Wassers*. Mangels Vergleichswerten kann die Höhenlage nicht genauer bestimmt werden.

Da die im Temperatur/Salinitäts-Log (Fig. 5) deutlich erkennbaren Wasserzuflüsse im unteren Corvatsch-Kristallin das Tiefenwasser abkühlen und die Mineralisierung herabsetzen, muss dieses *Wasser aus höheren Abschnitten des Corvatsch-Kristallins zuströmen*. Die *Aufmineralisierung* erfolgt jedoch in grösserer Tiefe, *vermutlich über sehr feine, geringdurchlässige Klüftung und entlang der Schichtfugen in den Chastelets-Sedimenten*.

Die Isotopen-Untersuchungen lassen darauf schliessen, dass das *Tiefenwasser Pro San Gian* und eine stark mineralisierte *Komponente des Mauritius-Wassers* im wesentlichen *demselben Tiefengrundwasser entstammen*. Eine starke Vermischung mit gering mineralisiertem, oberflächennahem Lockergesteins-Grundwasser verdünnt das Tiefenwasser in der Mauritius-Quelle. Der relative Anteil an Calcium-Ionen im Mauritius-Wasser ist gegenüber dem Tiefenwasser stark erhöht, der Natrium-Anteil wesentlich niedriger (Fig. 8). Dies lässt auf eine dritte Wasserkomponente im Mauritius-Wasser, vermutlich aus Corvatsch-Sedimenten schliessen, die vom Ionenaustausch nicht betroffen worden ist.

Gasanalysen

Nach Abschluss der Bohrung wurden je eine Gasprobe am 14.10.91 und am 6.11.91 entnommen und analysiert. *Kohlendioxid (CO₂)* bildet den *Hauptbestandteil* der freien Gase. Der überwiegende Teil des im Wasser gelösten CO₂ dürfte allerdings bereits vor der Probenahme entwichen sein. Im Wasser gelöst liegt CO₂ als Hydrogenkarbonat (=Kohlensäure: HCO₃⁻) vor. Aus der Tiefe aufsteigendes Kohlensäure-gesättigtes Wasser wird durch den damit verbundenen Druckabfall entgast, wobei CO₂ als Gasblasen austritt. Die bereits in früheren Untersuchungen festgestellten CO₂-Vorkommen entlang Störungszonen der Engadiner Linie (FRICKE 1976 und 1977, QUERFURTH 1977) können somit auf Tiefenwasseraustritte zurückgeführt werden. Die Herkunft des hohen Kohlensäuregehalts im Wasser und des entsprechenden CO₂-Gehalts in der Gasprobe kann aufgrund der vorliegenden Daten nicht mit Sicherheit geklärt werden; es kann tieferen Bereichen der Erdkruste entstammen (Gaszufuhr aus dem Erdinnern) oder biogenen Ursprungs (aus tieferliegenden Sedimenten) sein. WEXTEEN (1988) führt das CO₂ der Mauritius-Quelle auf metamorphe Prozesse in tiefliegenden Sedimenten (unterhalb der Bohrung) zurück.

Der überraschend hohe *Stickstoff-Gehalt* (13.8 bzw. 24% Vol.) deutet zusammen mit den *Kohlenwasserstoff-Spuren* und den Ergebnissen der ¹³C-Bestimmungen auf *organischen Ursprung* aus tieferliegenden Sedimenten. Stickstoff- und Heliumgehalte der Gasprobe sind gegenüber meteorischem Wasser (im Gasgleichgewicht mit der Atmosphäre) deutlich erhöht.

Wasserstoff (H₂) wurde nur in der zweiten Gasprobe, allerdings in erstaunlicher Menge (18%) nachgewiesen. Er wird auf *Korrosion der Verrohrung* zurückgeführt (Bericht HYDRISOTOP, 1992).

Thermische Leistung und Erfolgsbeurteilung

Der Erfolg einer Geothermie-Bohrung ist abhängig von der thermischen Leistung und der Wasserqualität.

Die Ergiebigkeit der Bohrung und die nutzbare Wärme bestimmen die thermische Leistung. Unter Annahme einer stationären Absenkung auf 200 m ist mit einer Schüttung von maximal 80 l/Min. und 17 K nutzbarer Wärme zu rechnen (Abkühlung auf 5°C). Die daraus resultierende *thermische Leistung von weniger als 0.1 MW liegt weit unter dem für eine wirtschaftliche Nutzung erforderlichen Minimum*. Das Bohrresultat muss

damit als Misserfolg gewertet werden. Hauptgrund ist die praktisch fehlende Ergiebigkeit im tieferen und wärmeren Bohrlochbereich. Der geothermische Gradient lag wie erwartet bei 2.8-3 K/100 m.

Bezüglich Mineralisierung liegt v.a. der Eisengehalt über den für eine Einleitung in öffentliche Gewässer zulässigen Grenzwerten. Mit guter Durchlüftung müsste das Eisen ausgefällt werden. Der mit 1900 mg/l ebenfalls sehr hohe Sulfatgehalt überschreitet das Qualitätsziel bei weitem, doch ist diesbezüglich kein Grenzwert festgelegt.

Schlussfolgerungen

In *hydrogeologischer Hinsicht* überraschte die geringe Ergiebigkeit der Bohrung. Aufgrund der Spülproben kann nicht mit Sicherheit geschlossen werden, ob die Bohrung bereits knapp südlich der wichtigen und durchlässiger erwarteten Verwerfungen angesetzt worden war und wenig gestörtes Gebirge durchörterte, oder ob durchfahrene Störungszonen sehr gering durchlässig sind. Die bescheidenen Wasserzuflüsse im Corvatsch-Kristallin markieren immerhin einige wasserführende Brüche. Eine Richtung Nordwest vorgetriebene Schrägbohrung hätte mit grösserer Wahrscheinlichkeit mehrere Verwerfungen durchstossen, stand aber aus Kostengründen ausser Diskussion. Die Chastelets-Sedimente mit ihren verschiedenen Phyllitlagen dürften grundsätzlich gerindurchlässig, Verwerfungen darin weitgehend verheilt sein und als Barriere den Zustrom von tieferem Grundwasser behindern. Abnormal geringe Dichte und hohe Neutronenporosität lassen auf einen zerrütteten oberen Serpentinitt der Platta-Decke schliessen, was aber im Widerspruch zur sehr geringen Ergiebigkeit dieses Bohrabschnitts steht. Die Diabas-Serien dürften wenig zerrüttet und auch in Bruchzonen allgemein gering durchlässig sein.

Die Abkühlung und Erniedrigung der Mineralisierung im Temp/Sal-Log bei den Wasserzuflüssen zeigen *im Bereich der Bohrung eine allgemeine Wasserzirkulation nach unten* an, was durch den Wasserabfluss durch die Bohrung bei fehlender Durchlässigkeit des tieferen Bohrabschnitts erklärt wird. Das recht hohe Alter des Wassers lässt auf längere Zuflusswege im Corvatsch-Kristallin schliessen. Die Mineralisierung des Tiefenwassers mit hohen Natrium- und Kohlensäure-, aber geringen Calcium- und Chlorid-Konzentrationen lassen sich nur mit einem Ionenaustausch (Natrium ersetzt Calcium) erklären. Ob der Ionenaustausch im Corvatsch-Kristallin stattfindet, kann aufgrund der vorliegenden Untersuchungen nicht sicher beantwortet werden. Eine Analyse von Wasserproben aus verschiedenen Tiefen (aus und unter den Chastelets-Sedimenten) dürfte diese Frage beantworten und möglicherweise auch die periodischen Wasser/CO₂-Gas-Aufstösse erklären. Sie würden zudem zeigen, ob das Tiefenwasser stockwerkartig getrennt ist mit gering mineralisiertem Wasser in der Platta-Decke oder ob die geringe Leitfähigkeit im Bohrabschnitt der tieferen Platta-Decke darauf zurückzuführen ist, dass das bei der Klarspülung kurz nach Bohrabschluss eingeleitete Bachwasser selbst nach einem halben Jahr erst teilweise ersetzt worden ist.

In geologischer Hinsicht war die grosse Mächtigkeit der Chastelets-Sedimente bemerkenswert, weil die Serie in den Aufschlüssen nördlich Surlej zur Bohrung hin auf 70-150 m ausdünn. Das Bohrprofil ist abgesehen vom fehlenden Chastelets-Kristallin mit den Aufschlussverhältnissen im Gebiet Alp Surlej-Chastelets sehr gut vergleichbar.

Eine Tiefbohrung in geologisch komplexen Gebieten ist immer mit Unsicherheiten und neuen Erkenntnissen verbunden. Bereits eine wenig nördlicher angesetzte Schrägbohrung könnte möglicherweise durchlässigere Bruchzonen erschliessen, da die Verwerfungen den Deckenbau und damit das Corvatsch-Kristallin mit besser durchlässigen

Störungen im Norden herabsetzen. Der geologische Aufbau im zentralen Bereich des Engadiner Störungssystems mit der unklaren Stellung der »Charnadüra-Serie« lässt sich vermutlich nach Abschluss der Kartierung des Atlasblatts St. Moritz besser erkennen.

Dank

Mit ihrem durch den Soverän gestützten Auftrag, als erste Gemeinde der Alpen die Nutzungsmöglichkeiten geothermischer Energie zu untersuchen, hat die Gemeinde St. Moritz trotz dem damit verbundenen Risiko innovativ und konkret zur geothermischen Forschung der Schweiz beigetragen. Für den interessanten Auftrag und die ausgezeichnete Zusammenarbeit sind wir der Gemeinde, besonders Gemeindepräsident Herrn C. Giovanoli und den mit der Koordination betrauten Herren Spinas und Strasser, namens des Büros Büchi und Müller AG zu bestem Dank verpflichtet. In diesen Dank möchten wir die zuständigen Stellen von Kanton (Energiefachstelle sowie Aust für Umweltschutz Graubünden) und Bund (Bundesamt für Energiewirtschaft mit der Eidg. Kommission für Geothermie und unterirdische Wärmespeicherung) für ihr Engagement mit zahlreichen Diskussionen einbeziehen. Ihre Risikodeckungs-Garantie hat die Ausführung des Projekts erst ermöglicht. Weiter danken wir allen an der Realisierung Beteiligten für ihren oftmals harten Einsatz bei Nacht, Regen, Schnee und Kälte, v.a. der Bohrfirma Fehlmann Grundwasserbauten AG, Basel, der Bauunternehmung Hartmann & Cie. AG, St. Moritz, Gemag AG (EDV-Überwachung der Bohrung), Prakla Seismos (Vibroseismik), Schlumberger Verfahren (Bohrloch-Geophysik), Geotest AG (Temp/Sal-Log) und Hydrisotop GmbH (Wasser- und Gasanalysen, inkl. Isotopen) sowie Herrn Prof. Tj. Peters (Mineralogisch-petrographisches Institut, Bern) für sein Interesse. Die Herren Dr. P. Heitzmann und Prof. R. Trümpy haben mit der kritischen Durchsicht des Manuskripts den Bericht unterstützt, wofür ihnen ein herzlicher Dank gebührt.

Literatur:

- BÜCHI und MÜLLER AG (1992): Energiesparprojekt St. Moritz: Geothermie-Bohrung Pro San Gian, St. Moritz. Schlussbericht (3. Etappe).- unveröffentlicht.
- CORNELIUS, H.P. (1932): Geologische Karte der Err-Gruppe, 1: 25'000, in 2 Blättern.- Schweiz. geol. Komm. Spez.-Karte Nr. 115 A und B.
- DIETRICH, V. (1970): Die Stratigraphie der Platta-Decke. Fazielle Zusammenhänge zwischen Oberpenninikum und Unterostalpin.- *Eclogae geol. Helv.* 63/2: 631-671.
- FINGER, W. (1978): Die Zone von Samaden (unterostalpine Decken Graubünden) und ihre jurassischen Brekzien.- Diss. ETH Zürich.
- FRICKE, K. (1977): Gutachtliche Stellungnahme zur Frage der Erschliessung von Mineral-, Heil- und Thermalwasser im Heilquellengebiet von St. Moritz.- Bad Driburg, BRD.
- GRIESHABER, G. (1965): Die Mauritiusquelle.- Buchdruckerei W. Gammeter, St. Moritz.
- GUEMBEL, C.W. v. (1893): Geologische Mitteilungen über die Mineralquellen von St. Moritz und ihre Nachbarschaft nebst Bemerkungen über das Gebirge bei Bergün und die Therme von Pfäfers.- S.-B. Akad. Wiss. München, Math.-phys. Kl., 19-101
- HÖGL, O. (1980): Die Mineral- und Heilquellen der Schweiz.- Paul Haupt Verlag, Bern und Stuttgart.
- HYDRISOP (1992): Isotopenhydrogeologische Untersuchungen an Mineralwasserproben, entnommen aus Tiefbohrung und Mauritiusquelle.- Bericht Dr. L. Eichinger vom 17.3.1992. unveröffentlicht; enthalten in BÜCHI und MÜLLER AG (1992): Anhang 3.

- MÜLLER, D. (1982): Geologie und Petrographie der Bernina (Piz Corvatsch und Umgebung).- Diplomarbeit Nr. 234 am Geologischen Institut Univ./ETH Zürich.
- MUENGER, R. (1982): Geologie und Petrographie der Bernina (St. Moritz-Bad - Fuorcla Surlej).- Diplomarbeit am Geologischen Institut Univ./ETH Zürich.
- MÜTZENBERG, St. (1986): Ergebnisse geologischer Studien südlich Maloja.- SMPM 56: 466-472.
- QUERFURTH, H. (1977): CO₂-Messungen St. Moritz: Ergebnisse der geophysikalischen Bodenluftuntersuchungen in St. Moritz-Bad.- In: Fricke, K. (1977)
- STÖCKLIN, J. (1949): Zur Geologie der nördlichen Err-Gruppe zwischen Val d'Err und Weissenstein (Graubünden).- Diss Univ. Zürich.
- TRÜMPY, R. (1977): The Engadine Line: a sinistral wrench fault in the Central Alps.- Memoir of the geological Society of China, 2: p. 1-12.
- TRÜMPY, R. (1992): VSP/ASP Annual Convention 1992: Excursion Pontresina - Bernina-Pass - Tirano.- VSP/ASP-Bull. Vol. 59, Nr. 135: p. 19-26.
- TRÜMPY, R. & TROMMSDORFF, V. (1980): Excursion no. IV, Alps of Eastern Switzerland.- In: Geology of Switzerland (Wepf, Basel).
- STAUB, R. (1946): Geologische Karte der Bernina-Gruppe und ihrer Umgebung im Oberengadin, Bergell, Val Malenco, Puschlav und Livigno, 1: 50'000.- Geol. Spezialkarte Nr. 118.- Schweiz. Geol. Komm.
- WEXTEEN, P. (1988): Hydrogéologie et géochimie des eaux minérales riches en CO₂ de la région de Scuol-Tarasp (Basse Engadine, Grisons, Suisse).- Thèse no. 2299, Univ. Genève.
- WEXTEEN, P. (1988): Geochemistry of cold CO₂-rich springs of the Scuol-Tarasp-Region, Lower Engadine, Swiss Alps.- Jour. Hydrology 104: 77-92. Elsevier Sc. Publ. B.V., Amsterdam.