

Institut für Geophysik
Forschungsgruppe Geothermik und Radiometrie

Zürich, 1. Juli 1997

2506

HPP-Gebäude

Durchwahl-Nr. 01-633 20 76 / Sekretariat 01-633 2605
Telefonzentrale 01-633 11 11
Telefax 01-633 10 65
Telex 823480 eheb ch
E-mail rybach@geo.phys.ethz.ch

Herrn VD P. Testoni
Bundesamt für Verkehr
3003 Bern

Postadresse:

Prof. Dr. L. Rybach
Institut für Geophysik
ETH-Hönggerberg
CH-8093 Zürich

Wasserzirkulation in der Piora Zone

Sehr geehrter Herr Testoni

im September 1996 machte ich auf Veranlassung der FKGA den Vorschlag, die natürliche Wasserzirkulation in der Piora Zone mittels Modellrechnungen abzuschätzen. In der Folge hat die FKGA den Vorschlag an das BAV weitergeleitet; schliesslich erteilte die PL AlpTransit Gotthard Ende Januar 1997 einen entsprechenden Auftrag.

Kürzlich konnten die Arbeiten in meiner Forschungsgruppe abgeschlossen werden. In der Beilage sende ich Ihnen, nach Rücksprache mit Herrn P. Zbinden/SBB, einige Berichtsexemplare.

Mit freundlichen Grüssen

L. Rybach

(Prof. Dr. L. Rybach)



4. JULI 1997 BEILAGE

<input type="checkbox"/>	T
<input type="checkbox"/>	mio
<input type="checkbox"/>	nib
<input type="checkbox"/>	sic
<input type="checkbox"/>	sup
<input type="checkbox"/>	bic
<input type="checkbox"/>	the
<input type="checkbox"/>	brr
<input type="checkbox"/>	scr
<input type="checkbox"/>	glf
<input type="checkbox"/>	saj
<input type="checkbox"/>	ned
<input checked="" type="checkbox"/>	dok
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	

Kopie z.K. an - Herrn P. Zbinden/SBB
- Herrn K. Graf/Sekretär FKGA

BAV		- 3. JULI 1997			OFT	
TU Nr.:				Regi. Nr.:		
				212		
KOM	PER	D	PL	PR	<input checked="" type="checkbox"/>	SI

mit ein dx.



BAV	- 7. JULI 1997	OFT
TU Nr.:	Reg. Nr. 212	
KOM:		SI
		at
In openGEKO:	<input checked="" type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein

Ihr Zeichen
Votre référence
Vostro riferimento

Ihre Nachricht vom
Votre correspondance du
Vostra corrispondenza del

Bundesamt für Verkehr
Abteilung Infrastruktur
Amthausgasse 18
3003 Bern

Unser Zeichen
Notre référence
Nostro riferimento

Bern,

Peter Zbinden

04.07.1997

AlpTransit Gotthard

Sehr geehrte Damen und Herren

In der Beilage erhalten Sie gemäss Vereinbarung mit Herrn J. Salomon den Spezialbericht Nr. 2007

*Sondiersystem Piora-Mulde,
Geothermische Untersuchungen
3D-Modellierung vom Juni 1997*

in 3 Exemplaren mit der Bitte um Weiterleitung von 2 Exemplaren an die FK-GA. Wir machen Sie darauf aufmerksam, dass der Bericht nicht für die Registratur in der SGD bestimmt ist.

BAV	
- 8. JULI 1997	
<input checked="" type="checkbox"/>	T
	mio
	nib
	sic
	sup
	blc
	the
	br
	scr
	gif
	saj
	ned
	dok mit 1 ex

Beilagen erwähnt

P:ÜBERIGEOLIBAV_BER.DOC/in

Telefon
Téléphone
Telefono
0512 20 30 49

Telefax
Téléfax
Telefax
0512 20 36 95

1 von 1

Mit freundlichen Grüssen

Schweizerische Bundesbahnen
Der Stellvertreter des Delegierten
AlpTransit Gotthard

P. Zbinden
P. Zbinden

Parkterrasse 14
CH-3030 Bern



**Eidgenössische
Technische Hochschule
Zürich**

*Ecole polytechnique fédérale de Zurich
Politecnico federale di Zurigo
Swiss Federal Institute of Technology Zurich*

*Institut für Geophysik
Forschungsgruppe Geothermik und Radiometrie*

Durchwahl-Nr. 01 633 26 05
Telefonzentrale 01 633 44 11
Telefax 01 633 10 65

Sondiersystem Piora-Mulde
Geothermische Untersuchungen
3D-Modellierungen

Interner Bericht Nr. 2007

Zürich, im Juni 1997

Inhalt

Vorbemerkung, Auftrag	1
Geothermische Beobachtungen im Sondierstollen Piora-Mulde	2
Konzept, Modellaufbau, Modellierwerkzeug	3
Konzept	3
Materialdiskretisierung	3
Dimensionen	5
Randbedingungen	6
Modellierwerkzeug	6
Modellierungen, Sensitivitäten	7
Stationäre Modellierungen	9
Homogene Piora-Zone	9
Kakirit, Karst	13
Variation des Bergwasserspiegels	15
Instationäre Berechnungen	16
Homogene Piora-Zone	17
Kakirit, Karst	20
Advektionsgeschwindigkeiten	21
Schlussbemerkung	25
Ausblick	26
Verdankung	26
Literatur	27

Vorbemerkung, Auftrag

Grundlage dieser Arbeit sind die Resultate der geothermischen Untersuchungen im Rahmen des Untersuchungsprogrammes Sondiersystem Piora-Mulde Phase I (Busslinger A., Rybach L. 1996). Die zwecks Interpretation der Messdaten erstellten zweidimensionalen numerischen Modelle erwiesen sich als nur begrenzt aussagekräftig. Zur quantitativen Betrachtung der thermisch-hydraulischen Wechselwirkung im Bereich der Piora-Zone kann, so die Folgerung, nur ein dreidimensionales Modell verwendet werden. Die Anforderungen an diese Modellierung sind im „Antrag für dreidimensionale, hydraulisch-thermisch gekoppelte Modellrechnungen zur Wasserzirkulation in der Piora-Zone zuhanden FKGA“ (Prof. L. Rybach 1996) enthalten.

Den diesbezüglichen Auftrag erteilte die Projektleitung AlpTransit Gotthard Abschnitt GBT am 28. Januar 1997 (Vertrags-Nr. 97.30.021).

Die Forschungsgruppe Geothermik und Radiometrie am Institut für Geophysik der ETH Zürich zeichnet für die Ausführung der genannten Untersuchungen verantwortlich.

Geothermische Beobachtungen im Sondierstollen Piora-Mulde

Im Rahmen des von den Unterzeichneten konzipierten speziellen Messprogrammes wurde durch Messungen im Parament ein ganz spezifischer Verlauf der Felstemperatur entlang des Sondierstollens festgestellt: Die Felstemperatur nahm gegen N ab Sm 4200 sukzessive ab, statt wie für ein trockenes Gebirge prognosegemäss weiter anzusteigen (Abbildung 1).

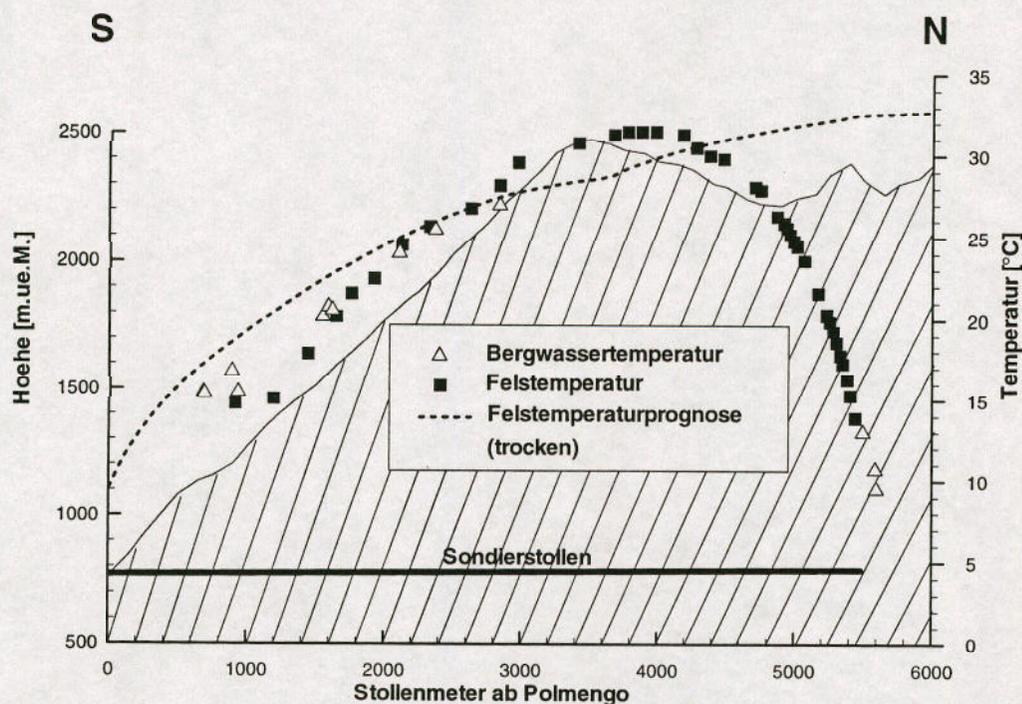


Abbildung 1 Gemessener Temperaturverlauf und „trockene“ Prognose für den Sondierstollen Piora-Mulde. Die drei letzten Bergwassermesswerte stammen aus Erkundungsbohrungen.

Die Aufgabe der Modellierung bestand darin die gemessene Temperaturkurve nachzubilden, indem für die starke Abkühlung zirkulierende Bergwässer verantwortlich gemacht werden. Gesucht ist letztendlich die Intensität und tiefenmässige Verteilung des Wasserflusses (= Durchsatz in Liter pro m^2 und Sekunde) die notwendig ist um die beobachtete markante Abkühlung (Temperaturtrichter) zu erklären.

An dieser Stelle muss betont werden, dass über den Temperaturtrichter nur wenige Daten vorliegen: Es gibt nur Messwerte im Nebengestein (= reine Wärmeleitung); diese befinden sich in einer einzigen Geraden („Nadelstich“), d.h. es liegt keine dreidimensionale Information vor; Messwerte nur vom „halben Trichter“; vorläufig keine Werte innerhalb der Piora-Zone selbst.

Konzept, Modellaufbau, Modellierwerkzeug

Konzept

Ziel der zweiten Modellierungsphase zur Geothermik der Piora-Zone war es ein möglichst schematisches Modell, im Sinne eines Blockmodells, zu entwickeln, welches die im Sondierstollen vorgenommenen Messungen reproduzieren konnte. Dies sollte ermöglichen erste Aussagen zum Fließregime und zur Geometrie der Piora-Zone bis mindestens zum Niveau des Basistunnels zu machen.

Gemäss Auftrag waren die hydrogeologischen Charakteristika der Piora-Zone zu variieren (Tiefgang, hydraulische Durchlässigkeit); zusätzlich waren besondere potentielle wasserführende Systeme wie Kakirit und Karst zu betrachten (Angaben Dr. T. R. Schneider).

Aus diesem Anforderungsprofil ergab sich folgende Modellcharakteristik.

Materialdiskretisierung

Beim Aufbau des Modells wurde bewusst auf die Berücksichtigung aller bekannten geologischen Einheiten bzw. Schieferungsrichtungen verzichtet. Es wurden generell nur zwei Einheiten unterschieden: Einerseits das Gestein der Piora-Zone, welches mangels genauerer Kenntnis als homogen betrachtet wurde, andererseits das umliegende Nebengestein (Gesteine der Peninischen Gneiszone, bzw. des Gotthardmassives), für deren Materialparameter ebenfalls ein möglichst repräsentatives Mittel angenommen wurde. Die Scopi-Mulde wurde im Modell berücksichtigt, jedoch mit der Option sie zu vernachlässigen („abzuschalten“). Eine Modell-Aufsicht ist in Abbildung 2 dargestellt. Der schematisierte Verlauf der Piora-Zone ist der geologischen Karte (Dr. T. R. Schneider AG 1993) entnommen.

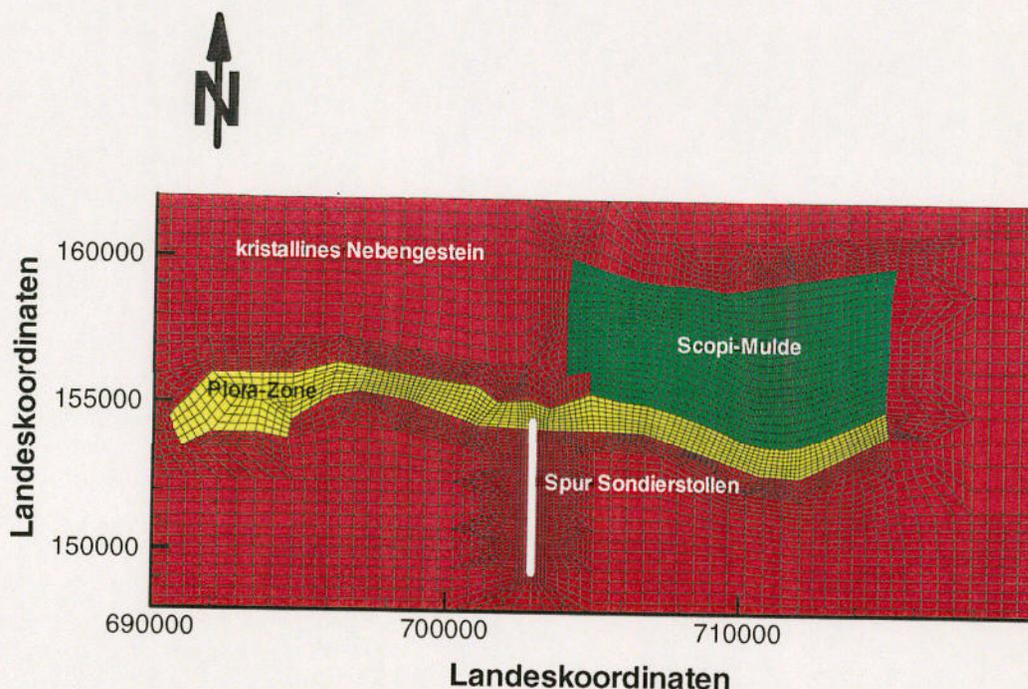


Abbildung 2 Aufsicht der FE-Diskretisierung 3D-Modell Piora-Zone. Die Piora-Zone ist gelb die Scopi-Mulde grün. Weiss markiert ist die Spur des Piora-Sondierstollens. Überlagert ist das Finite Elemente Gitter. Anzahl Elemente: 5648.

Im Vertikalschnitt (Abbildung 3) in der Linie des Stollens wird die Absicht der Materialverteilung deutlich. Die Materialien sind mit unterschiedlichen Farben markiert. Jedes dieser „Materialgebiete“ kann (mit den entsprechenden Materialparametern) als der Piora-Zone zugehörig oder als Nebengestein definiert werden. Bei Materialbereich 1 und 2 handelt es sich jedoch immer um Piora-Zonen-Gestein. Dadurch lassen sich, in beschränkter Masse, einige Zonengeometrien, bzw. -tiefen realisieren. Das Einfallen der Südgrenze der Piora-Zone wurde, als Stufen schematisiert, dem momentanen Erkenntnisstand angepasst (Dr. T. R. Schneider AG 1996: Geologische Befunde nach Abschluss des Stollenvortriebes Phase 1). Das räumliche Auftreten sowie die erbohrte Mächtigkeit der Zone auf Sondierstollenniveau entspricht dem damaligen Kenntnisstand (Bohrresultate BO1.3, mündliche Information Dr. T. R. Schneider AG).

Entlang der Südbegrenzung der Piora-Zone wurde ein Kakirit in Form von speziellen zweidimensionalen Elementen vorgesehen (Abbildung 3). Durch gezielte Wahl der entsprechenden Materialparameter konnte dieser im Modell aktiviert oder deaktiviert werden. Im gleichen Sinne wurde im zentralen Bereich der Zone ein Karst eingesetzt (Abbildung 3). Das Positionieren des Karstes erfolgte aufgrund der Tracertests in der Murinascia Grande und der Ri dei Calcestri, welche sehr hohe Fließgeschwindigkeiten in Richtung Valle Sta. Maria erkennen liessen (Arbeitsteam Hydrogeologie, Dr. Heinrich Jäckli AG 1994).

Sowohl der Kakirit als auch der Karst erstreckt sich lateral (d.h. von West nach Ost) über die ganze Piora-Zone.

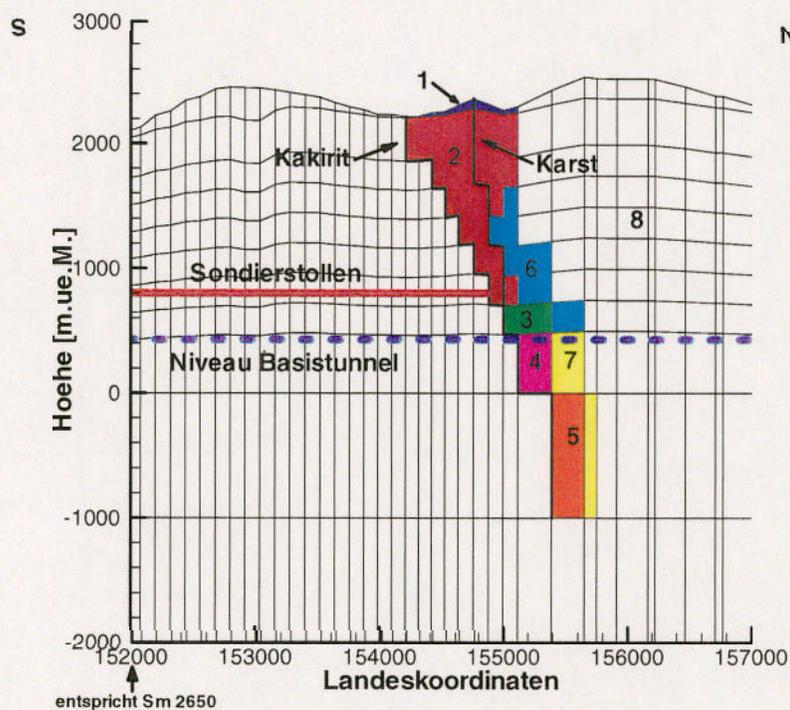


Abbildung 3 Vertikalschnitt FE-Diskretisierung 3D-Modell Piora-Zone (Ausschnitt) in der Linie des Sondierstollens (markiert). Illustriert ist die Verteilung jener Materialbereiche (1 - 8, vgl. Text), welche der Piora-Zone oder dem Nebengestein zugeordnet eine Variation der Geometrie der Zone erlauben. Desweiteren ist der Verlauf des Kakirites und des Karstes eingetragen. Überlagert ist das Finite Elemente Gitter.

Die Wärmeleitfähigkeit aller verwendeten Einheiten beträgt $3.00 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, die spezifische Wärmekapazität des kristallinen Nebengesteins wurde auf $2.5 \cdot 10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ und der Piöra-Zone auf $3 \cdot 10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ geschätzt. Die Porosität wurde nicht in die Berechnung mit einbezogen. Die hydraulischen Eigenschaften, bzw. die hydraulische Leitfähigkeit K wurden im Modell variiert (vgl. Kap. Modellierungen, Sensitivitäten).

Dimensionen

Die Dimensionierung eines numerischen Modells hat entscheidenden Einfluss auf die zu berechnenden Werte. Sind laterale oder vertikale Ausdehnung zu klein, können Randeffekte auftreten.

Aus diesem Grund wurde die Basis des Modells auf 5000 m unter Meer ausgelegt. Bei der Erstreckung im Horizontalschnitt musste einerseits die volle Länge des Sondierstollens (ab Polmengo) andererseits der (gemäss geologischer Karte Dr. T. R. Schneider AG, 1993) ganze Bereich der Piöra-Zone berücksichtigt werden. Zudem wurde ein angemessener „Randbereich“ im Nebengestein vorgesehen. Das Resultat dieser Diskretisierung ist in Abbildung 2, Abbildung 3 und Abbildung 4 illustriert.

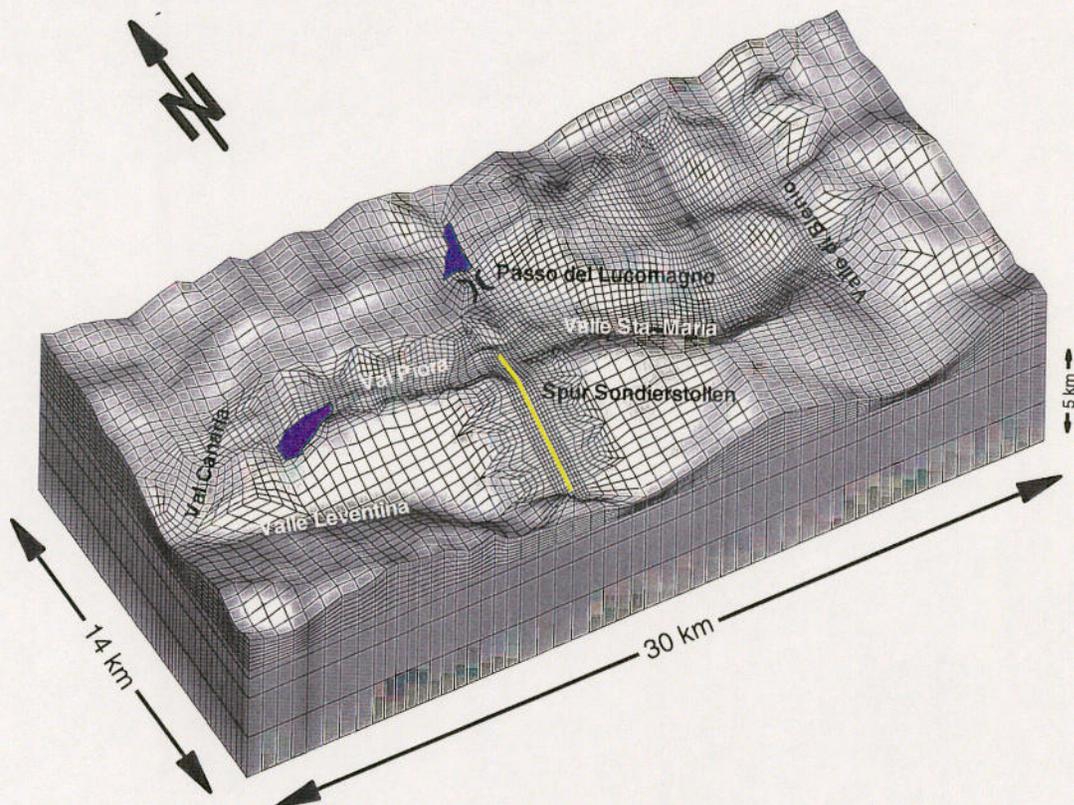


Abbildung 4 Gesamtansicht der 3D-Diskretisierung zum 3D-Modell Piöra-Zone. Die eingetragenen geographischen Lokalisationen, sowie der angedeutete Massstab verdeutlichen die Ausmasse des Modells. Die Oberflächenspur des Sondierstollens ist als Linie markiert. Anzahl Elemente: 71188.

Randbedingungen

Thermische Randbedingungen im Modell sind die Oberflächen-, bzw. Bodentemperatur und der Basiswärmefluss.

Während der Wärmefluss in 5000 m unter Meer mit 80 mWm^{-2} festgelegt wurde, musste für die Oberflächenrandbedingung der thermische Freiluftgradient berücksichtigt werden gemäss der Beziehung

$$T(h) = 13.03 - 0.0046 * h \text{ [}^\circ\text{C]}$$

eingesetzt, wobei h die Meereshöhe [m], und T(h) die Bodentemperatur [$^\circ\text{C}$] ist (Rybach L., Pfister M. 1994).

Für die Hydraulik wurde ein zeitlich konstanter Bergwasserspiegel angenommen. Da hier genaue Höhendaten mangels Bohrungen fehlen, wurde eine Annäherung des Wasserspiegels basierend auf den Höhenlagen der Gerinneanfänge im betrachteten Gebiet (vgl. Kölla: Arbeitsteam Hydrogeologie (ATH) 1993) durchgeführt.

In Bohrungen im Sondierstollen wurden Wasserdrucke von ca. 100 bar gemessen, der Bergwasserspiegel liegt dort somit ca. 1000 m über dem Stollenniveau. Auf diesen Punkt wird in Kapitel Variation des Bergwasserspiegels eingegangen.

Die seitlichen Modellgrenzen sind als hydraulisch und thermisch impermeabel angenommen.

Modellierwerkzeug

Für alle durchgeführten Modellrechnungen wurde das Programm FRACTure verwendet. Es handelt sich hierbei um eine Eigenentwicklung der Forschungsgruppe Geothermik und Radiometrie des Instituts für Geophysik (Kohl, T. 1992). Mit diesem Werkzeug sind ein- bis dreidimensionale Finite-Elemente-(FE-)-Modellierungen möglich. Es kann hydraulisch-thermisch gekoppelt und stationär oder instationär gerechnet werden.

Modellierungen, Sensitivitäten

Frühere allgemeine Modellierungen mit Schwerpunkt Beeinflussung des Felstemperaturfeldes im Bereich eines Tunnels durch eine durchlässige Zone mit Wasserzirkulation (Busslinger A., Rybach L. 1997) haben gezeigt, dass die Transmissivität der entsprechenden wasserführenden Einheiten im Gebirge eine sehr wichtige Grösse ist. Die im Folgenden beschriebenen Modellierungen zielen somit im Wesentlichen auf eine Variation dieses Wertes ab.

Mit dem beschriebenen Modell wurden verschiedene Modellläufe vorgenommen, diese sind in der Tabelle 1, Tabelle 2 und Tabelle 3 zusammengefasst. Ziel war es das Modell auf die Sensitivität bezüglich bestimmter Parameter zu testen. Im genaueren waren dies die K-Werte, die Tiefenerstreckung und begrenzt die Ausdehnung der Piöra-Zone, sowie das Vorhandensein von Kakirit- bzw. Karst-Zonen.

Im Laufe der Arbeiten hat sich herausgestellt, dass thermisch stationäre Modelle das im Stollen gemessene Temperaturfeld nicht zufriedenstellend reproduzieren können.

Tabelle 1 Modellläufe homogene Piöra-Zone

Bezeichnung	transient (T) stationär (S)	K [ms ⁻¹]	Basis [m.ü.M.]	Verbreiterung ca. im Höhenbereich [m.ü.M.]	Bemerkung
H1	S	10 ⁻⁸	600	-	
H2	S	10 ⁻⁷	600	-	
H3	S	10 ⁻⁶	600	-	
H4	S	10 ⁻⁵	600	-	
H5	S	10 ⁻⁷	400	-	
H6	S	10 ⁻⁶	400	-	
H7	S	5*10 ⁻⁶	400	-	
H8	S	10 ⁻⁵	400	-	
H9	S	10 ⁻⁷	400	1600 bis 400	
H10	S	10 ⁻⁷	0	-	
H11	S	10 ⁻⁷	-1000	-	
H12	S	5*10 ⁻⁷	-1000	-	
H13	S	10 ⁻⁷	-1000	400 bis -1000	
H14	S	10 ⁻⁷	-1000	1600 bis -1000	
H15	S	10 ⁻⁶	400	-	Bergwasser- spiegel 90 %
H16	S	10 ⁻⁶	400	-	Bergwasser- spiegel 80 %
H17	T	10 ⁻⁵	600	-	
H18	T	10 ⁻⁶	400	-	
H19	T	10 ⁻⁷	400	-	

Tabelle 2 Modellläufe homogene Piora-Zone ($K = 10^{-8} \text{ ms}^{-1}$), Kakirit entlang S-Begrenzung

Bezeichnung	transient (T) stationär (S)	K [ms^{-1}]	Basis [m.ü.M.]	Kakirit-Mächtigkeit [m]
KK1	S	10^{-8}	-1000	1
KK2	S	10^{-6}	-1000	1
KK3	S	10^{-5}	-1000	1
KK4	S	10^{-4}	-1000	1
KK5	S	10^{-5}	-1000	15
KK6	S	10^{-5}	400	15
KK7	T	10^{-5}	400	15

Tabelle 3 Modellläufe homogene Piora-Zone ($K = 10^{-8} \text{ ms}^{-1}$), Karst im Bereich der Tracertests

Bezeichnung	transient (T) stationär (S)	K [ms^{-1}]	Basis [m.ü.M.]	Karst-Mächtigkeit [m]
KS1	S	10^{-4}	400	1
KS2	S	10^{-3}	400	1
KS3	S	10^{-4}	-1000	1
KS4	S	10^{-3}	1400	1
KS5	S	$3 \cdot 10^{-2}$	1400	1
KS6	T	10^{-4}	400	1

Stationäre Modellierungen

In einem ersten Schritt wurden einige zeitunabhängige Modellierungen vorgenommen. Die reinen Rechenzeiten für diese Modelle sind relativ kurz (ca. 30 Minuten) und eignen sich dementsprechend gut, um Sensitivitätsanalysen durchzuführen und damit die relevanten Parameter zu identifizieren. In Tabelle 1, Tabelle 2 und Tabelle 3 sind die entsprechenden Läufe mit S (stationär) gekennzeichnet.

Homogene Piora-Zone

Wie einleitend erwähnt wurde ein hydraulisches Blockmodell für die Piora-Zone definiert. Mangels gegenwärtiger Kenntnis des genaueren Aufbaues der Zone, bzw. der örtlichen Verteilung von Dolomit, Rauhwacke und zuckerartigem Dolomit, wurde der Zone eine einheitliche hydraulische Leitfähigkeit zugeordnet.

Definiert man die Piora-Zone bis in eine Tiefe von ca. 600 m.ü.M. (vgl. Abbildung 3, Färbung 1 und 2) und führt Berechnungen für verschiedene K-Werte der Zone durch, so resultiert eine Temperaturverteilung entlang des Stollens gemäss Abbildung 5.

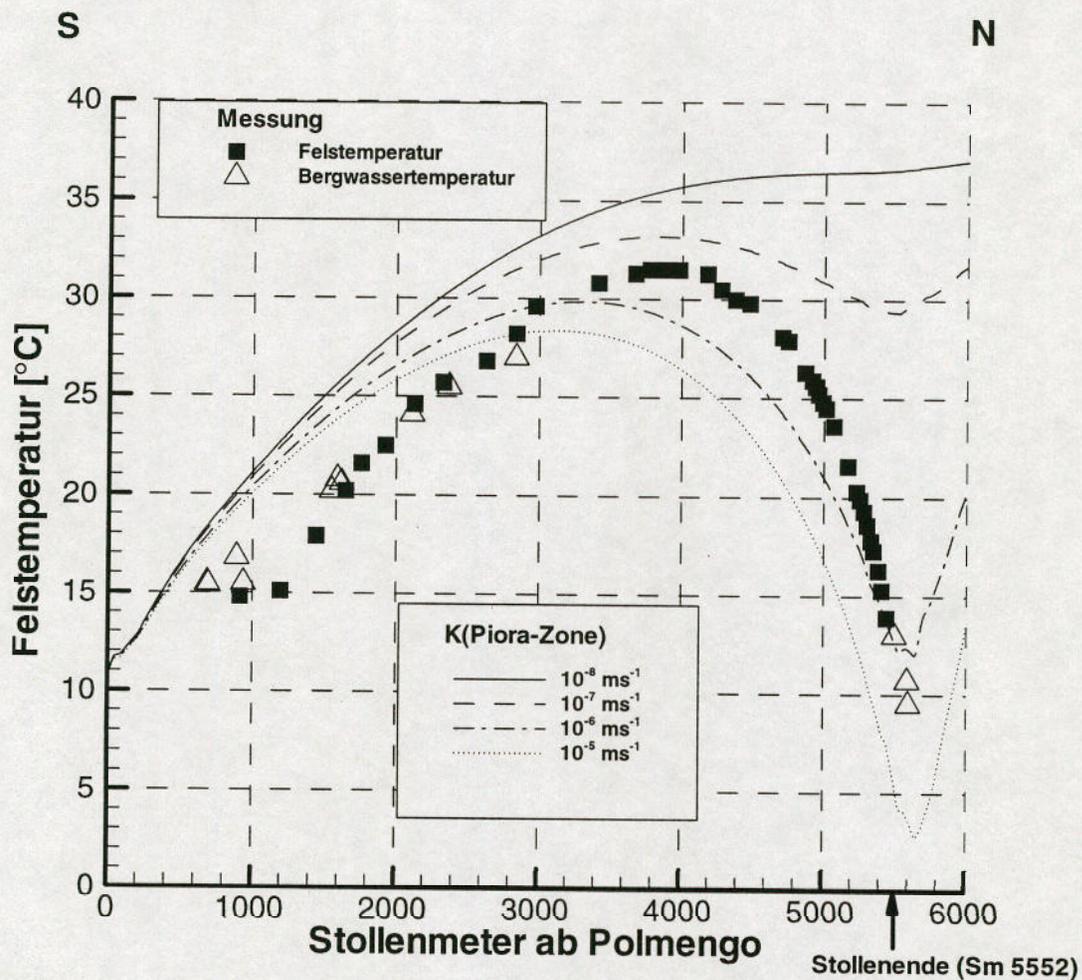


Abbildung 5 Felstemperaturverteilung entlang dem Piora-Sondierstollen für verschiedene K-Werte der Piora-Zone. Basis der Piora-Zone im Bereich Sondierstollen bei ca. 600 m.ü.M.. Berechnung stationär. Modellläufe H1 - H4.

Gut zu erkennen ist, dass mit einem eingesetzten K-Wert von 10^{-8} ms^{-1} noch kein Einfluss der Abkühlung aufgrund der Advektion in der Zone auszumachen ist. Erst mit grösseren K-Werten bildet sich ein Temperaturtrichter aus. Ein deutlicher Sprung in der Abkühlung

ist zwischen 10^{-7} ms^{-1} und 10^{-6} ms^{-1} auszumachen, danach rücken die Kurven zusammen. Damit die tiefst gemessenen Felstemperaturen modelliert werden können, muss eine hydraulische Leitfähigkeit von 10^{-6} bis 10^{-5} ms^{-1} eingesetzt werden.

Allerdings zeigt sich auch sehr deutlich, dass mit dem Erhöhen des K-Wertes die wesentlich höher gemessenen Felstemperaturen um Sm 4000 nicht mehr nachgebildet werden können.

Bei einer Piora-Zone mit Basis bei ca. 400 m.ü.M. (Abbildung 3, Färbung 1, 2 und 3) ist grundsätzlich das selbe Felstemperaturfeld im Stollen zu beobachten. Allerdings genügen hier schon kleinere K-Werte, um den selben Effekt zu erzielen (vgl. Abbildung 6). K-Werte von 10^{-6} ms^{-1} bis 10^{-5} ms^{-1} reproduzieren die tiefsten Temperaturen. Wiederum ist ein Sprung zwischen 10^{-7} ms^{-1} und 10^{-6} ms^{-1} feststellbar. Danach lässt sich zusätzlich erkennen, dass zwischen dem modellierten Felstemperaturverlauf für $5 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ und 10^{-5} ms^{-1} kein wesentlicher Unterschied mehr zu erkennen ist. Auch hier zeigt sich die Diskrepanz der zu tief modellierten Temperaturen um Sm 4000.

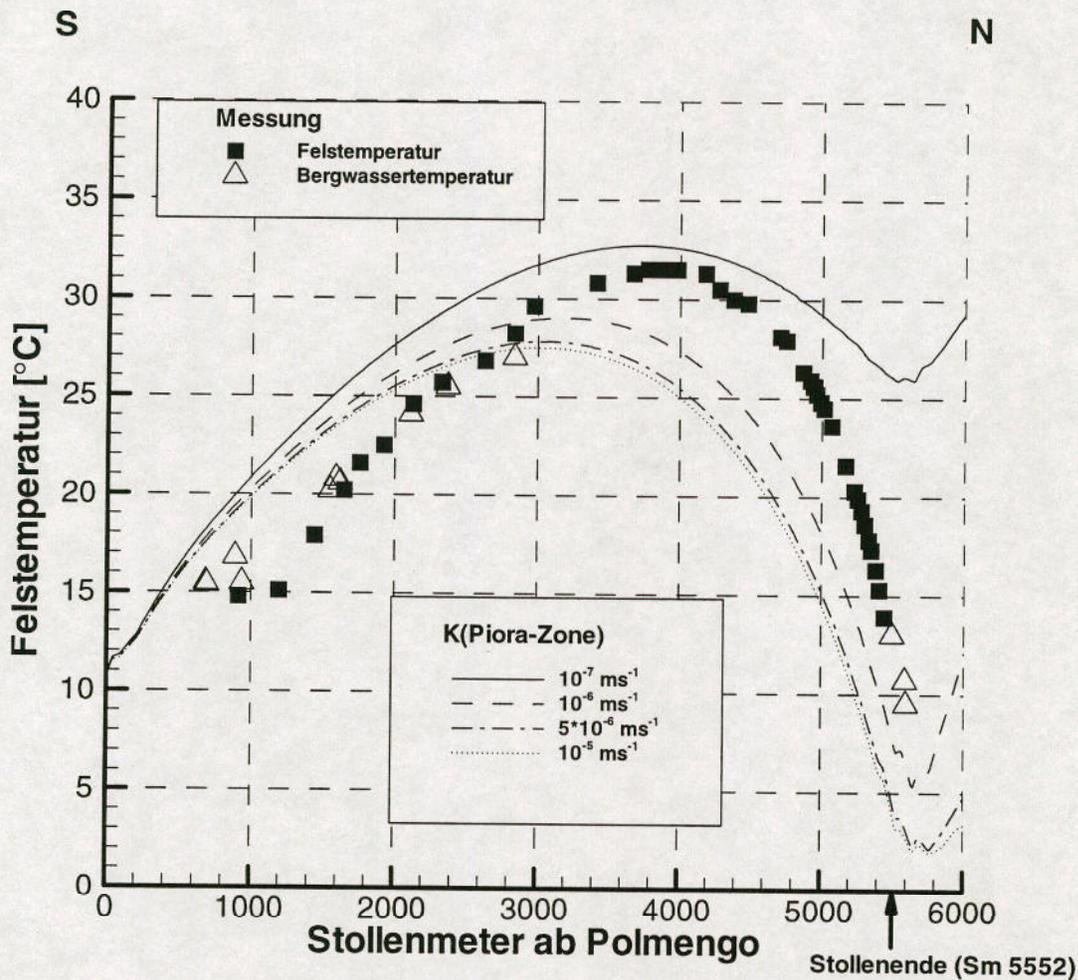


Abbildung 6 Felstemperaturverteilung entlang dem Piora-Sondierstollen für verschiedene K-Werte der Piora-Zone. Basis der Piora-Zone im Bereich Sondierstollen bei ca. 400 m.ü.M.. Berechnung stationär. Modellläufe H5 - H8.

Abbildung 7 zeigt stationäre Felstemperaturkurven für verschiedene Ausprägungen der Piora-Zone. Es lässt sich erkennen, dass mit zunehmendem Tiefgang der Zone (von 600 m.ü.M. bis -1000 m.ü.M. vgl. Abbildung 3) die Auskühlung im Nebengestein zunimmt. Es sind keine aussergewöhnlichen Sprünge zu erkennen. Erwartungsgemäss ist die Auskühlung bei einer Basis von -1000 m.ü.M. am stärksten.

Der Einfluss der Verbreiterung der Zone in verschiedenen Tiefenstufen (vgl. Färbung 6 und 7 Abbildung 3) ist ebenfalls beobachtbar. Eine bis 1000 m unter Meer verbreiterte Zone zeigt den grössten Abkühlungseffekt.

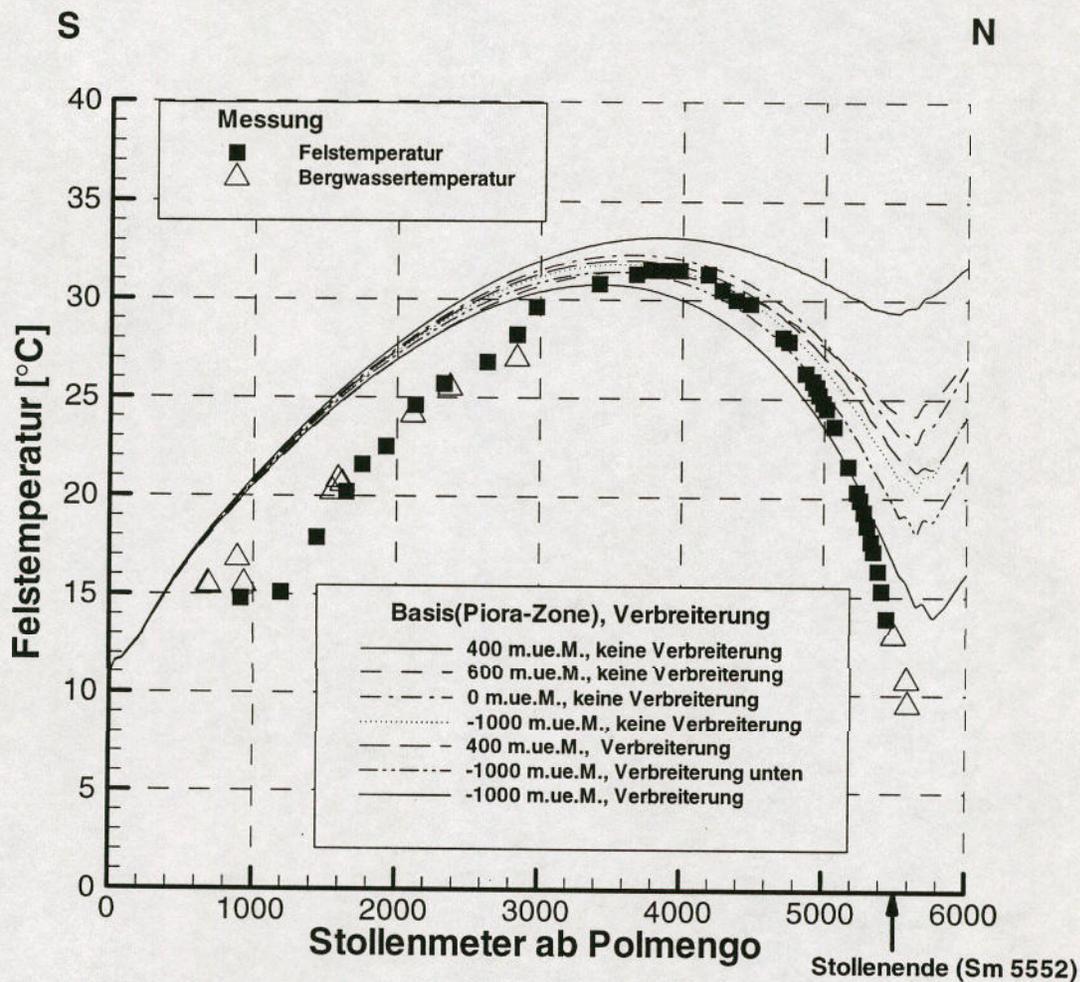


Abbildung 7 Felstemperaturverteilung entlang dem Piora-Sondierstollen für verschiedene Geometrien der Piora-Zone. K-Wert der Piora-Zone ist stets 10^{-7} ms^{-1} . Berechnung stationär. Modellläufe H2, H5, H9, H10, H11, H13 und H14.

Fazit dieser Untersuchungen ist: Es lassen sich einige Kombinationen von Tiefe der Basis der Piora-Zone und K-Wert für eine homogene Piora-Zone finden, die den Bereich der tiefsten gemessenen Felstemperaturen im Stollen nachbilden können (vgl. Abbildung 8). Der restliche Temperaturverlauf ist jedoch in keinem Fall nachvollziehbar.

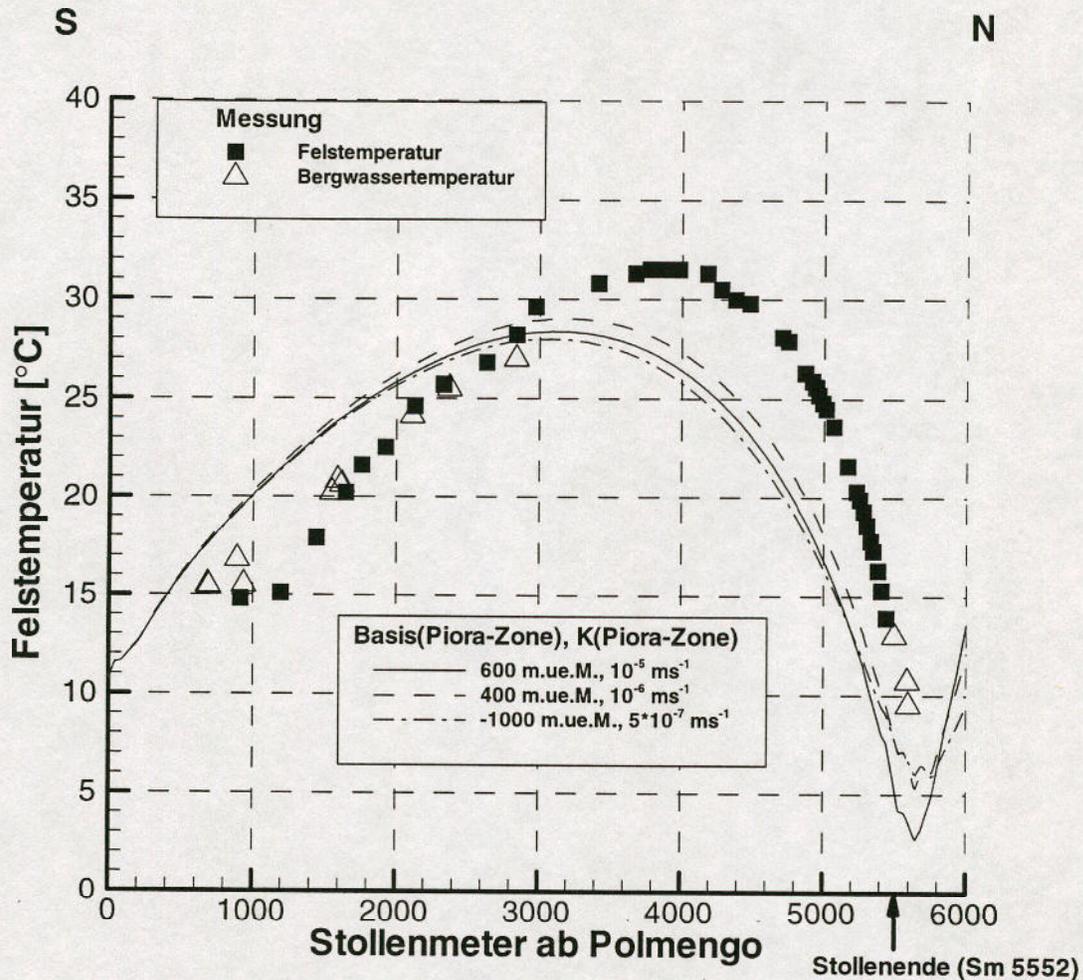


Abbildung 8 Felstemperaturverteilung entlang dem Piora-Sondierstollen für verschiedene Kombinationen von Tiefenerstreckung und K-Wert der Piora-Zone. Berechnung stationär. Modellläufe H4, H6 und H12.

Kakirit, Karst

An der Südgrenze der Piora-Zone auf Stollenniveau wurde ein Kakirit von ca. 15 m Mächtigkeit erbohrt (Dr. T. R. Schneider AG 1996). Es stellte sich die Frage, ob ein wasserführender Kakirit allein für die Abkühlung des Felsens im Stollenbereich verantwortlich sein kann.

Abbildung 9 zeigt das stationär modellierte Felstemperaturfeld im Stollen für verschiedene Kakirit-Szenarien. Der Verlauf der Kakirit-Zone ist Abbildung 3 zu entnehmen. Leitfähigkeiten bis 10^{-6} ms^{-1} führen für eine Mächtigkeit von 1 m zu keinen relevanten Abkühlungen. Erst K-Werte im Bereich von 10^{-4} ms^{-1} lassen die ca. 10°C in der Verlängerung des Sondierstollens entsprechend Sm 5600 erreichen. Ein Abkühlungssprung findet zwischen 10^{-5} ms^{-1} und 10^{-4} ms^{-1} statt.

Die Transmissivität spielt, wie erwähnt, eine entscheidende Rolle in Bezug auf die Stärke der Abkühlung. Daher konnte man abschätzen, dass bei einer Erhöhung der Kakiritmächtigkeit von 1m auf 15 m ca. um den Faktor 10 kleinere K-Werte nötig sind, um die selben Effekte zu erzielen. Somit ergibt die Kombination 15 m Mächtigkeit mit K-Wert 10^{-5} ms^{-1} und 1 m Mächtigkeit mit K-Wert 10^{-4} ms^{-1} ähnliche Erniedrigungen der Felstemperatur bei identischer Tiefenerstreckung des Kakirites bis in 1000 m unter Meer. Lässt man den Kakirit hingegen nur bis ca. 400 m.ü.M. sich erstrecken und behält den K-Wert bei, so führt dies zu einer Abnahme der Auskühlung.

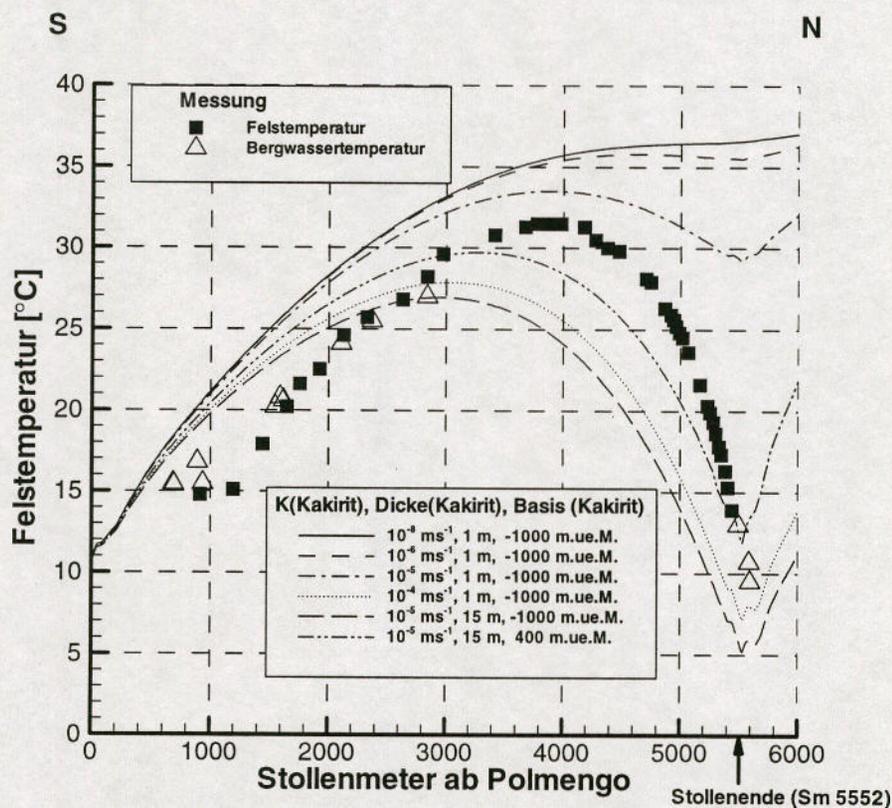


Abbildung 9 Felstemperaturverteilung entlang dem Piora-Sondierstollen für verschiedene Kombinationen von Tiefenerstreckung, Mächtigkeit und K-Wert eines Kakirites, der entlang der Südgrenze der Piora-Zone verläuft. Die Piora-Zone hat die Basis auf ca. 600 m.ü.M. und einen K-Wert von 10^{-8} ms^{-1} . Berechnung stationär. Modellläufe KK1 - KK6.

Die Tracertests die in den Bächen Murinascia Grande und Ri dei Calcestri durchgeführt wurden, weisen auf eine mögliche Karstzone zum Valle Sta. Maria hin (Arbeitsteam

Hydrogeologie, Dr. Heinrich Jäckli AG 1994). Es interessierte die Frage, ob eine Karstzirkulation in diesem Gebiet die Ursache des Felstemperaturverlaufes im Stollen sein könnte.

Die Mächtigkeit des Karstes wurde stets als 1 m angenommen, weil aufgrund mangelnder Information kein Anlass zur Variation dieses Wertes bestand. Lässt man eine Tiefenausdehnung des Karsts (vgl. Abbildung 3) bis ca. 400 m.ü.M. zu, so sind Karst-K-Werte ab 10^{-4} ms^{-1} bis 10^{-3} ms^{-1} nötig, um die tiefsten Temperaturen des Stollens realisieren zu können (vgl. Abbildung 10). Bei einer Vertiefung der Karstzirkulation bis -1000 m.ü.M. genügt jedoch bereits 10^{-4} ms^{-1} .

Es besteht die Möglichkeit, dass der vermutete Karst nur oberflächennah vorliegt. Dies ist eine mögliche Interpretation der Resultate der Tracertests. Im Modell wurde diesem Aspekt durch Testläufe mit einer Karst-Tiefenerstreckung bis ca. 1400 m.ü.M. Rechnung getragen. Setzt man hier K-Werte von 10^{-3} ms^{-1} ein, ist der im Stollen messbare thermische Einfluss nahezu vernachlässigbar. Aus den Tracertests kann man grob ein K-Wert abschätzen, indem man Injektions- und Fundstelle mit einer Geraden verbindet. So lässt sich ein hydraulischer Gradient bestimmen, der gemeinsam mit der Tracer-geschwindigkeit zum K-Wert führt. Mit den Daten aus Jäckli 1994 (Arbeitsteam Hydrogeologie, Dr. Heinrich Jäckli AG 1994) wurde ein K-Wert von $2 \cdot 10^{-2} \text{ ms}^{-1}$ bestimmt. Jedoch ist auch damit keine wesentliche Abkühlung auf Stollenniveau zu erzielen (Abbildung 10).

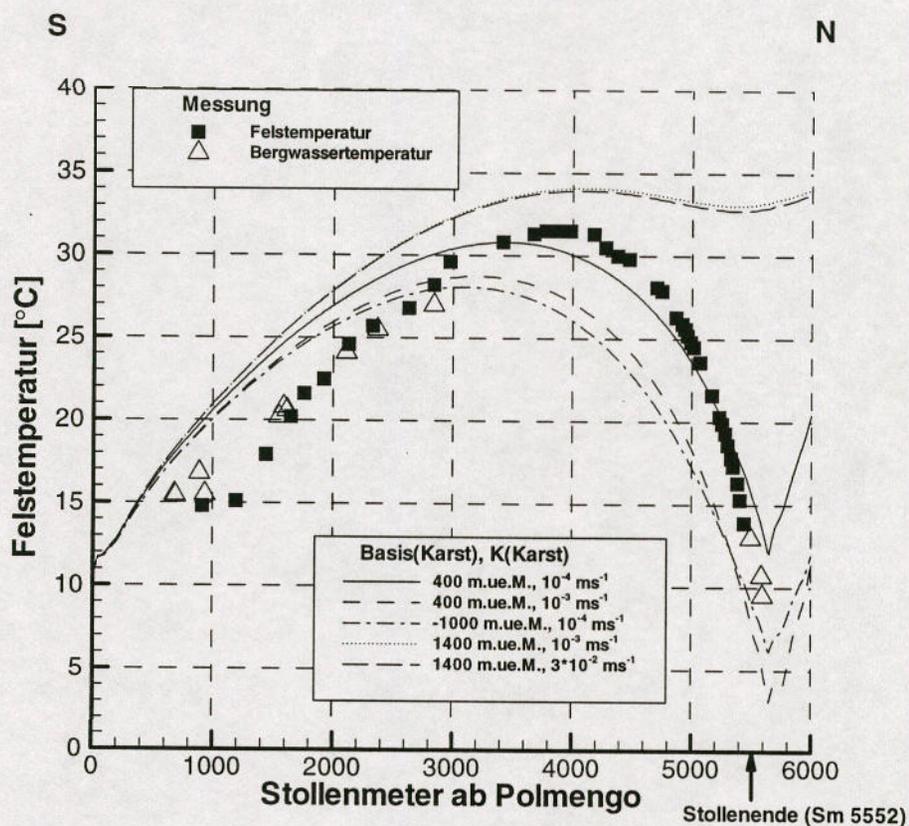


Abbildung 10 Felstemperaturverteilung entlang dem Piora-Sondierstollen für verschiedene Kombinationen von Tiefenerstreckung und K-Wert eines Karstes, der in der Piora-Zone verläuft. Die Piora-Zone hat die Basis auf ca. 600 m.ü.M. und einen K-Wert von 10^{-8} ms^{-1} . Berechnung stationär. Modellläufe KS1 - KS5.

Wiederum kann als Fazit angefügt werden, dass sowohl beim Karst als auch beim Kakirit verschiedenste Kombinationen der variierten Parameter zu der tiefstgemessenen

Temperatur führen können. Allerdings liess sich auch hiermit der restliche Fels-temperaturverlauf im Stollen nicht nachbilden.

Variation des Bergwasserspiegels

Im Kapitel Randbedingungen wurde kurz beschrieben, wie die Lage des Bergwasserspiegels ermittelt wurde. Nun ist die Lage bzw. die Gradienten-Verteilung des Bergwasserspiegels entscheidend für die Zirkulation und somit die advective Auskühlung in der Zone.

Zur Variation des Bergwasserspiegels wurden die entsprechenden konstant vorgegebenen hydraulischen Potentiale um 10 % bzw. 20 % reduziert. Abbildung 11 zeigt den Potentialverlauf entlang dem Piora-Sondierstollen für den Ausgangs-Bergwasserspiegel und Reduktionen (Absenkungen) auf 90 % und 80 %. Der im Stollen gemessene Wasserdruck entspricht der Differenz von hydraulischem Potential und topographischer Höhe des Stollens (ca. 800 m.ü.M.). Die um Sm 5500 durchgeführten Bergwasserdruckmessungen (Dr. T. R. Schneider AG, Colenco AG 1996) weisen einen Betrag von ca. 100 bar auf. Vergleicht man diesen Wert mit Abbildung 11, so liegt er in etwa zwischen den entsprechenden Werten für 80 % und 90 %.

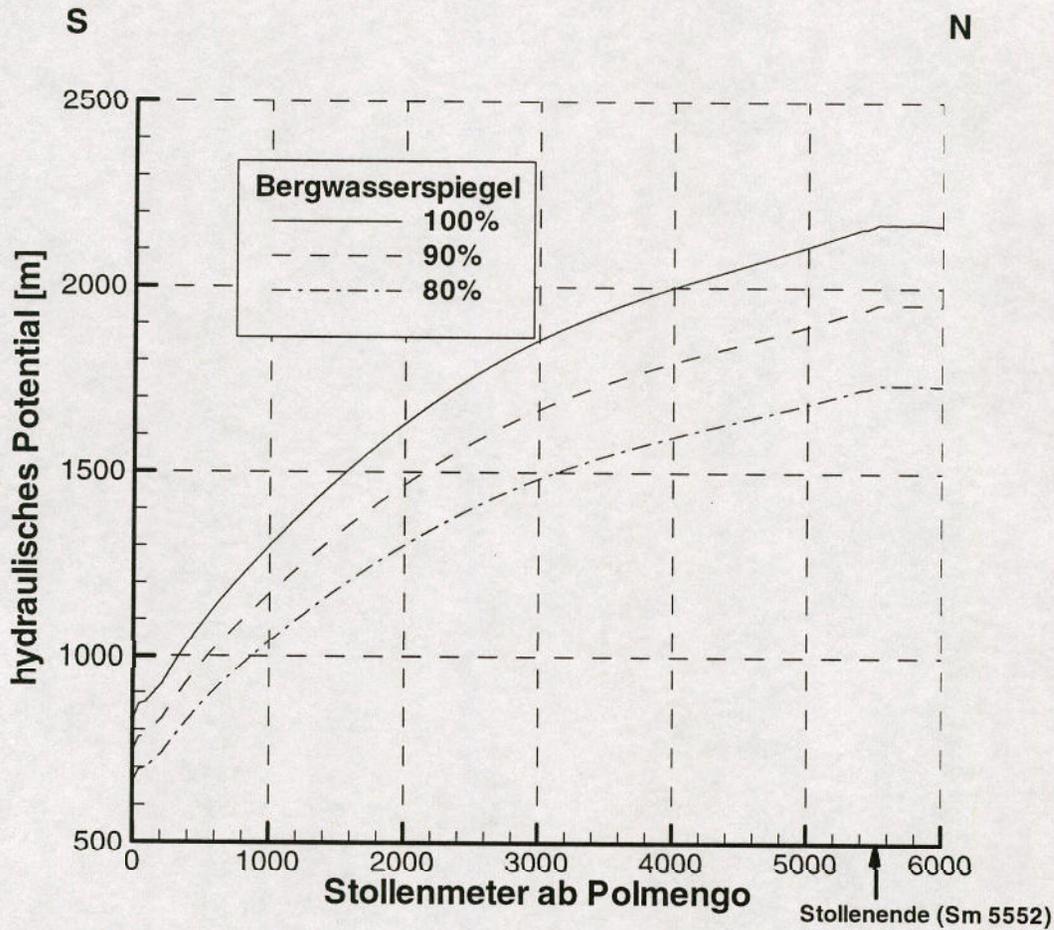


Abbildung 11 Verteilung des hydraulischen Potentials entlang dem Piora-Sondierstollen für verschiedene Bergwasserspiegellagen. Grundlage ist ein Bergwasserspiegel basierend auf Gerinneanfängen. Berechnung stationär.

Interessant ist nun die Auswirkung dieser Änderung des Bergwasserspiegels auf die modellierte Felstemperatur im Stollen (vgl. Abbildung 12). Die drei verschiedenen Kurven zeigen einen vernachlässigbar kleinen Unterschied untereinander. Die Höhenlage des Bergwasserspiegels scheint also für das thermische Feld um den Sondierstollen nur von sekundärer Bedeutung zu sein.

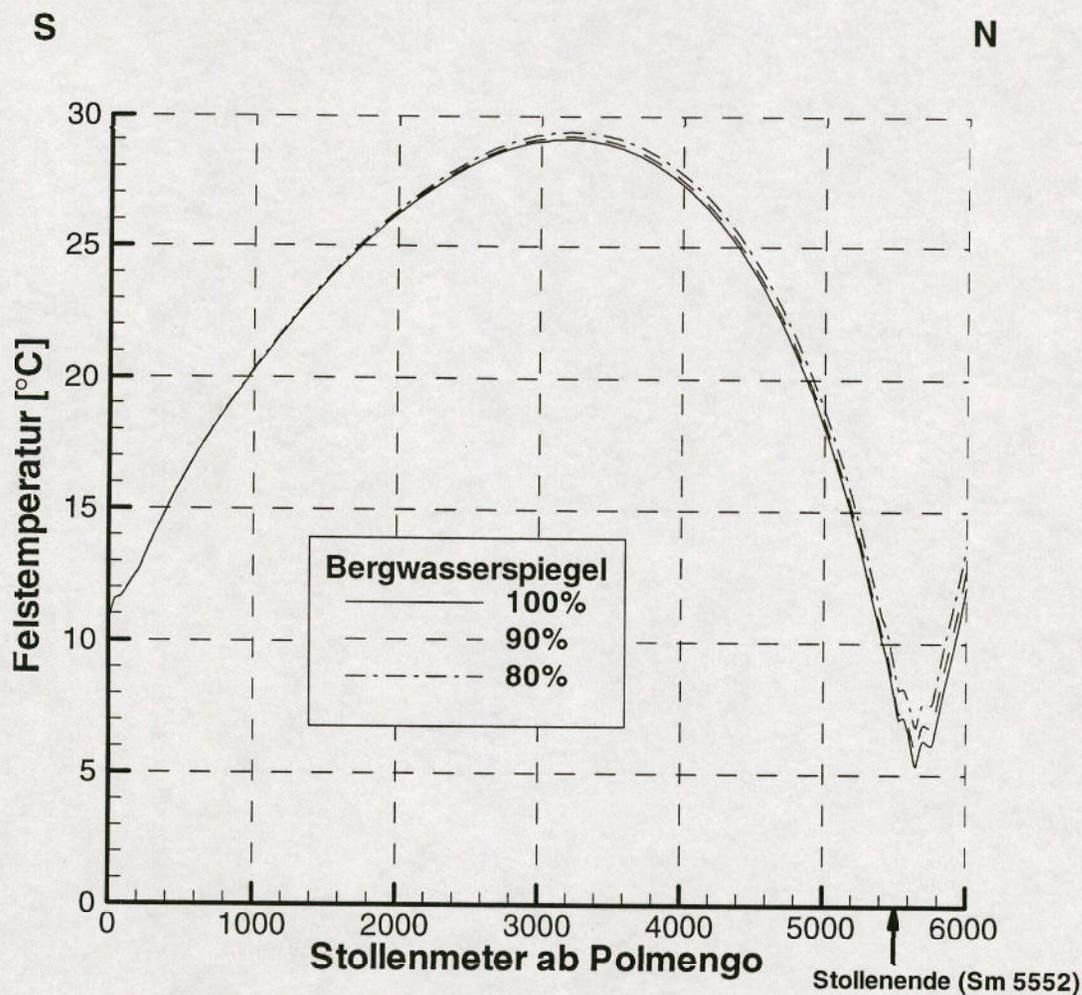


Abbildung 12 Felstemperaturverteilung entlang dem Piora-Sondierstollen für verschiedene Bergwasserspiegellagen. Die Piora-Zone hat die Basis auf ca. 400 m.ü.M. und einen K-Wert von 10^{-6} ms^{-1} . Berechnung stationär. Modellläufe H15 und H16.

Instationäre Berechnungen

Basierend auf den stationären Modellierungen wurden einige Szenarien zur wesentlich zeitaufwendigeren transienten Berechnung ausgewählt (in Tabelle 1, Tabelle 2 und Tabelle 3 mit „T“ versehen). Ziel war es die in den stationären Fällen mangelhafte Wiedergabe des gesamten Felstemperaturverlaufes entlang des Stollens zu verbessern.

Grundidee der instationären Berechnung ist, dass ein im Bereich der Piora-Zone vorliegendes Zirkulationssystem erst seit dem Ende der letzten Eiszeit zu wirken begonnen hat. Der im Moment beobachtbare thermische Zustand des Nebengesteins wäre somit noch nicht stationär.

Das Ende der letzten Eiszeit wurde auf 10000 Jahre vor der aktuellen Zeit geschätzt. Ähnlich wie man räumlich Randbedingungen im Modell festlegen muss, war es

notwendig zeitlich eine Anfangsbedingung zu definieren. Die Temperaturverteilung vor 10000 Jahren wurde als stationärer Zustand mit 0°C Oberflächentemperatur und ohne hydraulische Einflüsse definiert.

Erste vollständig transiente Berechnungen haben ergeben, dass das hydraulische Feld sehr schnell stationär wird. Im Modell wurde dies folgendermassen definiert: Die Simulation startet mit der erwähnten Anfangsbedingung vor 10000 Jahren. Das hydraulische Feld wird zu Beginn der Berechnung (mit dem ersten Zeitschritt) als stationär modelliert und bleibt für den Rest der Simulation konstant. Das thermische Feld hingegen wird mit jedem Zeitschritt neu berechnet.

Die reine Rechenzeit (Workstation) für die transienten Modelle betragen ca. 8 Stunden. Hinzu kamen jeweils umfangreiche Arbeiten zur Vorbereitung der Modelle bzw. zum Auswerten der erhaltenen Resultate.

Homogene Piora-Zone

In Abbildung 13 ist die zeitliche Entwicklung des Felstemperaturfeldes im Sondierstollen für eine Piora-Zone mit einer Basis auf ca. 600 m.ü.M. und einem K-Wert von 10^{-5} ms^{-1} dargestellt. Ausgehend von der Anfangsbedingung erhöht sich im Bereich des Stollenportals die Felstemperatur aufgrund der Erhöhung der Oberflächentemperatur. Im Bereich der Stollenbrust hingegen nimmt basierend auf dem Einsetzen der Advektion die Temperatur stark ab. Diese Auskühlung ist am grössten zwischen 30 und 300 Jahren, von 3000 bis 10000 Jahre ist der Effekt deutlich kleiner.

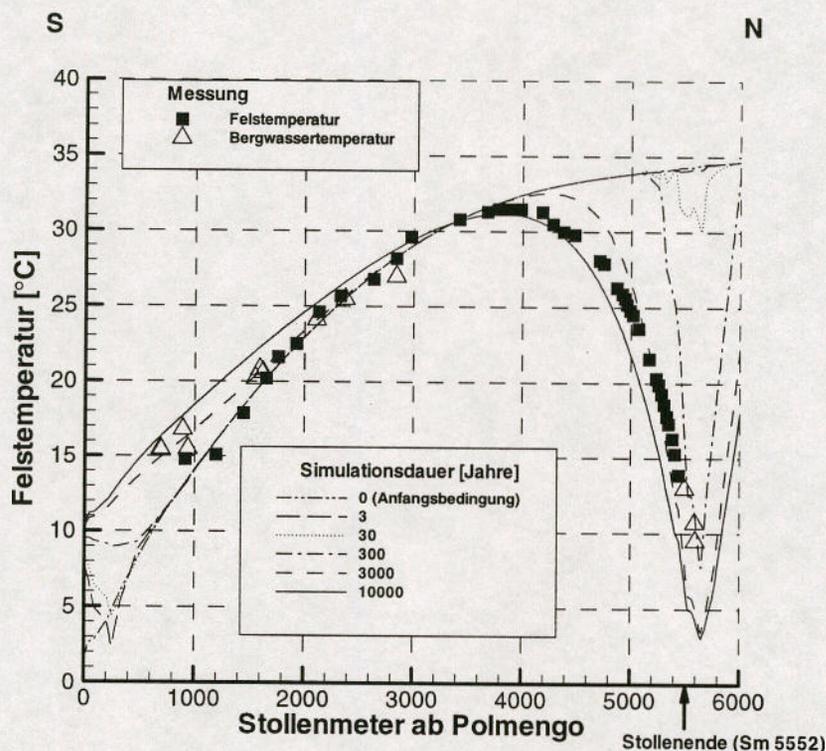


Abbildung 13 Felstemperaturverteilung entlang dem Piora-Sondierstollen für verschiedene Zeitschritte. Die Piora-Zone hat die Basis auf ca. 600 m.ü.M. und einen K-Wert von 10^{-5} ms^{-1} . Im Bereich ca. zwischen Sm 1000 und Sm 5000 fallen die Temperaturkurven der ersten Zeitschritte (bis 300 Jahre) zusammen. Berechnung instationär. Modellauf H17.

Abbildung 14 zeigt die selbe Modellierung für eine Piora-Zone mit einer Basis von ca. 400 m.ü.M. und einem K-Wert von 10^{-6} ms^{-1} . Allerdings liegt der „Abkühlungssprung“ hier zwischen 300 und 3000 Jahren, vermutlich aufgrund des geringeren K-Wertes.

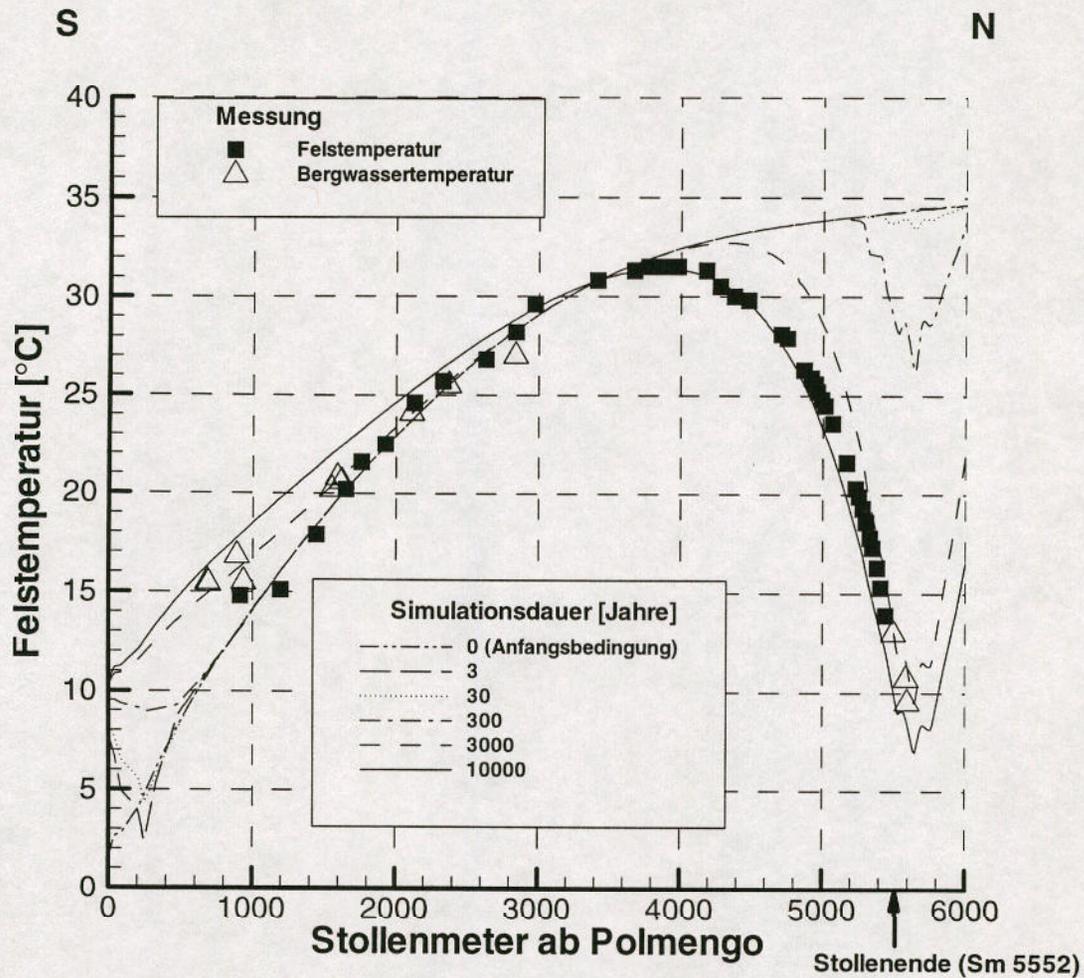


Abbildung 14 Felstemperaturverteilung entlang dem Piora-Sondierstollen für verschiedene Zeitschritte. Die Piora-Zone hat die Basis auf ca. 400 m.ü.M. und einen K-Wert von 10^{-6} ms^{-1} . Im Bereich ca. zwischen Sm 1000 und Sm 5000 fallen die Temperaturkurven der ersten Zeitschritte (bis 300 Jahre) zusammen. Berechnung instationär. Modellauf H18.

Zur weiteren Illustration ist hier (Abbildung 15) der gleiche Fall mit einem K-Wert von 10^{-7} ms^{-1} hinzugefügt. Die Tiefsttemperatur liegt mit ca. 28°C deutlich über derjenigen für 10^{-6} ms^{-1} und somit weit ausserhalb des gemessenen Bereichs. Es ist also, mit der definierten Modellcharakteristik, ein K-Wert von 10^{-6} ms^{-1} oder grösser notwendig, um die Messdaten nachzubilden.

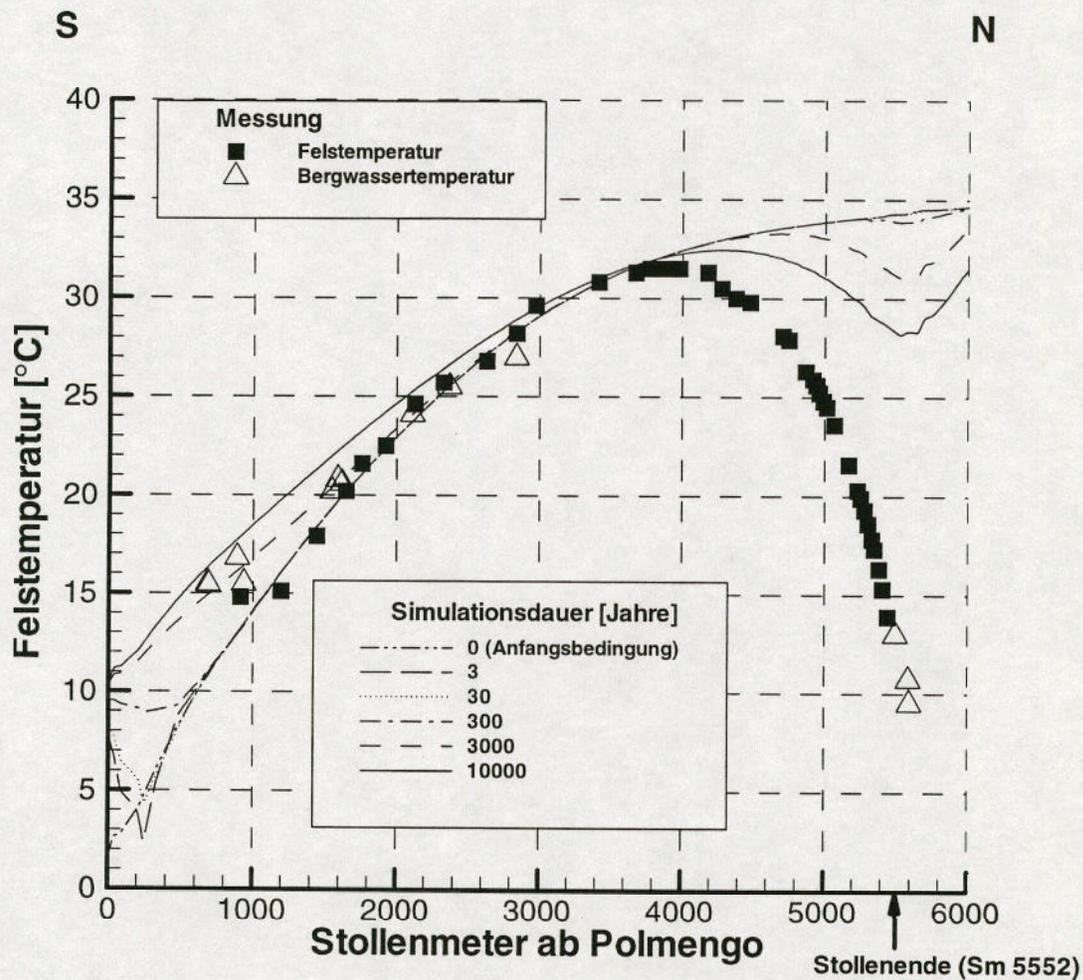


Abbildung 15 Felstemperaturverteilung entlang dem Piöra-Sondierstollen für verschiedene Zeitschritte. Die Piöra-Zone hat die Basis auf ca. 400 m.ü.M. und einen K-Wert von 10^{-7} ms^{-1} . Im Bereich ca. zwischen Sm 1000 und Sm 5000 fallen die Temperaturkurven der ersten Zeitschritte (bis 300 Jahre) zusammen. Berechnung instationär. Modellauf H19.

Kakirit, Karst

Für je einen Fall eines Kakirites und eines Karstes in der Piora-Zone wurden instationäre Berechnungen durchgeführt.

Angesetzt werden eine 15 m mächtige Kakirit-Zone mit einem K-Wert von 10^{-5} ms^{-1} (vgl. Abbildung 16) und ein Karst von 1 m Mächtigkeit mit einer hydraulischen Leitfähigkeit von $5 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ (laterale Ausdehnung wie im stationären Fall). Für den Kakirit wurde der K-Wert etwas zu tief angesetzt, da die tiefstmodellerte Felstemperatur um Sm 5500 ca. 1°C höher als der letzte Bergwassermesswert liegt. Ansonsten zeigt die Temperaturentwicklung ein ähnliches Bild wie diejenige des homogenen Falles in Abbildung 14.

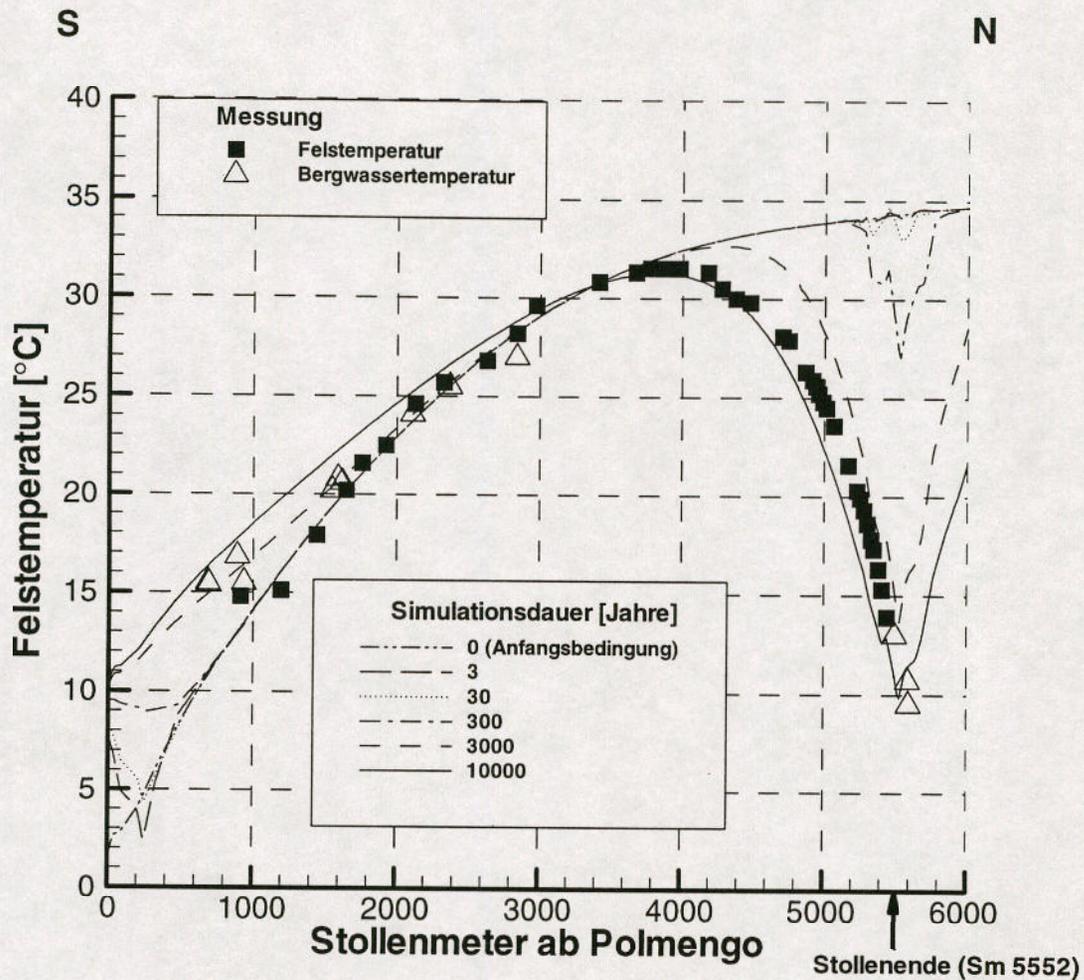


Abbildung 16 Felstemperaturverteilung entlang dem Piora-Sondierstollen für verschiedene Zeitschritte. Ein Kakirit entlang der Südgrenze der Piora-Zone weist eine Mächtigkeit von 15 m, eine Tiefenerstreckung bis -1000 m.ü.M. und einen K-Wert von 10^{-5} ms^{-1} auf. Die Piora-Zone hat die Basis auf ca. 400 m.ü.M. und einen K-Wert von 10^{-8} ms^{-1} . Im Bereich ca. zwischen Sm 1000 und Sm 5000 fallen die Temperaturkurven der ersten Zeitschritte (bis 300 Jahre) zusammen. Berechnung instationär. Modellauf KK7.

Die Felstemperaturverteilung in Abhängigkeit der Simulationszeit für den Karst ist ebenfalls sehr ähnlich zu den modellierten Fällen der homogenen Piora-Zone und des Kakirites (vgl. Abbildung 17). Die modellierte Felstemperaturkurve nach 10000 Jahren folgt ca. ab Sm 3000 recht genau der Messkurve.

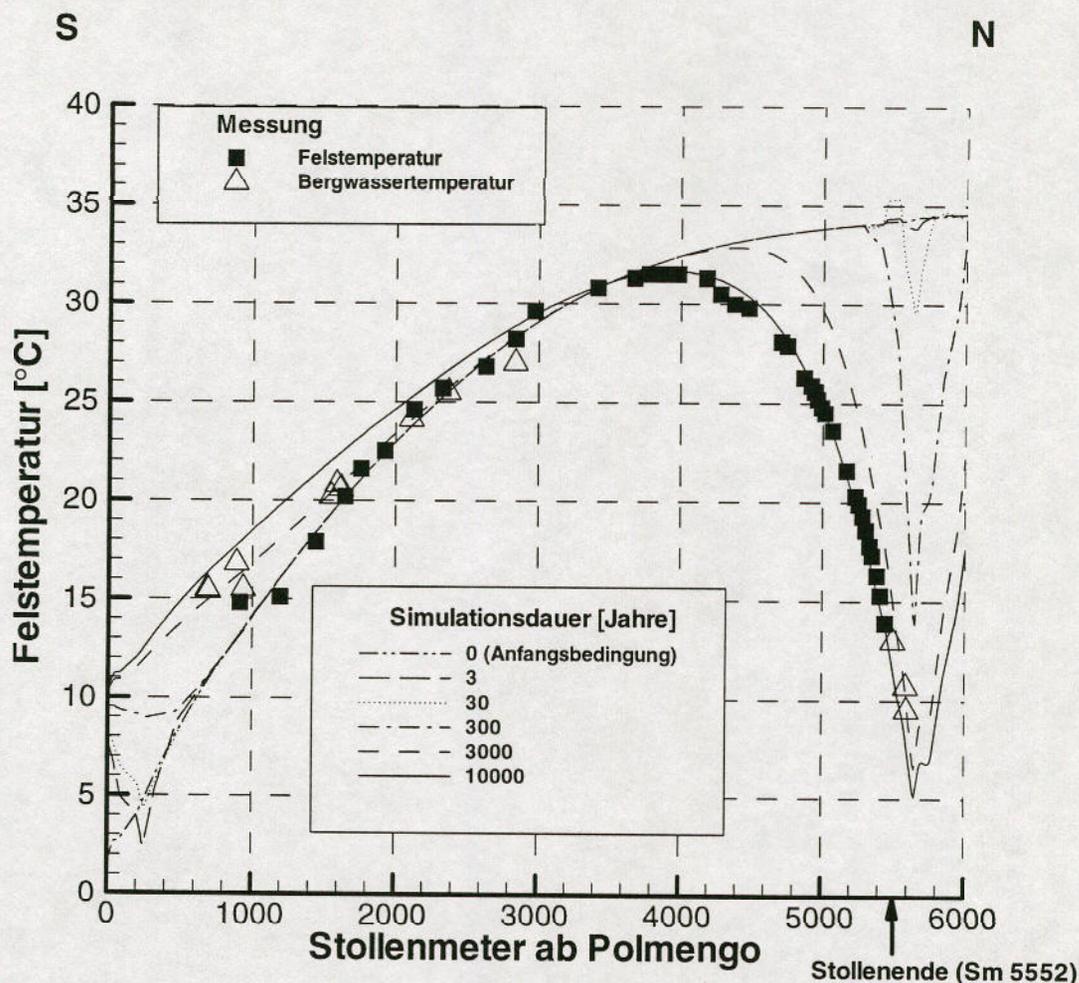


Abbildung 17 Felstemperaturverteilung entlang dem Piora-Sondierstollen für verschiedene Zeitschritte. Ein Karst mitten in der Piora-Zone weist eine Mächtigkeit von 1 m, eine Tiefenerstreckung bis 400 m.ü.M. und einen K-Wert von $5 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ auf. Die Piora-Zone hat die Basis auf ca. 400 m.ü.M. und einen K-Wert von 10^{-8} ms^{-1} . Im Bereich ca. zwischen Sm 1000 und Sm 5000 fallen die Temperaturkurven der ersten Zeitschritte (bis 300 Jahre) zusammen. Berechnung instationär. Modellauf KS6.

Im Allgemeinen lässt sich zu den instationären Modellierungen anfügen, dass sie die gemessenen Daten relativ gut nachbilden konnten. Allerdings gibt es keine Möglichkeit eine dieser Lösungen zu bevorzugen.

Advektionsgeschwindigkeiten

Neben den Temperaturverteilungen erbrachte jede Berechnung auch eine sehr grobe Verteilung der Advektionsgeschwindigkeiten (zugleich auch Wasserdurchsatz) in der ungestörten Piora-Zone, basierend auf dem stationären hydraulischen Modell. Unter Advektion versteht man hier den Wärmetransport mittels Wasserbewegung. Die Geschwindigkeit des Wassers (Advektionsgeschwindigkeit) wird nach Darcy bestimmt

(Darcygeschwindigkeit). Sie ist das Produkt des herrschenden K-Wertes und des hydraulischen Gradienten. Die Porosität des Gesteins hat keinen Einfluss auf die Darcygeschwindigkeit. Die errechneten Werte sind jedoch mit Vorsicht zu geniessen, sind sie doch grossen Unsicherheiten bezüglich K-Werten, Zonengeometrien und Bergwasserspiegel unterworfen.

Es wurde für jeden der drei Modellfälle homogene Zone, Kakirit und Karst ein Szenario herausgegriffen. Die Verteilung der Darcygeschwindigkeitskomponente in West-Ost-Richtung (vom Val Piora ins Valle Sta. Maria) wurde anschliessend in einem Süd-Nord-Schnitt in der Linie des Sondierstollens (also quer zum Zonenverlauf) dargestellt.

Als homogener Fall wurde eine Piora-Zone mit Basis bei ca. 400 m.ü.M. und K-Wert 10^{-6} ms^{-1} (Temperaturverteilung vgl. Abbildung 14) ausgewählt (Abbildung 18). Die Darcygeschwindigkeiten im Querschnitt zur Piora-Zone weist ein Maximum von ca. 10^{-7} ms^{-1} im oberen Bereich auf. Ansonsten entspricht die Verteilung in groben Zügen der vorgegebenen Geometrie der Zone. Somit ist die untere Grenze des Fliessfeldes bedingt durch die Modellannahme bezüglich der Tiefererstreckung. Der unregelmässige Verlauf der Isolinen ist der groben Diskretisierung (vgl. Abbildung 3) zuzuschreiben.

Unter diesen Modellvoraussetzungen lässt sich ein Gesamtdurchfluss durch die Piora-Zone abschätzen. Für den Querschnitt von Abbildung 18 ergibt dies ca. 50 ls^{-1} .

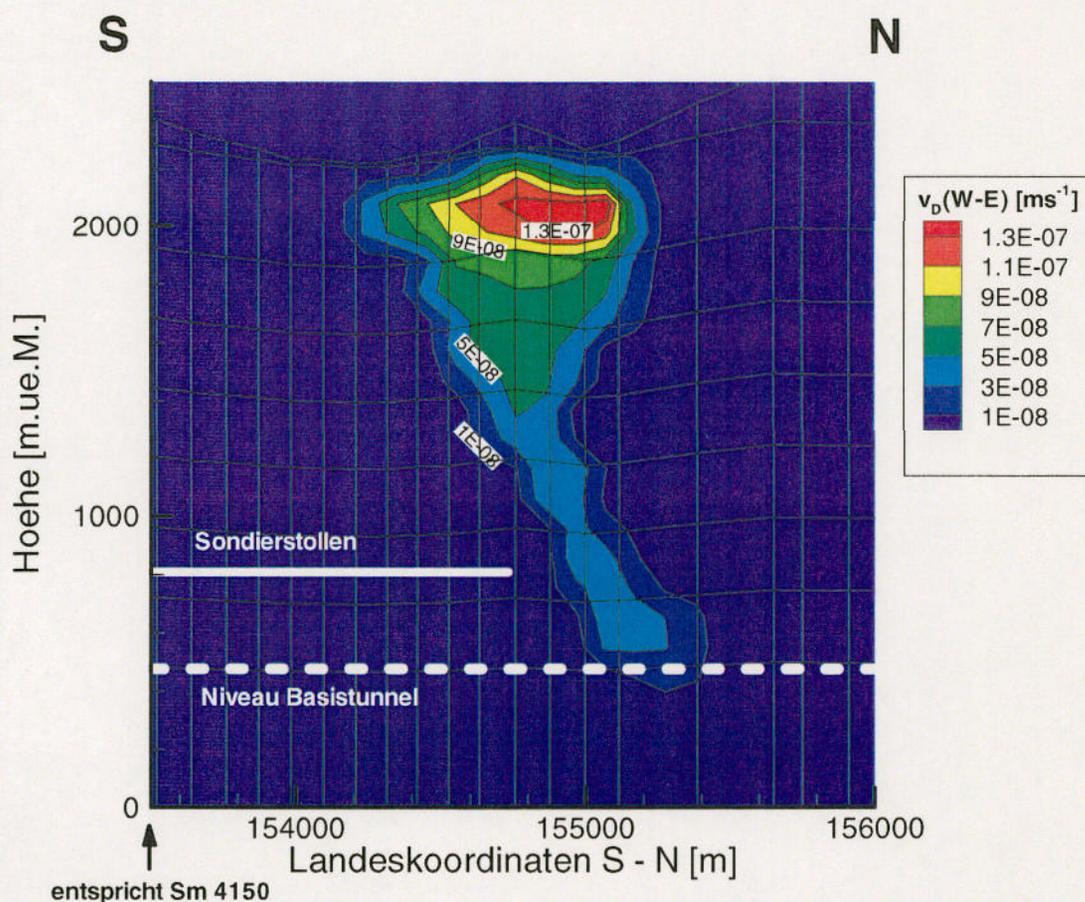


Abbildung 18 Darcygeschwindigkeiten in W-E-Richtung für eine Piora-Zone mit Basis bei ca. 400 m.ü.M. und K-Wert von 10^{-6} ms^{-1} . Piora-Zonen-Querschnitt in der Linie des Sondierstollens. Eingetragen sind der Verlauf des Sondierstollens sowie das Niveau des geplanten Basistunnels. Das FE-Gitter wurde überlagert. Berechnung stationär.

Die analoge Illustration des Geschwindigkeitsfeldes für einen Kakirit (Basis -1000 m.ü.M., K-Wert 10^{-5} ms^{-1} , Mächtigkeit 15 m) ist stark von der stufenartigen Diskretisierung der Kluftzone geprägt (Abbildung 19). Es bilden sich einzelne lokale Maxima aus, welche grob die Größenordnung des Darcygeschwindigkeiten im Kakirit wiedergeben. Die maximale Advektionsgeschwindigkeit wird im oberen Teil mit ca. $5 \cdot 10^{-7} \text{ ms}^{-1}$ erreicht.

Der abgeschätzte Gesamtdurchfluss für den Kakirit-Fall im entsprechenden Piöra-Zonen-Querschnitt (Abbildung 19) ist ca. 20 ls^{-1} .

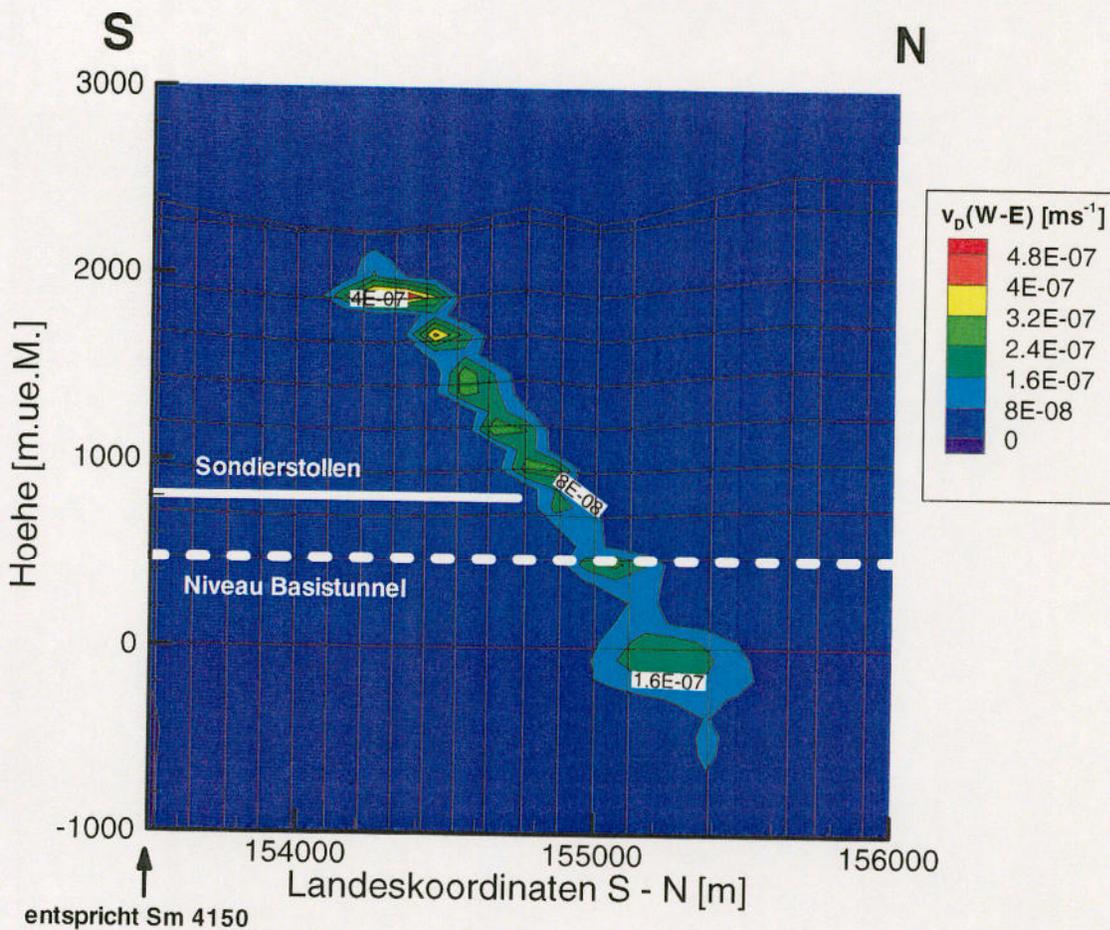


Abbildung 19 Darcygeschwindigkeiten in W-E-Richtung für einen Kakirit mit Basis -1000 m.ü.M., Mächtigkeit von 15 m und K-Wert von 10^{-5} ms^{-1} . Piöra-Zone mit Basis bei ca. 400 m.ü.M. und K-Wert von 10^{-8} ms^{-1} . Piöra-Zonen-Querschnitt in der Linie des Sondierstollens. Eingetragen sind der Verlauf des Sondierstollens sowie des geplanten Basistunnels. Das FE-Gitter wurde überlagert. Berechnung stationär. Die perlenkettenartige Verteilung der Darcygeschwindigkeiten ist ein Resultat der Diskretisierung.

Die selben Kriterien müssen für die Betrachtung der Darcygeschwindigkeiten aufgrund des Karstes mit Basis bei 400 m.ü.M., 1 m Mächtigkeit und hydraulischer Leitfähigkeit von $5 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ (Abbildung 20) angewendet werden. Hier liegt das Maximum, ebenfalls im oberen Bereich des Karstes, bei ca. $5 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$.

Für den Fall des Karstes kann im gewählten Piöra-Zonen-Querschnitt (Abbildung 20) ein Gesamtdurchfluss von ca. 50 ls^{-1} geschätzt werden.

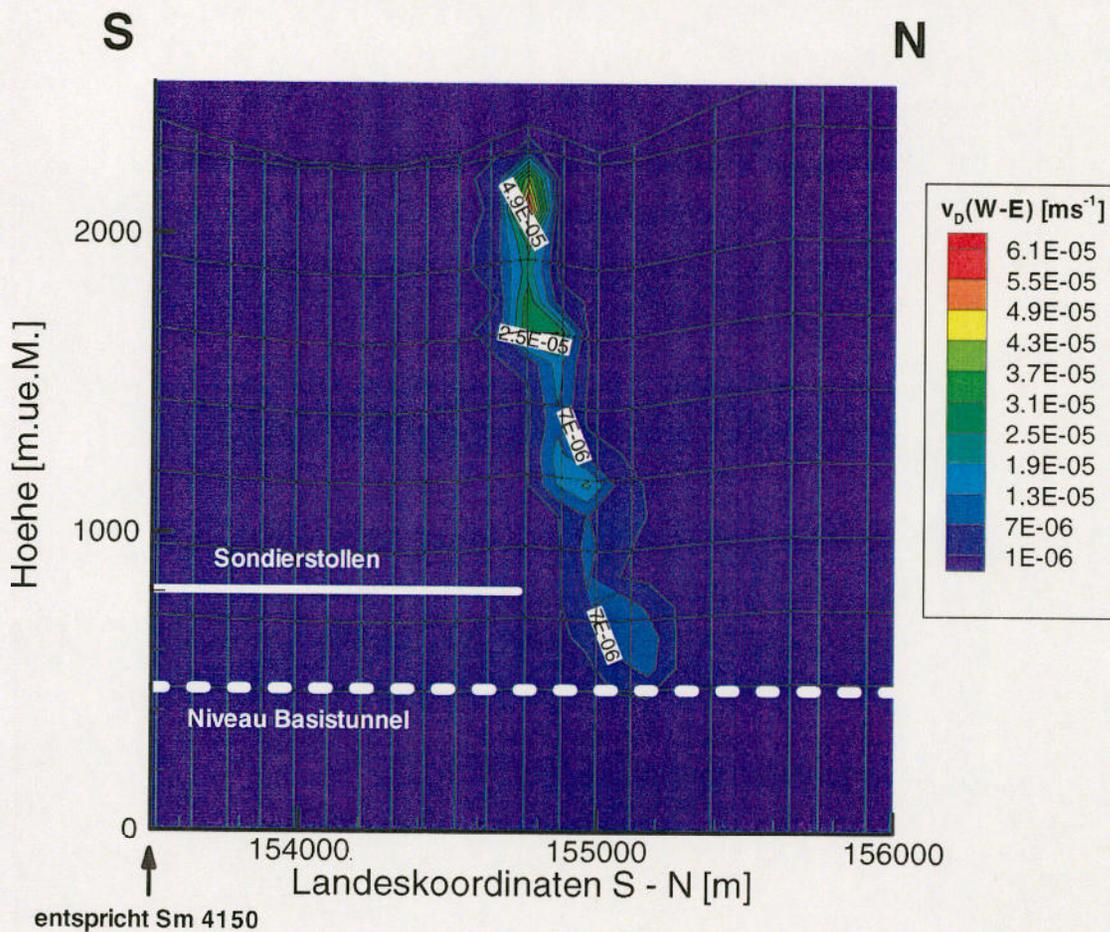


Abbildung 20 Darcygeschwindigkeiten in W-E-Richtung für einen Karst mit Basis - 400 m.ü.M., Mächtigkeit von 1 m und K-Wert von $5 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$. Piöra-Zone mit Basis bei ca. 400 m.ü.M. und K-Wert von 10^{-8} ms^{-1} . Piöra-Zonen-Querschnitt in der Linie des Sondierstollens. Eingezeichnet sind der Verlauf des Sondierstollens sowie des geplanten Basistunnels. Das FE-Gitter wurde überlagert. Berechnung stationär.

Schlussbemerkung

Die einzigen Felstemperaturen, welche zur Eichung der Modellrechnungen zur Verfügung standen, sind die Messwerte aus dem Sondierstollen. Temperaturdaten aus der Zone selbst, oder ausserhalb der Stollenachse fehlen. Bei den zonennächsten Daten handelt es sich um Wassertemperaturen, welche im Förderwasser der letzten drei Erkundungsbohrungen gemessen wurden. Eine genaue Anpassung der modellierten Felstemperaturen an die Messwerte fällt hier schwer, da diese Werte aufgrund von Durchmischen nicht der wahren Formationstemperatur entsprechen dürften.

Es hat sich im Laufe der Modellrechnungen gezeigt, dass das Temperaturfeld im Stollen sensitiv auf Änderungen des K-Wertes in der Piora-Zone reagiert. Allerdings gilt dies vor allem im unteren Bereich der K-Werte. Ab einer gewissen K-Wert-Grenze ist das System nicht mehr empfindlich. Diese Grenze bzw. der sensitive K-Wert-Bereich ist je nach Modell verschieden (vgl. Abbildung 5, Abbildung 6, Abbildung 9 und Abbildung 10). Daraus lässt sich folgern, dass aufgrund der Temperaturmesswerte aus dem Sondierstollen nur Mindestwerte für die hydraulische Leitfähigkeit in der Piora-Zone gewonnen werden können. Ähnliches gilt für die Abschätzung der Geometrie sowie der Darcygeschwindigkeiten.

Die rein homogenen Modellierungen haben einige mögliche Szenarien für Geometrie und K-Werte in der Piora-Zone aufgezeigt. Es lässt sich weiter nicht ausschliessen, dass eine Kakirit oder Karstzone vorhanden ist.

Die instationären Berechnung haben die Messdaten schliesslich relativ gut nachbilden können.

Zur modellierten Verteilung der Darcygeschwindigkeit in der Zone muss angefügt werden: Es handelt sich um mögliche Verteilungen der Darcygeschwindigkeiten im ungestörten Fall. Mit einem Tunnelvortrieb würde sich die hydraulische Situation (z.B. hydraulische Gradienten) in diesem Bereich der Piora-Zone grundsätzlich ändern. Die diesbezüglich bedeutenderen Resultate sind die Abschätzungen der K-Werte.

Wichtig scheint, dass mit dieser Art der thermisch-hydraulisch gekoppelten Modellierung weitere Erkenntnisse zum hydraulischen Feld in der Piora-Zone gewonnen werden konnten. Es ist hier jedoch mit Nachdruck zu betonen, dass die Modellierung nur Hinweise auf den minimalen Wasserfluss liefern kann, welcher für die Ausbildung des beobachteten Temperaturtrichters notwendig ist. Stärkerer Wasserfluss führt zu keiner weiteren Abkühlung im betrachteten Felsbereich.

Ausblick

Wie zu erwarten war, bestehen weiterhin grosse Unsicherheiten bezüglich der thermisch-hydraulischen Wechselwirkung im Bereich der Piora-Zone. Es scheint deshalb sinnvoll neue Erkenntnisse in weitere Modellierungen einzubeziehen. So sind weitere Tracerfunde im Umfeld des Sondierstollens gemacht worden, welche eventuell Auskunft über Fliesswege geben könnten. Weiter sind neue Tracertests im Ritomsee sowie in den Bächen Murinascia Grande und Ri dei Calcestri geplant, dies auch im Zusammenhang mit einer erneuten Infiltrationsabschätzung für die ganze Zone. Es sind zudem Temperaturmessungen in Bohrungen in der Piora-Zone geplant, die wichtige Daten zur Modellrechnung liefern können. Das selbe gilt für Messungen, aus welchen hydraulische Parameter resultieren.

Insbesondere gilt es, neue Daten bezüglich der Geometrie sowie der Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit innerhalb der Piora-Zone („Felsmodell“) in die Modellierung einzubeziehen. Ein Vergleich der gefundenen Wasserflüsse mit möglichen Infiltrationsraten drängt sich ebenfalls auf.

Ferner sind weitere Verfeinerungen und Darstellungen der Modellierung unerlässlich wie:

- Gitterverfeinerung im Bereich der Piora-Zone
- Variation der lateralen Ausdehnung potentiell wasserführender Elemente (Kakirit, Karst)
- Darstellung des Strömungsfeldes mit Vektoren
- Profilschnitte mit Isothermen.

Diese erweiterte Modellierung soll durchwegs transient erfolgen.

Eine nähere Zusammenarbeit mit der Colenco Power Consulting AG, welche bereits zweidimensionale hydrogeologische Modellierungen zur Piora-Zone durchgeführt hat, wäre sicherlich auch wünschenswert.

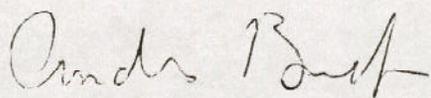
Ein konkreter Vorschlag für das weitere Vorgehen ist in Arbeit.

Verdankung

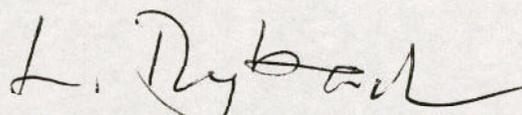
Herrn Dr. T. R. Schneider gebührt Dank für wertvolle Diskussionen und Tips im Laufe dieser Untersuchung.

Literatur

- Arbeitsteam Hydrogeologie (ATH) (1993): Bergwasserzuflüsse und Beeinflussung des Bergwasserspiegels. Bericht Nr. 425 bh, Gotthard-Basistunnel, AlpTransit.
- Arbeitsteam Hydrogeologie, Dr. Heinrich Jäckli AG (1994): Hydrogeologische Untersuchungen in der Piora-Mulde. Bericht Nr. 425 bm, Gotthard-Basistunnel, AlpTransit.
- Busslinger A., Rybach L. (1996): Sondiersystem Piora-Mulde Geothermische Untersuchungen, Schlussbericht. Interner Bericht Nr. 2005. Gotthard Basistunnel Sondiersystem Piora-Mulde.
- Busslinger A., Rybach L. (1997): Prognosis of rock temperatures and water inflow zones in deep tunneling - examples from the NEAT-project, Swiss Alps. Tunnels for People, Golser, Hinkel & Schubert (eds), 1997 Balkema, Rotterdam. ISBN 90 5410 868 1.
- Dr. T. R. Schneider AG (1993): Geologische Karte. Bericht Nr. 425ax. Gotthard Basistunnel.
- Dr. T. R. Schneider AG (1996): Geologische Befunde nach Abschluss des Sondierforttriebes Phase 1. Bericht Nr. 425cn. Gotthard Basistunnel Sondiersystem Piora-Mulde.
- Dr. T. R. Schneider AG, Colenco AG (1996): Untersuchungsprogramm Hydrogeologie und Hydrochemie Phase 1. Bericht Nr. 2039/8. Gotthard Basistunnel Sondiersystem Piora-Mulde.
- Kohl, T. (1992): Modellsimulation gekoppelter Vorgänge beim Wärmeentzug aus heissem Tiefengestein. Diss. ETH Nr. 9802.
- Rybach L., Pfister M. (1994): Temperature Predictions and Predictive Temperatures in Deep Tunnels. Rock Mechanics and Rock Engineering 27 (2), 77-88, Springer Verlag.



Andreas Busslinger
(dipl. Geophysiker, Sachbearbeiter)



Prof. Dr. L. Rybach
(Leiter Forschungsgruppe Geothermik
und Radiometrie, Institut für Geophysik
ETH Zürich)