

## Vorausschauende Geothermik für tiefliegende Tunnelbauten – am Beispiel des Gotthard Basistunnels (Schweizer Alpen)

Ladislav RYBACH

### Zusammenfassung

Dieser Beitrag behandelt zwei Themen:

- 1) Prognose der Felstemperatur, und
- 2) Vorhersage von wasserführenden Zonen.

Die Kenntnis der ursprünglichen Felstemperatur ist bautechnisch von grosser Bedeutung: ihre Verteilung geht direkt in die Dimensionierung der Tunnelbelüftung für Bau und Betrieb ein. Die Anwendung eines Prognosewerkzeugs wird vorgestellt (numerisches Finite Element Verfahren), welches die Einflüsse der dreidimensionalen Topographie, von zirkulierenden Gebirgswässern und von instationären Effekten (Klimaschwankungen, Hebung/Erosion) berücksichtigt. Das Prognoseprofil des Gotthard Basistunnels weist Temperaturen bis knapp über 40 °C auf.

Das unerwartete Anfahren von wasserführenden Zonen, mitunter gefolgt von massiven Wassereintrüben, zählt zu den grössten geotechnischen Problemen im Tunnelbau. Ein Mess- und Berechnungsverfahren wird beschrieben, mit welchem Lage und Wasserführung solcher Zonen im voraus abgeschätzt werden können. Das Verfahren wurde im Piora Sondierstollen erfolgreich getestet.

### 1. Prognose der Felstemperatur

Der Gotthard-Basistunnel, welcher eine Länge von ca. 57 km und eine maximale Überdeckung von 2.5 km erreichen soll, stellt höchste Anforderungen an die Geologen und Ingenieure. Er durchquert (vgl. Abb. 1) mehrere tunnelbautechnisch günstige kristalline Einheiten (Aarmassiv, Gotthard-Massiv, Penninische Gneisszone), das tektonisch stark überprägte Tavetscher-Zwischenmassiv, welches eventuell schwierig zu durchörteren sein wird, und die sedimentäre Piora-Zone, welche sich erst kürzlich als unproblematisch erwiesen hat.

Generell nimmt die Felstemperatur mit zunehmender Überlagerung im Gebirgskörper zu. Im speziellen wird sie jedoch massgebend durch die vorherrschende dreidimensionale Topographie, die geologischen Einheiten in Form von verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten und die Wasserwegsamkeit bzw. generell die Wasserzirkulation bestimmt. Hinzu können instationäre Effekte treten, bedingt z.B. durch eiszeitliche Kältephasen oder durch Hebung/Erosion.

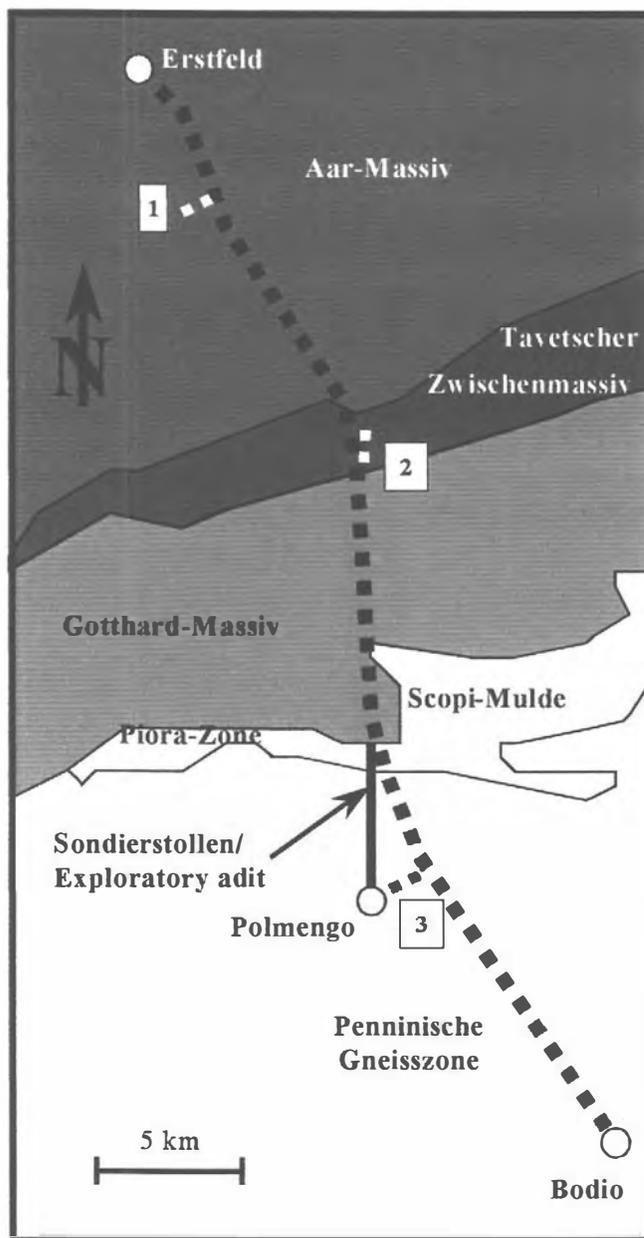


Abb. 1. Gotthard-Basistunnel: Linienführung und geologische Übersicht.  
Zwischenangriffe: 1 Amsteg, 2 Sedrun, 3 Faido.

### 1.1 Werkzeug, Modellierung

Zur Behandlung dieser Probleme eignet sich die numerische hydraulisch-thermisch gekoppelte Modellierung. Für die hier vorgestellten Arbeiten wird ein Finite-Elemente-Code, das Programm FRACTure verwendet, welches in der Forschungsgruppe Geothermik und Radiometrie an der ETH Zürich entwickelt wurde (Kohl 1992). Als Randbedingung wird an der Modellbasis stets ein konstanter Wärmefluss aus dem Erdinnern zugrunde gelegt. Dieser entspricht gemäss der Wärmeflusskarte der Schweiz (Medici & Rybach 1995) etwa  $60 \text{ mWm}^{-2}$ . Weiter wird an der Oberfläche der Modelle

eine höhenabhängige Bodentemperatur, basierend auf Daten der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA), definiert (Details siehe in Rybach & Pfister 1994).

Vorabklärende numerische Modellierungen und Parameter-tests wiesen klar die Richtung für die Entwicklung des eigentlichen Prognose-Modells auf: Es musste ein dreidimensionales Modell erzeugt werden, um dem Einfluss von Topographie und Wasserzirkulation im Gebiet des Gotthard-Basistunnels gerecht werden zu können. Im speziellen heisst dies, dass man davon ausgehen musste, dass einerseits Erhebungen und Täler, andererseits fliessendes Wasser auch ausserhalb der Tunnellinie für die Felstemperaturen entlang des Gotthard-Basistunnels relevant sind.

Fliessendes Wasser kann unter Umständen zu tiefgreifender Umverteilung von Wärme im Gebirgsuntergrund führen. Man spricht in diesem Zusammenhang von advektivem (im Gegensatz zu konduktivem) Wärmetransport. Die im Untergrund vorherrschenden Zirkulationsmuster sind einerseits durch die Lage des Bergwasserspiegels geprägt, andererseits durch die hydraulischen Eigenschaften der vorliegenden Gesteine. Der Bergwasserspiegel weist im Gegensatz zum Wasserspiegel des Alpenvorlandes meist eine dramatische Topographie auf. Aus diesem Grund und basierend auf der Tatsache, dass im Gebirge nur sehr wenige Pegelbohrungen vorhanden sind, ist meist wenig über den genauen Verlauf des Bergwasserspiegels bekannt. Abb. 2 zeigt den Verlauf des Bergwasserspiegels entlang des Gotthard-Basistunnels, wie er aus verschiedenen Daten (Bohrungen, Stollen, Gerinneanfänge) zusammengestellt wurde (Daten aus ATH 1993).

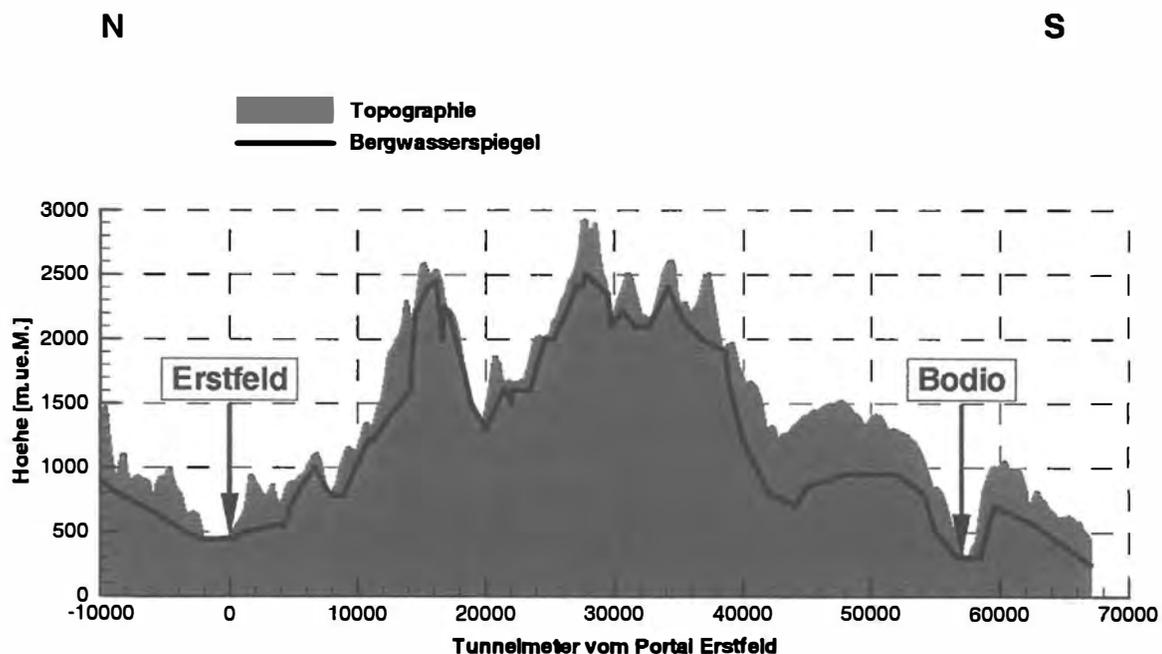


Abb. 2. Verlauf des Bergwasserspiegels in der Achse des geplanten Gotthard-Basistunnels. Zehnfach überhöhte Darstellung.

Ein bedeutender Faktor für die Gebirgswasser-Zirkulation ist die hydraulische Leitfähigkeit bzw. K-Wert von Gesteinen. Abb. 3 zeigt den Einfluss der Variation der hydraulischen Leitfähigkeit (in einem für das Gotthard-Gebiet realistischen Rahmen) auf die Felstemperatur auf Basistunnel-Niveau (2D Modell entlang der Tunnelspur).

Generell ist mit einer Zirkulation von kaltem Wasser aus Gipfel- in Talregionen zu rechnen (vgl. schematische Darstellung der Strömungswege in Abb. 3). Dies führt zu einer Auskühlung unter Bergkämmen bzw. aufgrund wieder aufsteigendem erwärmten Wasser z.T. zu Erwärmung unter Talschaften. Die Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit hat eine Intensivierung der Zirkulation und somit des beschriebenen Effektes zur Folge. Während also bei sehr kleinen K-Werten von  $10^{-11} \text{ ms}^{-1}$  bis  $10^{-10} \text{ ms}^{-1}$  noch wenig Änderungen verglichen mit dem rein konduktiven Fall zu erkennen sind, wird bei weiterer Erhöhung der Leitfähigkeit bis  $10^{-8} \text{ ms}^{-1}$  deutlich, dass eine totale Umverteilung der Wärme im Gebirge durch die Wasserzirkulation stattfindet.

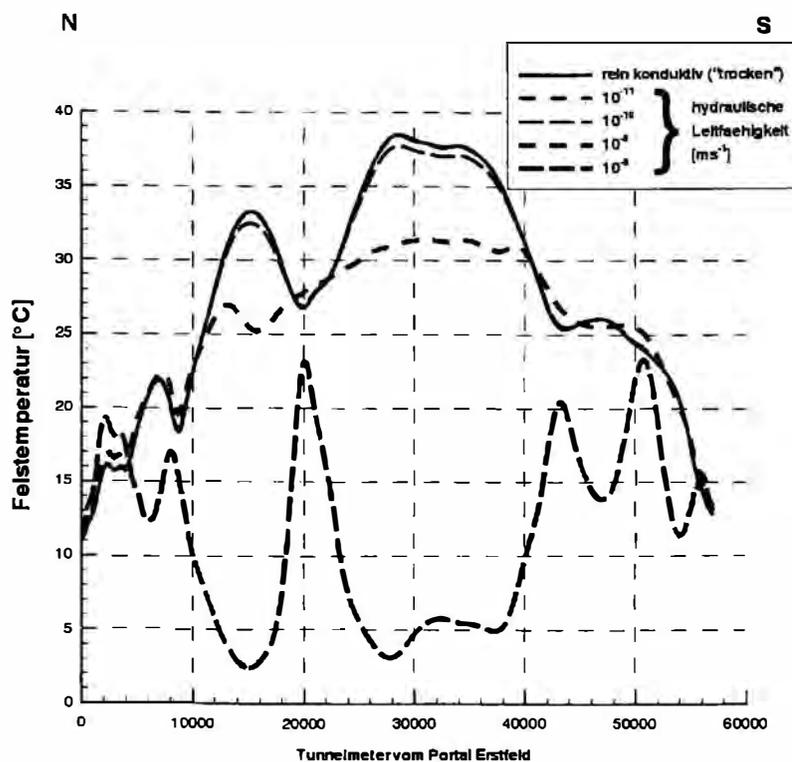


Abb. 3. Einfluss der hydraulischen Leitfähigkeit auf die Felstemperaturprognose. Schematisch eingetragen ist die generelle Zirkulation von Berg- in Talregionen. Berechnung hydraulisch-thermisch gekoppelt, Wärmeleitfähigkeit  $3.0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , Basiswärmefluss  $60 \text{ mWm}^{-2}$ .

Aufgrund von Parametertests und Sensitivitätsanalysen hat man schliesslich ein dreidimensionales numerisches Modell entwickelt, wie es sich in Abb. 4 präsentiert.

Beiderseits sowie am Anfang und Ende der Tunnellinie wurden mindestens zusätzlich 5 km berücksichtigt. Die querstehenden Bereiche entsprechen Zonen, in denen mit erhöhter hydraulischer Aktivität senkrecht zur Tunnelachse gerechnet werden musste (z.B. Piora-Zone, siehe unten). Die Basis des Modells wurde bei 50 km unter dem

Meeresspiegel angesetzt. Dem Modell wurden 13 geologische Einheiten mit verschiedenen thermischen (Wärmeleitfähigkeit, Wärmeproduktion) und hydraulischen (hydraulische Leitfähigkeit) Eigenschaften einverleibt. Als Randbedingung wurde auf Seite der Thermik eine höhenabhängige Oberflächentemperatur verwendet, auf Seite der Hydraulik ein Bergwasserspiegel. Die seitliche Begrenzung des Modells wird als hydraulisch und thermisch impermeabel (isoliert) betrachtet.

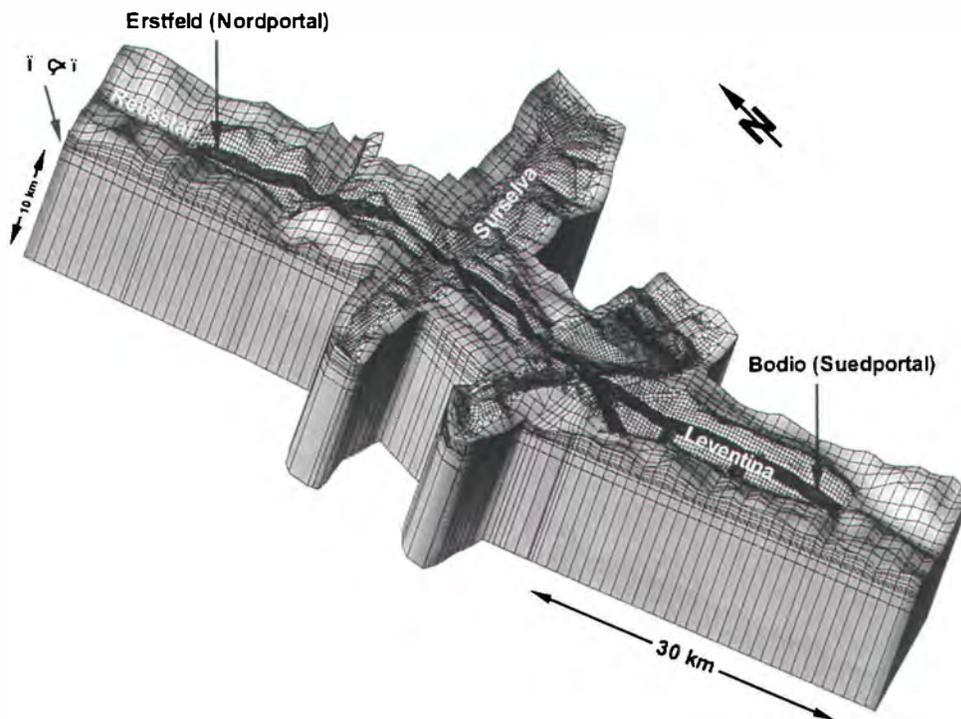


Abb. 4. Diskretisierung des 3D-Modells. 192'312 Knoten, 177'375 Elemente. Die unterste Schicht des FE-Gitters (von 11 km bis 50 km unter Meer) ist aus Gründen der Übersicht weggelassen. Die Querstruktur zwischen Surselva und Leventina ist der Bereich der Piöra-Zone.

Die Diskretisierung des sehr umfangreichen Modells (nahezu 200'000 Knoten/Elemente) musste in mehreren Phasen verwirklicht werden. In einem ersten Schritt wird mittels eines CAD-Programmes eine horizontale Ebene des Modells erzeugt. Im weiteren werden mehrere solcher Ebenen vertikal gestapelt und schliesslich basierend auf der Topographie verformt. Zudem müssen Materialparameter und Randbedingungen im Modell definiert werden.

Die Kaltwasser-Zirkulation in der Piöra-Mulde wirkt sich wie ein Kühlelement auf das benachbarte Gestein (in diesem Falle des Gotthard-Massiv und der penninischen Gneisszone vgl. Abb. 1) aus. Man geht nun davon aus, dass diese kühlende Zirkulation erst mit Ende der letzten Eiszeit, also vor rund 10'000 Jahren (thermisch relevant) begonnen hat. Der heutige thermische Zustand in diesem Gebirgsbereich wäre somit die Folge einer 10'000 Jahre langen Abkühlung. Dieses Konzept wurde im Modell realisiert, indem als Anfangsbedingung ein stationärer thermischer Zustand ohne

Einwirkung von Hydraulik bei einer Oberflächentemperatur von konstant 0°C angenommen wird. In der Folge wird die Hydraulik in Gang gesetzt.

Als weiterer Einflussfaktor muss noch der Effekt von Hebung/Erosion berücksichtigt werden. Hebung und Erosion beeinflussen das Temperaturfeld im Untergrund ebenfalls, was generell zu erhöhten Temperaturen führt. Der Einfluss nimmt mit der Tiefe ab. Bei der modellmässigen Behandlung wird davon ausgegangen, dass Hebung und Erosion zeitgleich ablaufen und dass ihre Geschwindigkeiten (mm/a) gleich sind. Numerische Modellierungen mit FRACTure haben gezeigt, dass auf Basistunnelniveau pro 0.1 mm/a Hebung/Erosion eine Temperaturerhöhung von 0.8 °C resultiert (Signorelli 2000). Dabei muss auch die Hebungs-/Erosionsgeschichte der Alpen in den letzten 1.4 Ma berücksichtigt werden.

Details über die Modellierung sind in Busslinger (1998) und Rybach & Busslinger (1999) zu finden.

## 1.2 Die Prognoseresultate

Ein vertikaler Schnitt durch das berechnete Temperaturfeld entlang dem Basistunnel (Abb. 5) betont nochmals den grossen thermischen Einfluss von Topographie und fliessendem Wasser im Gebirge. Im Bereich der Piora-Zone zeichnet sich die durch die starke Wasserzirkulation in der Piora-Zone bedingte Abkühlung des Gesteins ab. Es bildet sich ein steiler "Temperaturtrichter" aus. Man geht aufgrund der Erkenntnisse von Erkundungsbohrungen durch die Piora-Zone davon aus, dass auf Tunnelniveau mit keiner grossen Wasserzirkulation zu rechnen ist. Die im Felstemperaturprofil erkennbare Auskühlung kommt allein aufgrund einer "Deckenkühlung" (Zirkulation oberhalb Niveau des Tunnels) zustande.

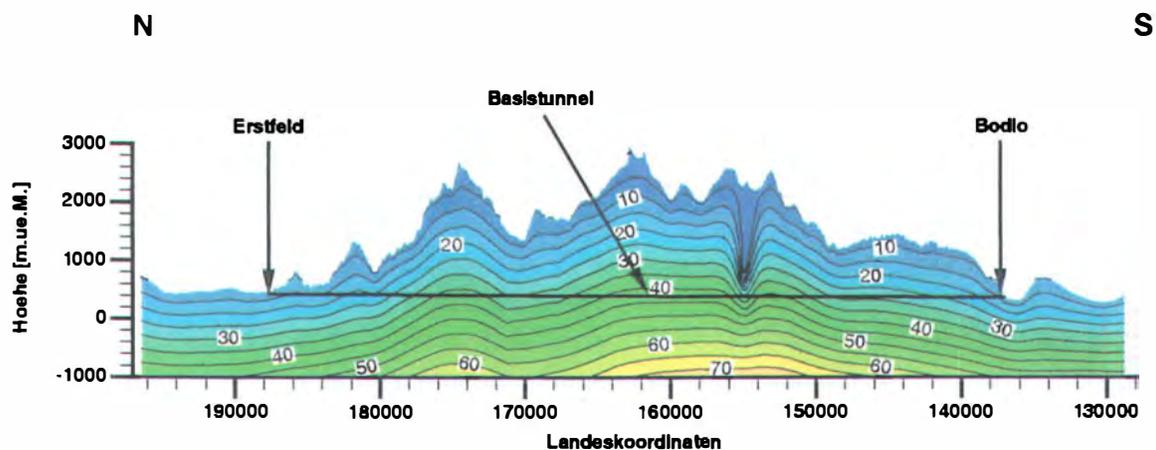


Abb. 5. Modelliertes Temperaturprofil im Vertikalschnitt in etwa entlang dem geplanten Basistunnel. Isothermen im Abstand von 5°C, vierfach überhöhte Darstellung. Hydraulisch-thermisch gekoppeltes, transientes 3D-Modell. Simulationsdauer 10'000 Jahre.

Betrachtet man die Linien gleicher Temperatur (Isothermen), so ist offensichtlich, dass diese über weite Bereiche in etwa der Vorgabe durch die Oberfläche folgen. Mit zunehmender Tiefe bzw. Entfernung von der Oberfläche wird dieser Effekt jedoch abgeschwächt. Deutlich sieht man auch, dass im Bereich der Piöra-Zone der Topographie-Effekt überprägt wird. Die erwähnte Zirkulation von kaltem Wasser in dieser Zone führt zu einer tiefgreifenden Auskühlung auch des der Piöra-Zone benachbarten Gesteins. Bis in grössere Tiefen (im 1000 m-Bereich ab Geländeoberfläche) können nahezu Temperaturen vorliegen, wie man sie an der darüberliegenden Oberfläche vorfindet.

Als Fazit der Prognose ist mit einer maximalen Felstemperatur von ca. 43°C über eine längere Strecke im Bereich von Tkm 30 (Landeskoordinate 16'000) zu rechnen. Dies ist der Bereich, in welchem die grösste Überlagerung auftritt. Allerdings wird dieser Verlauf durch die Zirkulation in der quer zur Tunnelachse streichenden Piöra-Zone abrupt unterbrochen, wo Tiefsttemperaturen bis ca. 26°C erwartet werden. In diesem Bereich ist die Prognoseunsicherheit dank der Modellanpassung an die jüngst durchgeführten Felstemperaturmessungen (siehe unten) relativ gering (ca.  $\pm 1^\circ\text{C}$ ). Ein weiteres Temperaturmaximum mit Werten zwischen 35°C und 40°C wird aufgrund der erhöhten Felsüberdeckung um Tkm 15 (Landeskoordinate 17'500) prognostiziert. Zu den Portalen hin nimmt die Felstemperatur schliesslich bis gegen 10°C ab.

Der Fehler der Felstemperaturprognose ausserhalb des Piöra-Einflussbereiches wurde ebenfalls im Vergleich Modelle und Messung abgeschätzt. Im Mittel beträgt er etwa  $\pm 4^\circ\text{C}$ . Der Fehler kann lokal grösser sein, da das modellierte Gebirge in der Natur kein Kontinuum darstellt.

## 2. Vorhersage von wasserführenden Zonen

Das Früherkennen von wasserführenden Zonen vor der Tunnelbrust ist für die Sicherheit und das Bauprogramm eminent wichtig. Bestehende Tunnelbauten, wie z.B. der Simplon-Bahntunnel oder der Mont-Blanc-Strassentunnel haben gezeigt, dass sich stark wasserführende Zonen im Verlauf der Felstemperatur entlang dem Tunnel abbilden; bereits etliche hundert Meter vor der Störzone kann beim Vortrieb eine deutliche Abkühlung des umliegenden Fels beobachtet werden („Kältetrichter“). Die absolute Abkühlung kann im Extremfall Werte von einigen Zehnergraden annehmen, wie z.B. im Simplontunnel (Kaltwasserschüttungen nach Anfahren mit ca. 10 °C und bis 1000 l s<sup>-1</sup>).

Die mesozoische Piöra-Zone (Karbonatgesteine, an der Oberfläche verkarstet) streicht E – W und liegt zwischen der penninischen Gneisszone im Süden und dem Kristallin des Gotthardmassivs im Norden (vgl. Abb. 1). Tiefgang und Wasserführung waren zu Beginn der Sondierarbeiten unbekannt. Ein spezielles Sondierprogramm, das als Kernstück einen rund 300 m über Basistunnelniveau liegenden, N – S orientierten Sondierstollen beinhaltet (Lage siehe Abb. 1), wurde zur Klärung dieser Fragen konzipiert. Die vorausschauende Geothermie war integrierender Bestandteil dieses Programmes.

Die Piöra-Zone kann im geothermischen Sinne als Naturphänomen betrachtet werden. Die deutlich ausgeprägte Kaltwasserzirkulation innerhalb der Zone wirkt sich auf das Nebengestein wie ein Kühlaggregat aus. Dies haben die umfangreichen im Sondier-

stollen Piora-Mulde durchgeführten Temperaturmessungen deutlich gezeigt (vgl. Abb. 6). Aber erst mit gezielter numerischer Modellierung konnte ein schärferes Bild der Piora-Zone gezeichnet werden.

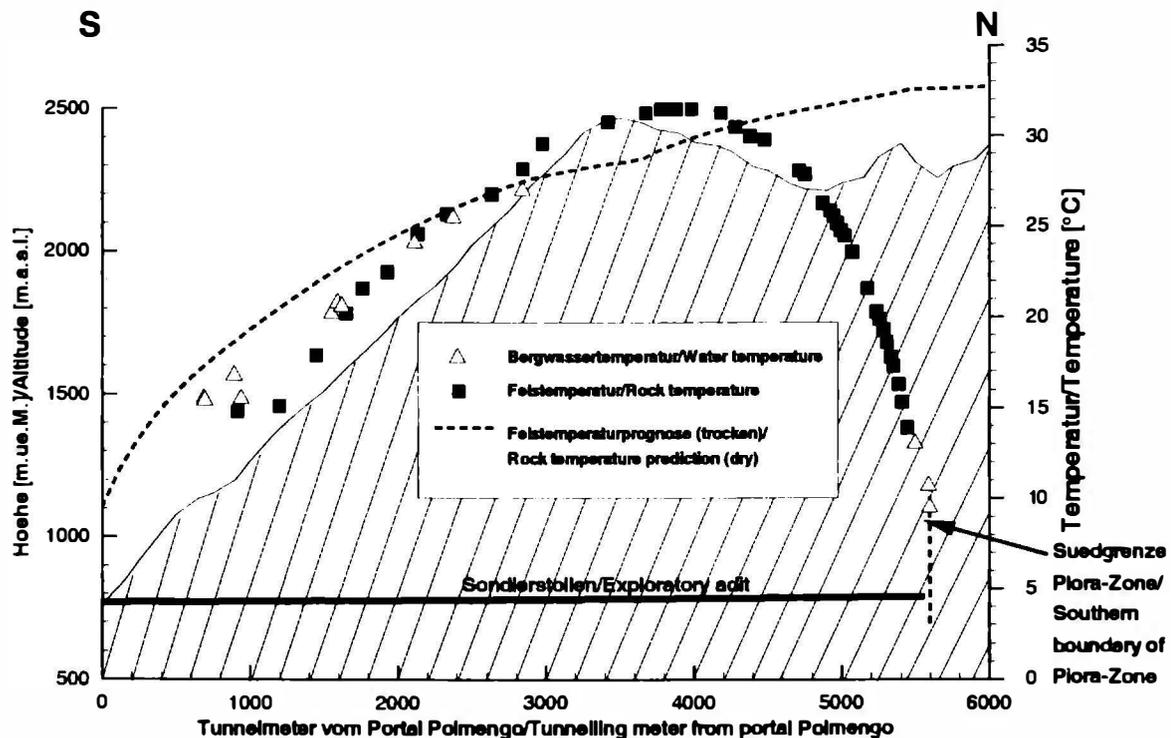


Abb. 6. Gemessener Temperaturverlauf und "trockene" Prognose für den Sondierstollen Piora-Mulde (Details siehe Text).

Dazu wurde zunächst an einem vereinfacht generalisierten, zweidimensionalen Modell die Auswirkung einer Kaltwasserzirkulation auf die Felstemperatur im Tunnel untersucht. Es handelt sich um ein numerisches Modell, welches als Oberfläche eine vereinfachte Topographie (Sägezahn) mit einem zentralen Bergkamm besitzt. Durch diesen Kamm soll ein Tunnel führen, dessen Verlauf eine vertikal verlaufende, wasserführende Kluftzone kreuzt. Die mit diesem Modell durchgeführten Parameterstudien haben weiter gezeigt, dass sich vor allem Änderungen in der Transmissivität der Kluftzone im Temperaturprofil abzeichnen. Die Form des Trichters weist also auf die Transmissivität der Kluftzone und damit auf die Grösse der zu erwartenden Wasserführung hin (näheres siehe in Busslinger & Rybach 1999). Allerdings erweist sich die Felstemperatur nur bis zu einer gewissen Grössenordnung der Klufttransmissivität empfindlich. Weitere Einflussfaktoren sind z.B. die Verteilung des hydraulischen Gradienten entlang der Kluft oder der Transmissivitätskontrast zum Nebengestein.

## 2.1 Ein spezifisches Messprogramm

Zu Beginn der Sondierarbeiten mittels des Piora-Sondierstollens wurde ein spezielles Messverfahren zur Erfassung der ursprünglichen Felstemperatur entwickelt. In regelmässigen Abständen wurde in speziellen Kurzbohrlöchern, welche mit einem Ankerbohrgerät quer zum Tunnelverlauf ins Parament vorgetrieben wurden, Temperaturmessungen mit einem tragbaren Gerät (PT Fühler; Eigenkonstruktion) vorgenommen. Bei der Wahl der Bohrlochtiefe, aber auch beim Messprogramm musste die thermische Beeinflussung durch die Tunnelbelüftung berücksichtigt werden (vgl. Abb. 7).

Der nach diesem Verfahren gemessene Felstemperaturverlauf entlang dem Sondierstollen ist in Abb. 6 dargestellt. Die Messresultate ergaben folgendes Bild: Zu Beginn zeichnete sich eine normale, d.h. dem Anstieg der Stollenüberlagerung entsprechende Erhöhung der Felstemperatur ab. Fels- und Bergwassertemperatur stiegen ca. bis Stollenmeter (Sm) 4.000 mehr oder weniger kontinuierlich auf 32°C an. Ab diesem Punkt konnte aber das stetig stärker werdende Absinken der Temperaturen entlang dem Sondierstollen beobachtet werden. Dies widersprach dem Verlauf, welcher durch eine damals durchgeführte numerische Modellierung prognostiziert wurde. Allerdings handelte es sich hierbei um eine rein konduktiv, d.h. eine ohne Berücksichtigung des thermischen Einflusses von fliessendem Wasser ausgeführte zweidimensionale Modellierung. Dies liess darauf schliessen, dass in der Piora-Zone bis in den Bereich des Sondierstollens kaltes Wasser zirkulieren muss, um diese Abkühlung zu bewirken. Allerdings liessen sich mit dieser Beobachtung alleine noch keine quantitativen Aussagen zum Charakter dieser wasserführenden Zone machen.

Die Felstemperatur ist schliesslich bis ca. 10°C abgesunken und die Südgrenze der Piora-Zone wurde durch eine verfeinerte thermisch-hydraulisch gekoppelte Modellierung auf ca. Sm 5.600 prognostiziert (siehe Abb. 6) und durch eine Vorausböhrung dort auch erbohrt. Diese Böhörung setzte ca. 4.000 m<sup>3</sup> Wasser und ca. 1400 m<sup>3</sup> Dolomitsand frei. Dies zeigte somit, dass der wasserführende Teil der Piora-Zone bis zum Niveau des Sondierstollens reicht. Ob jedoch auch auf Höhe des Gotthard-Basistunnels (ca. 300 m tiefer) mit dem wassergesättigten Zuckerdolomit zu rechnen ist, konnte noch nicht abgeschätzt werden.

Neben speziellen Schrägböhrungen (siehe unten) wurde nun die Geothermik eingesetzt, um weitere Erkenntnisse zur Zone zu gewinnen. Tracertests, welche von der Oberfläche aus durchgeführt wurden, proklamieren eine W-E-gerichtete Zirkulation in der Piora-Zone. Da dies senkrecht zum gemessenen Tunneltemperaturprofil verläuft, musste die Dreidimensionalität der Situation beachtet werden.

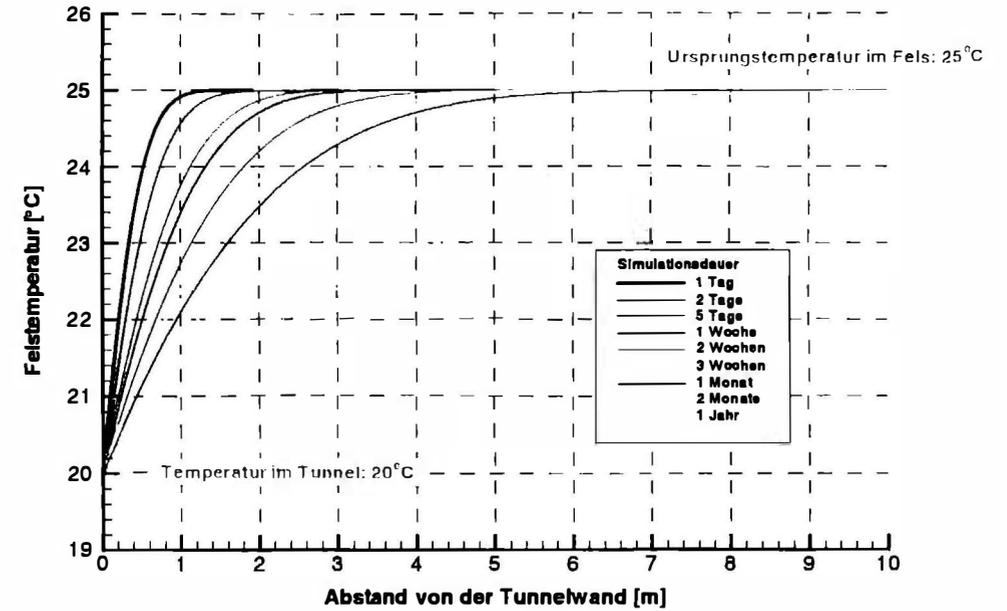
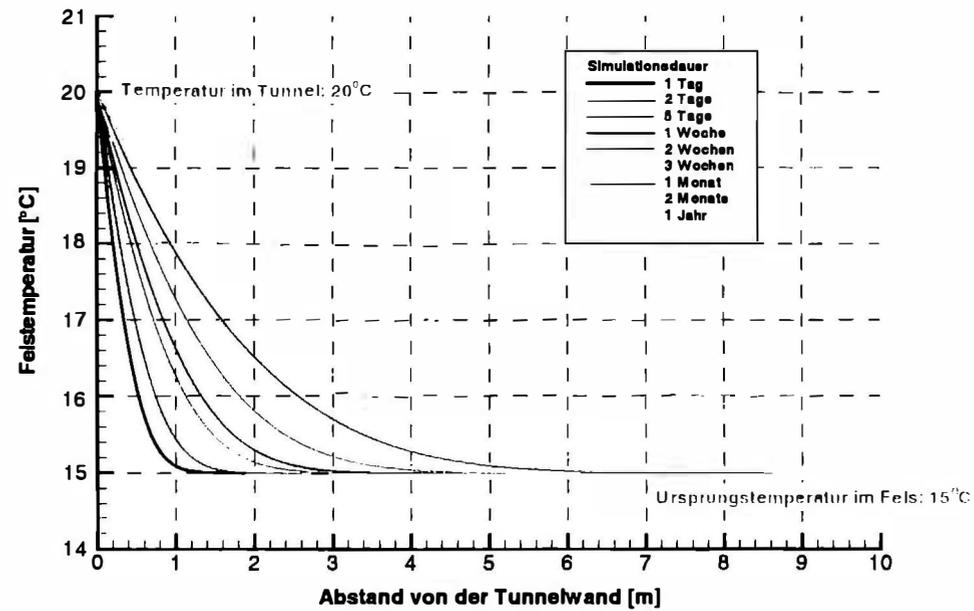


Abb. 7. Zur Vorbereitung der Messung im Sondierstollen Piora-Mulde wurden analytische Modellierungen zur Beeinflussung der Felstemperatur durch das Stollenklima durchgeführt. Der Stollen wird vereinfacht als Hohlzylinder betrachtet mit rein konduktiver Wärmeleitung bei einer konstanten Wärmeleitfähigkeit von  $3.0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Gezeigt sind die zwei Fälle einer Felserwärmung (links) und -abkühlung (rechts) durch die Stollenluft (jeweils  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

## 2.2 Modellierung und Resultate

Zur genaueren hydraulisch-thermischen Untersuchung des beobachteten Phänomens wurde ein dreidimensionales Modell der Piora-Zone erstellt. Da wenig Informationen über die Ausprägung der Zone vorhanden waren, musste bei der Modellgenerierung darauf geachtet werden, dass sowohl die Geometrie als auch die hydraulischen Eigenschaften der Piora-Zone variiert werden können. Unterschieden werden im Modell grundsätzlich die hochpermeablen Bereiche der Piora-Zone und die beinahe undurchlässigen Bereiche des angrenzenden kristallinen Nebengesteins.

Als Randbedingungen wurde, analog zum Modell zur Felstemperaturprognose für den Gotthard-Basistunnel (siehe oben), ein konstanter Wärmefluss aus dem Erdinnern, eine höhenabhängige Oberflächentemperatur sowie ein Bergwasserspiegel definiert. Das E – W gerichtete Modell hat etwa die Form eines Quaders mit 30 km Länge, 14 km Breite und 5 bis 7 km Tiefe. Anzahl Elemente: 71'188 (Details siehe in Busslinger & Rybach 1999).

Auch hier modelliert man das thermische Feld über 10'000 Jahre thermisch-hydraulisch gekoppelt, wobei als Anfangsbedingung der thermische Zustand des Gebirges bei 0°C Oberflächentemperatur (die Oberfläche war über längere Zeit total vergletschert) und ohne Einwirkung von fliessendem Gebirgswasser (nahezu kein Wasserzufluss aufgrund der Vergletscherung) eingesetzt wird.

Neben den Felstemperaturmessungen aus dem Sondierstollen konnten im laufenden Sondierprogramm weitere Daten aus Sondierbohrungen zum Vergleich mit dem Modell herangezogen werden. Es handelt sich, wie einleitend erwähnt, um Schrägbohrungen, welche vom Ende des Sondierstollens aus in Richtung der Piora-Zone gegen N z.T. bis auf Niveau des geplanten Basistunnels hinunter abgeteuft wurden. Mittels der Schrägbohrungen hat man festgestellt, dass die Piora-Zone in ihrem tieferen Bereich (auf Niveau des geplanten Basistunnels) aus trockenem festen Dolomit besteht, aber nicht wo die Grenze (Gipsspiegel?) zum stark wasserführenden oberen Teil der Zone liegt.

Durch schrittweise Anpassung und Variation von Geometrie und hydraulischen Eigenschaften der wassergesättigten Piora-Zone wurde versucht, eine möglichst gute Annäherung von modellierten und gemessenen Felstemperaturdaten zu erreichen. Die in den Bohrungen durchgeführten Temperaturmessungen konnten mit den Modellanpassungen sehr gut nachgebildet werden (siehe Abb. 8). Als eines der Resultate postuliert das Modell die Lage des Gipsspiegels in etwa 200 m über dem geplanten Basistunnel. Die Basis des wasserdurchtränkten Teils der Piora-Zone ist dabei durch eine erhöhte Zirkulation aufgrund einer Ausweitung gegen Nord und/oder erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit charakterisiert.

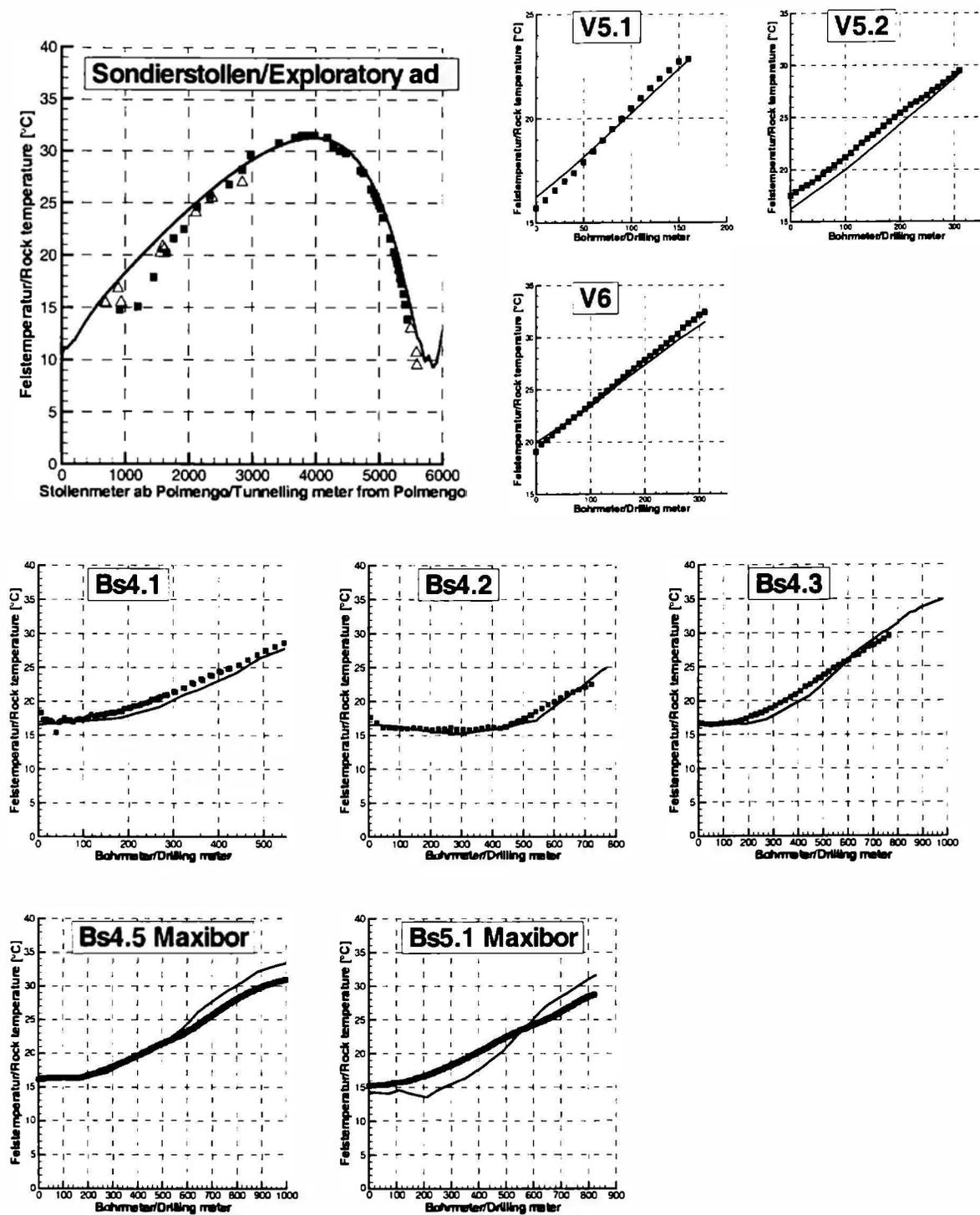


Abb. 8. Vergleich Messdaten Sondierbohrungen mit Modell. "Maxibor" ist ein spezielles Bohrloch-Temperaturmessverfahren. Lage der Bohrungen siehe Abb. 9.

Ein weiteres Resultat ist sicherlich die dreidimensionale Temperaturverteilung um die Piora-Zone. Abb. 9 zeigt einen Isothermen-Schnitt (Linien gleicher Felstemperatur) durch dieses Temperaturfeld in der Vertikalebene durch den Sondierstollen. Sehr deutlich ist die massive Auskühlung in der Piora-Zone (Umrisse markiert) auszumachen.

Durch die starke Wasserzirkulation wird vor allem der obere Teil der Zone in grosser Masse abgekühlt, nicht nur in lateraler Richtung sondern auch vertikal nach unten (bis unter Niveau des geplanten Gotthard-Basistunnels) (vgl. Abb. 5). Der zur gemessenen Temperaturabsenkung notwendige minimale Durchfluss durch die Zone bewegt sich in der Grössenordnung von  $50 \text{ ls}^{-1}$ , der Bereich mit der höchsten Darcygeschwindigkeit (ca.  $10^{-7} \text{ ms}^{-1}$ ) kommt in den obersten 500 - 600 m zu liegen.

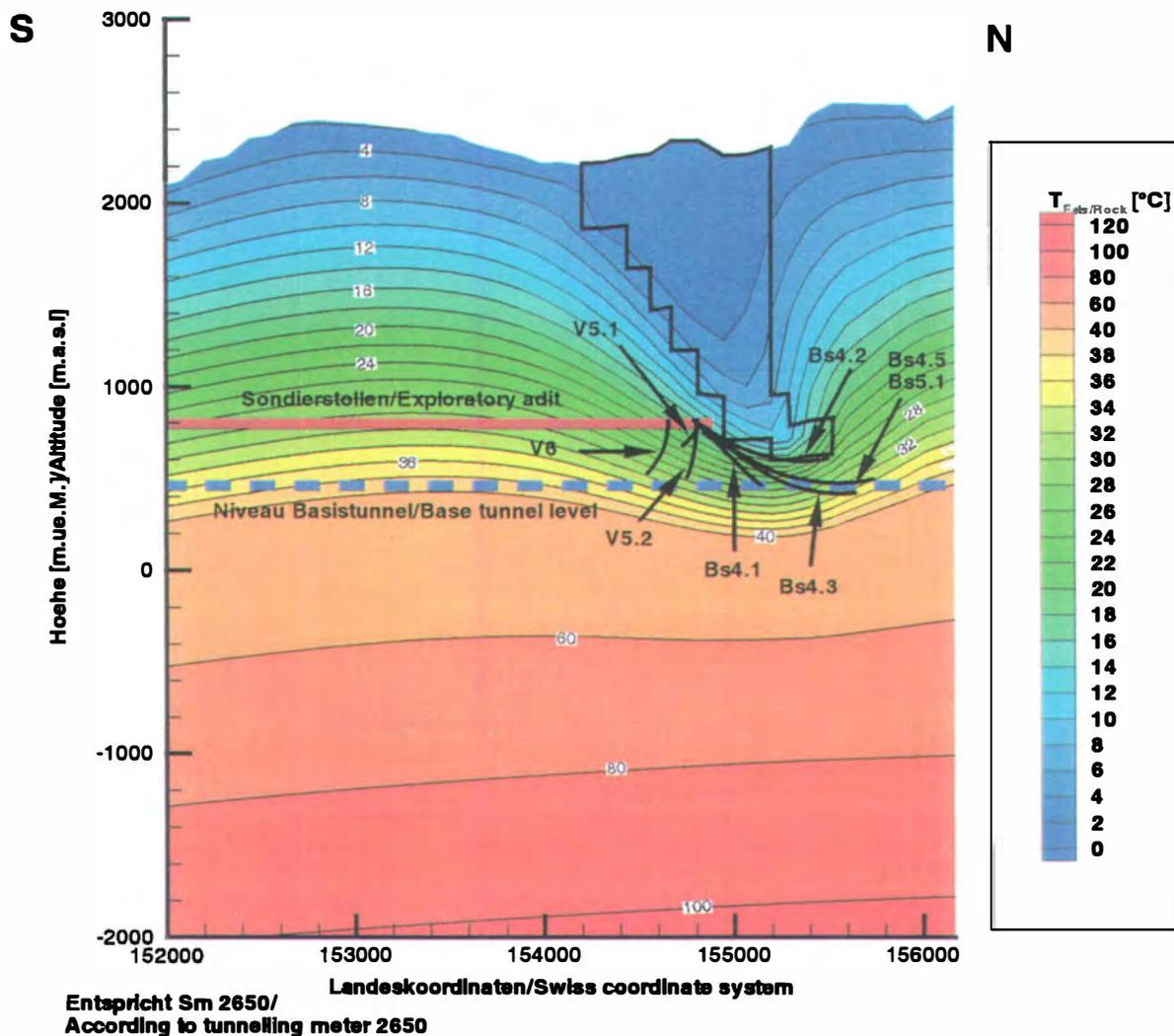


Abb. 9. Verteilung der Felstemperatur in einem Vertikalschnitt durch die Piora-Zone (in der Linie des Sondierstollens).  
Eingetragen sind die Umrissse der wassergesättigten Piora-Zone (Modell).

Man muss hier jedoch betonen, dass es sich hierbei um modellierte Fließgeschwindigkeiten und -mengen handelt, wie sie wahrscheinlich vorliegen, ohne dass ein Tunnel vorhanden ist. Durch den Tunnelbau wird das hydraulische System stark beeinträchtigt, da z.B. lokal plötzlich Druckbedingungen wie an der Oberfläche herrschen, was zu entsprechender Drainage führt.

### 3. Schlussfolgerungen

Die Felstemperaturprognose für tiefliegende Tunnel stellt ein aufwendiges Unterfangen dar. An zwei Beispielen konnte gezeigt werden, dass sowohl rein thermische Faktoren, hier die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins, aber auch hydraulische Parameter, im Beispiel die hydraulische Leitfähigkeit, unter begünstigenden Umständen die Felstemperatur entlang eines Tunnels entscheidend beeinflussen können. Um diesen und weiteren Einflüssen (Topographie etc.) gerecht zu werden, muss zur Prognose der ursprünglichen Felstemperatur ein dreidimensionales numerisches Modell verwendet werden. Wasserzirkulation und die damit zusammenhängende thermische Beeinflussung des Untergrundes wurden über 10'000 Jahre, d.h. seit dem Ende der letzten Eiszeit, sowie Hebung/Erosion seit 14 Millionen Jahren instationär modelliert. Die thermisch-hydraulisch gekoppelten dreidimensionalen Prognoserechnungen haben für den geplanten Gotthard Basistunnel Felstemperaturen bis über 40°C in den Bereichen der grössten Überlagerung entlang der Tunnelachse ergeben. Allerdings werden noch höhere Temperaturen durch den kühlenden Einfluss der Wasserzirkulation in der Piora-Zone unterbunden. Im weiteren zeigt die Prognose, dass ein grosses thermisches Potential in Form der Bergwärme bzw. von warmen Bergwässern entlang dem Basistunnel vorhanden ist, welches z.B. zur Gebäudeheizung genutzt werden könnte (vgl. Rybach & Wilhelm 1995).

Ein spezielles Messverfahren sowie das in der Felstemperaturprognose angewandte numerische Modellwerkzeug wurde zur Vorhersage von Lage und Wasserführung der Piora-Zone verwendet. Die Geothermik hat damit einiges zur Klärung der geologischen Fragen zur Piora-Zone beitragen können. Mittels der thermisch-hydraulisch gekoppelten Modellierung konnten mehrere Aussagen zum tunnelbautechnisch problematischen, wassergesättigten Teil der Piora-Zone gemacht werden: Die thermische Auswirkung der starken Kaltwasserzirkulation in der Piora-Zone ist eine Abkühlung des Nebengesteins des Gotthard-Massivs und der Penninischen Gneisszone sowohl seitlich als auch nach unten. "Nach unten" bedeutet indessen, dass im Bereich des geplanten Gotthard-Basistunnels mit einer deutlichen Felstemperaturabsenkung zu rechnen ist. Die resultierende Verteilung der Fliessgeschwindigkeiten deutet darauf hin, dass die Hauptdurchströmung der Piora-Zone im obersten Teil stattfindet.

All diese Daten sind in das laufende Tunnelprojekt Gotthard-Basistunnel eingeflossen und wurden in den tunnelbautechnischen Entscheidungsprozess miteinbezogen. Die angewandte Technik lässt sich gut zur Vorauserkundung von Störungszonen anwenden. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass mittels der vorgestellten Methoden eine verlässliche Felstemperaturprognose bzw. relevante Aussagen zu einer Störungszone nur gemacht werden können, wenn zur Anpassung des Modells genügend Messwerte aus Tunnel und/oder Bohrungen vorliegen. Es hat sich in diesem Projekt klar erwiesen, dass die Geothermik ein höchst nützliches Prognosewerkzeug im Tunnelbau darstellt.

### **Danksagung**

*Die hier zusammengefassten Arbeiten wurden im Auftrag und in enger Zusammenarbeit mit der AlpTransit Gotthard AG, Herrn S. Flury sowie dem Geologen Dr. T.R. Schneider ausgeführt. Sie sind in zahlreichen Berichten an den Auftraggeber ausführlich beschrieben. Daneben wurden sie in der Dissertation von A. Busslinger (1998) wissenschaftlich aufbereitet. Ein grosser Dank gebührt auch Herrn PD Dr. Th. Kohl (ETH Zürich) für wertvolle Diskussionen und Hinweise.*

## **4. Literatur**

- Arbeitsteam Hydrogeologie (ATH) 1993. Bergwasserzuflüsse und Beeinflussbarkeit des Bergwasserspiegels. Bericht Nr. 425 bh. AlpTransit Gotthard AG.
- Busslinger, A. 1998. Geothermische Prognosen für tiefliegende Tunnel. Dissertation ETH Zürich.
- Busslinger, A., Rybach, L. 1999. Geothermische Vorhersage von wasserführenden Zonen. TUNNEL 1/99, 33 - 41.
- Kohl, T. 1992. Modellsimulation gekoppelter Vorgänge bei Wärmeentzug aus heissem Tiefengestein. Dissertation ETH Zürich Nr. 9802, 149p.
- Medici, F., Rybach, L. 1995. Geothermal Map of Switzerland 1995 (Heat Flow Density). Matériaux pour la Géologie de la Suisse. Géophysique Nr. 30. Zürich, 36p.
- Rybach, L., Pfister, M. 1994. Temperature Predictions and Predictive Temperatures in Deep Tunnels. Rock Mechanics and Rock Engineering 27, 77-88.
- Rybach, L., Wilhelm, J. 1995: Potential and use of warm waters from deep Alpine tunnels. Proc. World Geothermal Congress Florence, 2199-2203.
- Rybach, L., Busslinger, A. (1999): Prognose der Felstemperatur Gotthard Basistunnel. In: S. Löw u. R. Wyss (Herausg.), „Vorerkundung und Prognose der Basistunnels am Gotthard und am Lötschberg“, A.A. Balkema, Rotterdam, 257-269.

Autor:

Prof.Dr. Ladislaus RYBACH

Institut für Geophysik, ETH Zürich-Hönggerberg

CH-8093 Zürich

Rybach @ geo.phys.ethz.ch