

Die geothermischen Verhältnisse in der Nordschweiz

Autor(en): **Rybach, Ladislaus / Eugster, Walter / Griesser, Jean-Claude**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Eclogae Geologicae Helvetiae**

Band (Jahr): **80 (1987)**

Heft 2: **Beiträge zur Geologie der Nordschweiz : Symposium "Geologie der Nordschweiz"**

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-166011>

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.

Die geothermischen Verhältnisse in der Nordschweiz

Von LADISLAUS RYBACH¹⁾, WALTER EUGSTER¹⁾ und JEAN-CLAUDE GRIESSER²⁾

ABSTRACT

The geothermal field in Northern Switzerland, derived from a great number of borehole temperature measurements, is characterized by a strongly positive temperature gradient and heat flow anomaly ($> 150 \text{ mW/m}^2$) in the lower Aare valley. The anomaly is centered above the recently discovered Permocarboneous trough. Several possibilities to explain the anomaly (thermal disturbance in the mantle, cooling shallow intrusion, locally strong uplift/erosion, local contrasts in petrophysical properties) can be ruled out on the basis of model calculations.

Uprising deep groundwater is favoured as the mechanism creating the observed anomaly. Deep groundwater circulation was investigated in detail, especially to clarify the hydraulic role of the Permocarboneous trough, by coupled thermo-hydraulic modelling, using the integrated finite difference technique. The model was carefully validated by field data.

The results reveal the draining effect of the Permocarboneous trough and indicate that vertical permeability is present in the vicinity of the trough even at depths of several kilometers. They further imply that large parts of the crystalline basement in Northern Switzerland have average hydraulic conductivities $> 10^{-9} \text{ m/sec}$ and that Darcy velocities in the order of 10 mm/year must be expected.

RÉSUMÉ

Le champ géothermique de nord de la Suisse, mis en évidence par de nombreuses mesures de température dans des sondages, se caractérise par une forte anomalie du gradient thermique et du flux de chaleur ($> 150 \text{ mW/m}^2$). Il est centré sur le fossé permocarbonifère récemment mis en évidence. Plusieurs hypothèses pour expliquer cette anomalie (perturbation thermique dans le manteau, refroidissement d'une intrusion peu profonde, soulèvement/érosion localement importants, contrastes locaux des propriétés pétrophysiques) peuvent être exclues sur la base de modèles calculés.

La remontée d'eaux souterraines profondes semble plutôt être à l'origine de l'anomalie observée. La circulation d'eaux souterraines profondes a été étudiée en détails, en particulier afin de clarifier le rôle hydraulique du fossé permocarbonifère, à l'aide d'un modèle thermo-hydraulique couplé, par la méthode des différences finies intégrées. Le modèle a été soigneusement étalonné sur la base des mesures de terrain.

Les résultats ont mis en évidence l'effet de drainage dû au fossé permocarbonifère et indiquent la présence de perméabilités verticales au voisinage du fossé jusqu'à une profondeur de plusieurs kilomètres. Ils montrent également qu'une bonne partie du soubassement cristallin de la Suisse septentrionale présente une conductivité hydraulique moyenne $> 10^{-9} \text{ m/sec}$ et des vitesses de filtration de l'ordre de 10 mm/année.

1. Einleitung

Das geologische Bild der Nordschweiz wäre unvollständig ohne die Darstellung der geothermischen Verhältnisse. Gerade in den letzten Jahren wurde für dieses Gebiet ein umfangreicher neuer Datensatz hinsichtlich Temperaturfeld, geothermischer Wärme-

¹⁾ Institut für Geophysik ETHZ, ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich

²⁾ Basler und Hofmann AG, Forchstr. 395, CH-8008 Zürich

fluss und thermischer Gesteinsparameter erarbeitet und erste Interpretationen der geothermischen Befunde gegeben (BODMER & RYBACH 1985).

Der zwischen Basel, Bern, Zürich und Schaffhausen liegende Streifen der Nordschweiz ist in geothermischer Hinsicht aus zwei Gründen bemerkenswert. Zum einen befinden sich in diesem Gebiet mehrere *Thermalquellen* (oder es wurden solche in relativ geringer Tiefe erbohrt), zum anderen zeigt das Temperaturfeld eine ausgeprägte *positive Anomalie*, deren Zentrum im unteren Aaretal liegt.

Diese Anomalie ist durch zahlreiche Bohrungen belegt; wesentliches zur Kenntnis der geothermischen Verhältnisse der Nordschweiz haben die Temperaturmessungen in den Sondierbohrungen der Nagra³⁾ (Böttstein, Weiach, Riniken, Schafisheim, Kaisten und Leuggern) beigetragen. Weitere Daten stammen aus geothermischen NEFF⁴⁾-Projekten sowie aus Kompilationen der Eidg. Fachkommission für die Nutzung geothermischer Energie und die unterirdische Wärmespeicherung (KGS) sowie der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission (SGPK).

Es ist das Ziel dieser Arbeit, die Nordschweiz aufgrund dieser Daten geothermisch zu charakterisieren und das gefundene Verteilungsbild zu deuten.

2. Der geothermische Datensatz

Die Datenbasis für die Beschreibung und Beurteilung der geothermischen Verhältnisse der Nordschweiz wurde erst in den letzten Jahren erstellt und stammt im wesentlichen aus folgenden Quellen:

- Geothermische Datensynthese der Schweiz (BEW 1981)
- NEFF-Projekte Nr. 33 «Geothermische Prospektion im Raume Koblenz-Wildegg-Dielsdorf» und Nr. 165 «Erschliessung geothermischer Vorkommen»
- Geothermische Kartierung der Schweiz 1:500 000 der SGPK (BODMER & RYBACH 1984)
- Auswertung geothermischer Daten der Nagra-Bohrungen der KGS
- Petrophysik-Datenbank der SGPK.

Die wichtigsten Datenlieferanten sind die zahlreichen mehr oder weniger tiefen Bohrungen mit ausreichend genauen Temperaturdaten (BODMER & RYBACH 1984, VOLLMAYR 1985). Eine Zusammenfassung der umfangreichen Datenbasis (*Bohrlochdaten*) befindet sich im Anhang.

Das geothermische Feld kann durch die laterale und vertikale Variation des *geothermischen Gradienten* ($G = dT/dz$; T: Temperatur, z: Tiefe, Einheit: °C/km) beschrieben werden. Bei der systematischen Untersuchung der Temperaturprofile von Tiefbohrungen zeigte sich, dass G in der Nordschweiz *tiefenabhängig* ist: Der Gradient weist im Tiefenbereich 0–500 m generell höhere Werte auf als in grösseren Tiefen. Aus diesem Grunde wurde G aus den Temperaturdaten zunächst für zwei Tiefenintervalle (0–500 m und 750–1700 m) durch Interpolation berechnet. Bohrungen mit Tiefen > 1700 m gibt es im Untersuchungsgebiet nur vereinzelt. Bei rund zwei Drittel der Bohrungen wurde G für den unteren Tiefenbereich mittels Modellkurven (BODMER & RYBACH 1984) extrapoliert. Die Genauigkeit der im Anhang aufgeführten Gradienten ist, mit Ausnahme der Nagra-

³⁾ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle

⁴⁾ Nationaler Energie-Forschungs-Fonds

Bohrungen, nicht besser als $\pm 5^\circ\text{C}/\text{km}$. Für eine detailliertere Untersuchung der Tiefenabhängigkeit (mehrere, sich anschliessende Tiefenbereiche) reicht der verfügbare Datensatz nicht aus.

Aus den auf diese Weise erhaltenen G-Werten wurde mit Hilfe eines Computerprogrammes ein gleichmässiges Netz (Maschenweite: 2.5 km) von Datenpunkten berechnet («Interpolationsprogramm») und mittels eines weiteren Programmes *Isolinien* gezeichnet. Die gleichen Programme wurden bereits früher zur Wärmeflusskartierung der Schweiz verwendet (BODMER & RYBACH 1984). Die zur Verfügung stehende Datendichte liegt an der unteren Anwendbarkeitsgrenze des Interpolationsprogrammes. Deshalb musste der Einflussbereich für die Interpolation relativ gross gewählt werden (Radius: 50 km; diesbezügliche Details siehe in RYBACH & BODMER 1983). Dies führt zu einer entsprechenden «Glättung» des Gradientenbildes.

3. Das geothermische Bild der Nordschweiz

Die geothermischen Verhältnisse werden durch Temperaturgradientenkarten der erwähnten Tiefenbereiche dargestellt (Fig. 1 und 2).

Die laterale Variation des Gradienten im Tiefenbereich 0–500 m geht über einen Bereich von $30^\circ\text{C}/\text{km}$ bis $60^\circ\text{C}/\text{km}$, wobei ein Maximum in der Gegend des unteren Aaretals liegt. Ferner zeichnet sich westlich von Basel die bekannte geothermische Anomalie des Rheintal-Grabens ab (RYBACH 1981); sie setzt sich bis in die Gegend des Bielersees fort. Die markante geothermische Anomalie im unteren Aaretal ist auch auf dem Kartenbild des Gradienten im Tiefenbereich 750–1700 m erkennbar; hinsichtlich der lateralen Variation von G zeigt sich im wesentlichen dasselbe geographische Verteilungsbild, bei einer engeren Schwankungsbreite von $25^\circ\text{C}/\text{km}$ bis $45^\circ\text{C}/\text{km}$. Da die Rheingraben-Anomalie am Rand des betrachteten Gebietes liegt und für die Interpolation hier nur wenige Stützpunkte zur Verfügung stehen, ist der Verlauf der Isolinien unsicher (gestrichelt).

Grossräumig sind die Karten geprägt durch eine bereits früher beschriebene generelle Abnahme von G gegen Süden (RYBACH 1982); diesem Trend sind die obenerwähnten Anomalien überlagert. Es ist auffallend, dass die Lage der Anomalie im unteren Aaretal geographisch mit dem durch die Untersuchungen der Nagra kürzlich entdeckten *Permo-karbon-Trog* übereinstimmt.

In qualitativer Hinsicht stimmen die Karten in Figur 1 und 2 mit der G-Karte der Nagra (NTB 84-26, Fig. 28) und mit der Molasse-Gradientenkarte von VOLLMAYR (1983) in groben Zügen überein. Dabei ist zu bemerken, dass die letztgenannten Karten auf unterschiedlichen Berechnungsgrundlagen beruhen; ihr Isolinienverlauf ist deshalb verschieden.

Die Gradientenkarten (Fig. 1 und 2) beinhalten auch Einflüsse, die von unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der angetroffenen Gesteine herrühren können. Berücksichtigt man diese, so kann man den geothermischen Wärmefluss bestimmen (BODMER & RYBACH 1984). Auf diese Weise erhält man im Zentrum der Aaretal-Anomalie Werte über $150\text{ mW}/\text{m}^2$, während der regionale Basiswert (Werte ausserhalb der Anomalie) $80\text{--}90\text{ mW}/\text{m}^2$ beträgt.

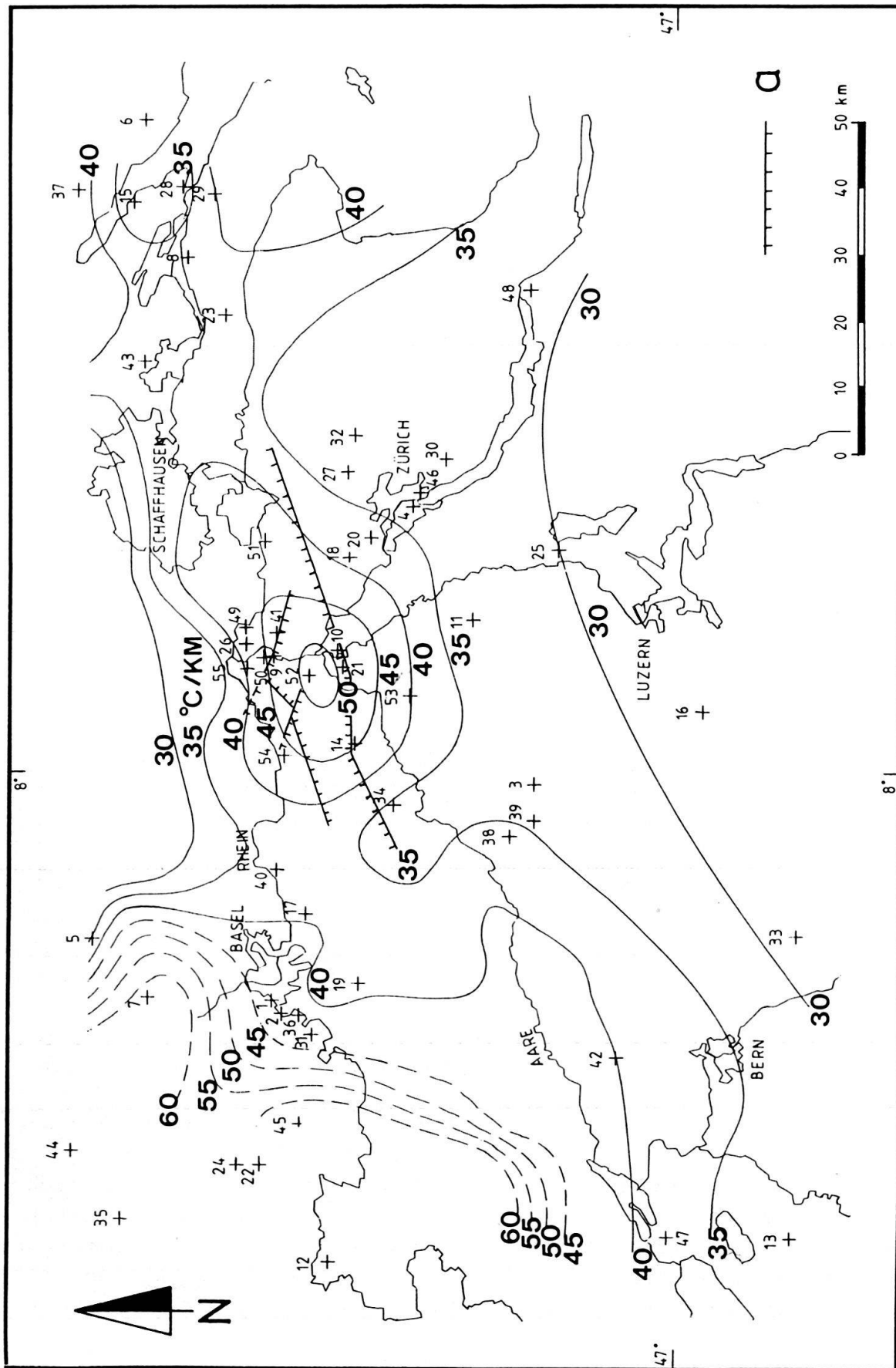


Fig. 1. Karte des geothermischen Gradienten für den Tiefenbereich 0-500 m. Die Zahlen neben den Datenpunkten beziehen sich auf ihre Numerierung im Anhang.
a: tektonische Störungen im Bereich des Permokarbon-Trograndes

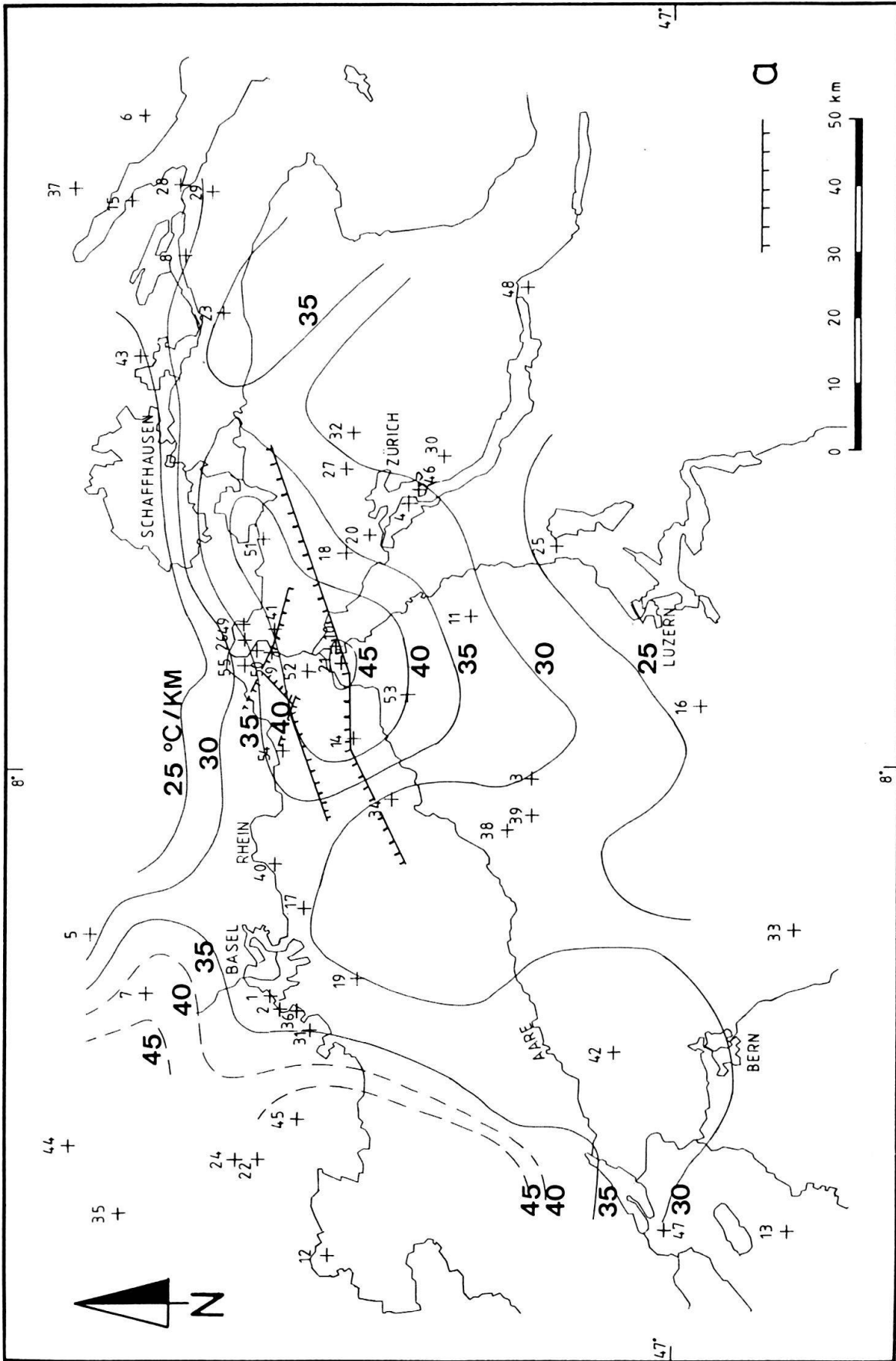


Fig. 2. Karte des geothermischen Gradienten für den Tiefenbereich 750–1700 m.

4. Zur Interpretation des geothermischen Befundes

Das markanteste Merkmal des geothermischen Bildes der Nordschweiz ist die ausgeprägte positive Anomalie im unteren Aaretal. Die Anomalie deutet darauf hin, dass in diesem Gebiet – zusätzlich zum normalen regionalen Wärmefluss aus dem Erdinneren – ein verstärkter, aufwärtsgerichteter Wärmetransport stattfindet. Es bleibt zunächst offen, ob es sich dabei um konduktiven oder konvektiven Wärmetransport handelt.

Prinzipiell gibt es verschiedene Erklärungsmöglichkeiten für eine positive geothermische Anomalie:

- thermische Störung im Erdmantel
- auskühlender untiefer Magmakörper
- lokal starke Hebung/Erosion
- ausgeprägte petrophysikalische Kontraste (relativ zum Umfeld erhöhte Wärmeleitfähigkeit oder höhere radioaktive Wärmeproduktion)
- aufsteigende Tiefengrundwässer.

Nachstehend sollen die einzelnen Interpretationsmöglichkeiten aufgrund von Modellrechnungen bewertet werden. Aus Platzgründen kann hier auf die Berechnungen nicht näher eingegangen werden.

Es wäre denkbar, dass im betrachteten Gebiet eine im oberen Erdmantel liegende thermische Störung sich bis an die Erdoberfläche durchpaust. Die beschränkte Ausdehnung der Anomalie (< 30 km) schliesst jedoch diese Möglichkeit a priori aus.

Eine in die obere Kruste eingedrungene, sich auskühlende Intrusion könnte zum beobachteten Verteilungsbild des geothermischen Feldes führen. Modellrechnungen für einen Intrusivkörper mit der zur Anomalie «passenden» Form (rechteckig, mit Kantenlängen 15×20 km horizontal, 10 km vertikal, Tiefe der oberen Begrenzung 10 km unter der Erdoberfläche) ergeben Maximalalter von $1 \cdot 10^6$ Jahren für die Intrusion. Es gibt jedoch keine Indizien für einen derart jungen Magmatismus in der Nordwestschweiz (NTB 84-25, S. 152).

Eine lokal ausgeprägte Hebung/Erosion müsste, um die beobachtete thermische Anomalie zu erklären, seit einigen 10 000 Jahren in der Grössenordnung von 10 mm/Jahr liegen. Obwohl rezente Hebungstendenzen im fraglichen Gebiet nachgewiesen wurden (NTB 84-17, S. 19), fehlen die quartärgeologischen Hinweise für derart massive Krustenbewegungen (NTB 85-14, S. 111).

Ebenfalls mit Modellkörpern wurden die petrophysikalischen Kontraste berechnet, welche zur Erzeugung der Wärmeflussanomalie notwendig wären. So müssten z. B. die Permokarbon-Sedimente eine – relativ zu den umgebenden Gesteinen – zweifach höhere Wärmeleitfähigkeit aufweisen; ein Sachverhalt der schon aufgrund der lithologischen Gegebenheiten ausgeschlossen werden kann. Will man die Anomalie durch erhöhte Wärmeproduktion (herrührend von höheren Gehalten natürlicher Radioisotope) erklären, so müssten die Trog-Sedimente die zehnfache der beobachteten Radioaktivität (GRELLER & RYBACH 1984) aufweisen.

Somit bleibt für die Erklärung der geothermischen Anomalie im unteren Aaretal die Existenz von aufsteigenden Tiefengrundwässern. Mehrere Anzeichen weisen darauf hin, dass in diesem Gebiet Tiefengrundwasserströmungen mit signifikanter Vertikal-Komponente vorhanden sind:

- natürliche Thermalwasseraustritte, insbesondere entlang der Jura-Hauptüberschiebung (Baden, Schinznach)
- Abnahme des geothermischen Gradienten mit der Tiefe (siehe Abschnitt 2)
- Zunahme des hydraulischen Potentials mit der Tiefe (in mehreren Bohrungen beobachtet).

Nachstehend soll auf mögliche geothermisch relevante Tiefengrundwasserströmungen im Bereich des nordschweizerischen Permokarbon-Troges eingegangen werden mit dem Ziel, sie modellmässig nach Richtung und Stärke quantitativ zu charakterisieren und ihren Einflussbereich nach der Tiefe hin abzugrenzen. Dabei soll insbesondere der Einfluss des Troges auf das Temperaturfeld sowie seine hydraulischen Effekte (drainierende Wirkung der Trogränder) untersucht werden.

5. Thermohydraulische Modellierung der Tiefengrundwasserströmung im Bereich des Nordschweizerischen Permokarbon-Troges

Der Einsatz numerischer Simulationsrechnungen, welche gleichzeitig den Wassertransport und das Temperaturfeld modellieren (sogenannte *thermohydraulisch gekoppelte Modelle*), sind in den letzten Jahren fester Bestandteil bei der Untersuchung und Interpretation geothermisch interessanter Gebiete geworden. Sie berücksichtigen u. a. die Temperaturabhängigkeit von Fluid-Dichte und -Viskosität.

Die in der jüngsten Vergangenheit sukzessiv verbesserte Kenntnis der Geologie, Tektonik, Hydrogeologie und des Temperaturfeldes der Nordschweiz erlaubte auch in diesem Gebiet thermohydraulische Modellrechnungen durchzuführen und sie anhand von Felddaten zu validieren. Im Rahmen von zwei geothermischen NEFF-Projekten (NEFF 1980, NEFF 1984) wurden zwei- und dreidimensionale numerische Modellrechnungen zur Untersuchung des Warmwasseraufstiegs entlang der Jura-Hauptüberschiebung eingesetzt, wobei jedoch die Existenz des Permokarbon-Troges noch nicht berücksichtigt wurde.

Die im Rahmen des Projekts «Gewähr» durchgeführten umfangreichen Modellrechnungen der Nagra (NTB 84-50) haben nur das hydraulische Fließfeld der Tiefengrundwasserströmungen berücksichtigt. Das lokale Strömungsmodell rechnet mit einer durchgehend durchlässigeren Partie des Grundgebirges («oberes Kristallin», 500 m mächtig) unter dem Trog (DIEBOLD 1986, S. 37).

Anhand eines zweidimensionalen, N-S-verlaufenden Modells von Böttstein nach Hausen/AG (17 km Länge, 4 km Tiefe) untersuchte GRIESSER (1985) den Einfluss verschiedener Herkunftsrichtungen der Kristallin-Komponente im Thermalwasser entlang der Hauptüberschiebung auf das Temperaturfeld im Untergrund. In diesen Modellrechnungen wurde die Existenz eines rund 3 km tiefen, schlechtdurchlässigen Permokarbon-Troges berücksichtigt. Unter den getroffenen Modellannahmen konnte das berechnete Temperaturfeld an gemessene Bohrloch- und Quellentemperaturen nur dann angepasst werden, wenn für die Kristallinkomponente eine *Herkunft aus Süden (Alpen)* angenommen wurde. Unter dem Trogbereich musste ein basaler Wärmefluss von 130 mW/m^2 angesetzt werden; dies deutet darauf hin, dass der Ursprung der thermischen Anomalie in noch grösserer Tiefe zu suchen ist.

Um festzustellen, welche vertikalen Wasserbewegungen notwendig sind, um die beobachtete Wärmeflussanomalie zu erzeugen, wurden die numerischen Simulationsrechnun-

gen, ausgehend vom geometrischen Modell in GRIESSER (1985), nun auf einen grösseren Tiefenbereich ausgedehnt. Figur 3 zeigt die dem Modell zugeordneten hydrostratigraphischen Einheiten.

Den Modellrechnungen wurden folgende Annahmen zugrunde gelegt: Aus einem Tiefenbereich von rund 7 km steigen entlang von tektonischen Störungen im Kristallin unter dem Trog (oder im Trog selbst) geringe Mengen von Tiefenwasser auf. Oberhalb etwa 3000 m Tiefe wird diese Wasser«strömung» (minimale Mengen!) *entlang der Trogränder drainiert*. Dabei tritt das Wasser seitlich in die obersten Partien des Kristallins ein, von wo sie im Norden gegen den Rhein hin entwässert und im Süden entlang der

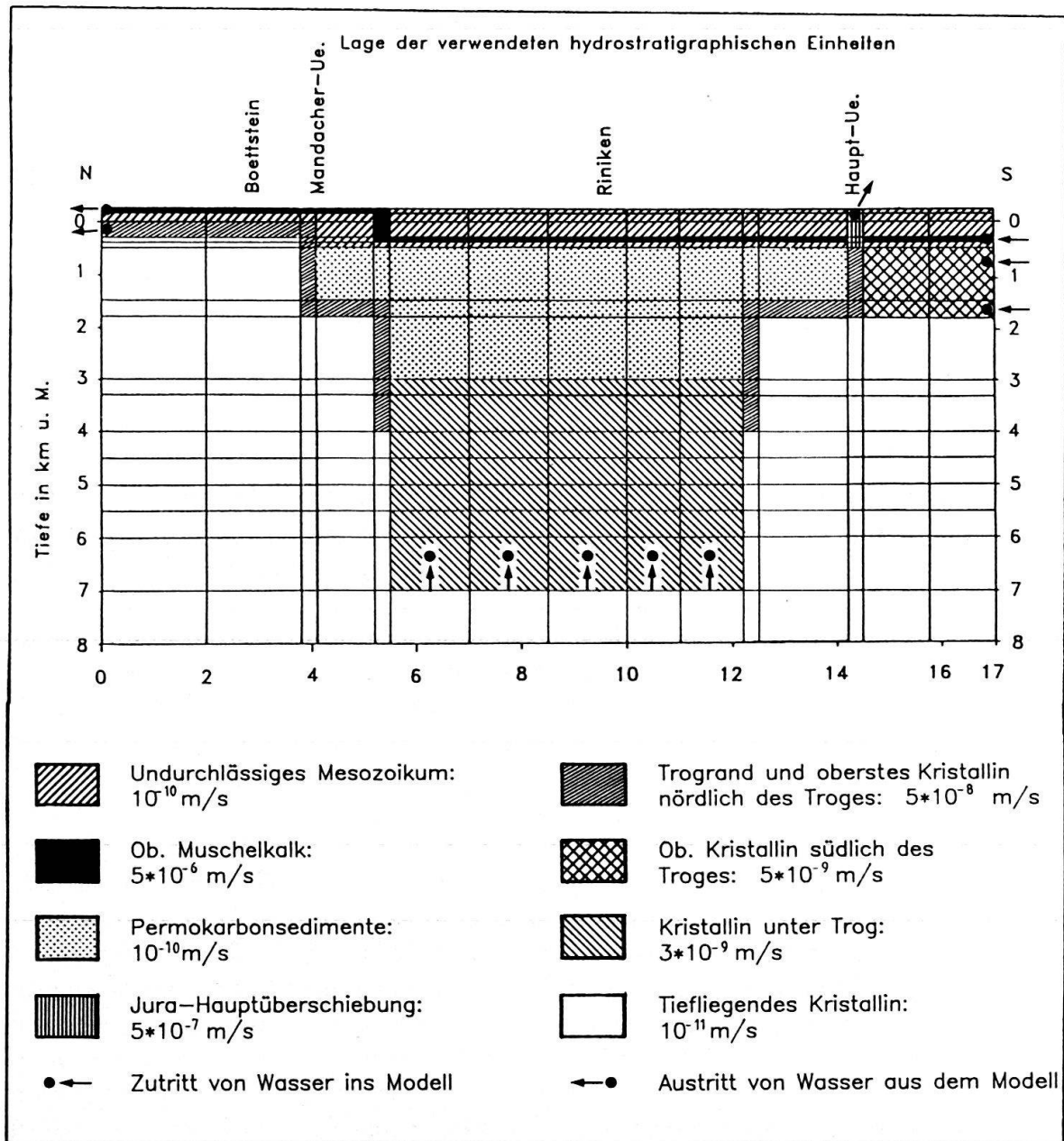


Fig. 3. Lage der hydrostratigraphischen Einheiten für die thermohydraulische Modellierung. Die angegebenen hydraulischen Leitfähigkeiten sind notwendig, um die Modellresultate mit den Feldbeobachtungen in Einklang zu bringen. Die restlichen Randelemente sind undurchlässig.

Hauptüberschiebung austritt. Gleichzeitig findet südlich des Troges eine von Süden nach Norden gerichtete Wasserbewegung im obersten 2 km mächtigen Bereich des Kristallins und im Oberen Muschelkalk statt. Die aus diesem Modellkonzept folgenden hydraulischen Leitfähigkeiten der entsprechenden hydrostratigraphischen Einheiten sind in Figur 3 ebenfalls angeführt.

Das Modell berücksichtigt nur einen Ausschnitt des gesamten Tiefengrundwasser-Fließsystems zwischen den Alpen und dem Rhein. Die *hydraulischen Randbedingungen* mussten deshalb so gewählt werden, dass die hydraulischen Felddaten innerhalb des Modellgebietes durch die Modellresultate befriedigend angenähert wurden. Um die hydraulischen Felddaten im oberen Kristallinbereich nördlich des Troges befriedigend zu simulieren, war es notwendig, einen seitlichen Wasserzufluss (analog zu GRIESSER 1985) anzunehmen. Die Interpretation hydrogeochemischer Daten der Region weist ebenfalls auf eine laterale Tiefengrundwasserkomponente (aus östlicher Richtung, dem Schwarzwald entstammend, vgl. DIEBOLD 1986, S. 46) hin. Als *thermische Randbedingungen* wurden an der Basis des Modells ein konstanter Wärmefluss von 80 mW/m^2 sowie an den seitlichen Begrenzungen ein konstanter Temperaturgradient von 30°C/km angenommen. Dem oberen Modellrand, der auf einem Niveau von 250 m. ü. M. liegt, wurde eine konstante Temperatur von 13°C zugeordnet.

Für die *Validierung des Modells* standen die folgenden Felddaten zur Verfügung: hydraulisches Potential der einzelnen Aquifere in Tiefbohrungen (u. a. Bohrungen Böttstein und Riniken, DIEBOLD 1986, S. 29), Austrittsmenge und -temperatur von Thermalquellen, Wärmeflussverteilung an der Erdoberfläche und Temperaturverteilung im Untergrund, bestimmt aus Bohrlochmessungen.

Die Berechnung der Druckverteilung und des Temperaturfeldes erfolgte mit Hilfe eines Integrated Finite Difference Programms (BODVARSSON 1982; Details in GRIESSER 1985). Das Programm beruht auf der Annahme eines äquivalent-porösen Mediums. Dies bedeutet, dass auch geklüftete Gesteinskörper als porös/permeabel betrachtet werden. Für grosse Elementvolumen kann diese Voraussetzung in erster Näherung als erfüllt angesehen werden. Figur 4 zeigt jenes errechnete Temperaturfeld, welches die hydraulischen und thermischen Felddaten am besten approximiert. Die *Wassermenge*, die unter dem gesamten unteren Trogbereich von ca. 6 km Breite (und pro m in die dritte Dimension, d. h. parallel zur Trogachse) aufsteigt, beträgt in diesem Fall $2 \cdot 10^{-4} \text{ kg/sec}$. Diese geringe Menge genügt, um die beobachtete geothermische Anomalie im Bereich des Permokarbon-Troges im unteren Aaretal zu erzeugen.

Der aus dem Temperaturfeld in Figur 4 errechnete Wärmefluss beträgt im Bereich der Modell-Mitte (Bohrung Riniken) über 120 mW/m^2 . Die leichte Asymmetrie des errechneten Temperaturfeldes im Bereich des Troges rührt daher, dass der grösste Teil des Kristallin-Wassers entlang des Trog-Nordrandes aufsteigt und gegen den Rhein hin entwässert.

Die vertikale Darcy-Geschwindigkeit liegt im Kristallin unter dem Trog um etwa $2 \cdot 10^{-10} \text{ m/sec}$ und im Bereich des nördlichen Trograndes um $7 \cdot 10^{-10} \text{ m/sec}$ oder rund 20 mm/Jahr. Als Konsequenz lässt sich aus den Modellrechnungen schliessen, dass, falls man die geothermische Anomalie des unteren Aaretals Tiefengrundwasserströmungen zuschreibt, *vertikale Durchlässigkeiten* in der Grössenordnung von 10^{-9} m/sec bis in grössere Tiefen vorhanden sein müssen.

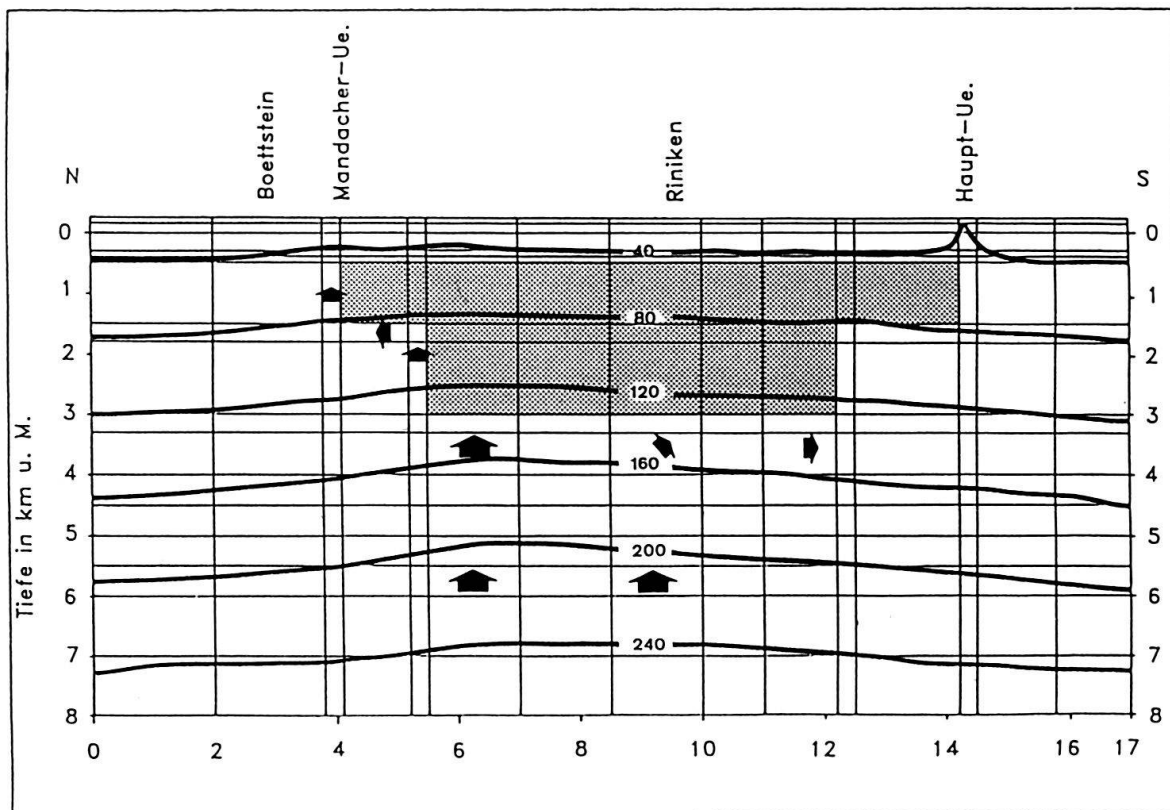


Fig. 4. Berechnetes Temperaturfeld im Bereich des Permokarbon-Troges (dunkel). Bei dieser Berechnung (Details siehe Text) steigt unter dem Trog $2 \cdot 10^{-4}$ kg Wasser pro sec und m (quer zur Trogachse) auf. Die Richtung der Tiefengrundwasserströmung ist durch Pfeile markiert. Isothermen in °C.

Offene Fragen

Es stellt sich zunächst die Frage, woher das Wasser in den vom numerischen Modell geforderten Tiefen stammt und warum es gerade im Bereich des unteren Aaretales aufsteigt. Der Aufstieg scheint durch die Anwesenheit des Permokarbon-Troges begünstigt zu sein. Die grossen Mächtigkeitsunterschiede im Oberrotliegenden zwischen den Bohrungen Riniken und Weiach (DIEBOLD 1986, S. 22) deuten auf differentielle tektonische Bewegungen zwischen diesen Standorten hin, was ein Indiz für tiefgreifende Störungszonen sein könnte; ferner scheint die Vorwald-Störung (NTB 84-30, S. 56) im Bereich des unteren Aaretales den nördlichen Trogrand zu schneiden und diesen dextral um 4–5 km zu versetzen (NTB 84-25, S. 53). Diese und eventuell weitere tiefgreifende Störungszonen könnten mögliche Wasseraufstiegswege bilden. Das Herkunftsgebiet (Infiltrationszone) ist dagegen noch sehr spekulativ. Es wäre sowohl eine Herkunft aus den Alpen wie aus dem Schwarzwald denkbar.

Gewisse Antworten auf offene Fragen könnten weitere gekoppelte thermohydraulische Modelle liefern, wobei die Modellierung dreidimensional zu erfolgen hätte. Eine Verfeinerung der Datenbasis ist ebenfalls erwünscht, z. B. durch eine *geothermische Detailkarte* 1:100 000 (Wärmeflusskarte) des unteren Aaretales und angrenzender Gebiete. *Wärmefluss-Analysen* (vertikale Variation, Abhängigkeit von der Gesteinsradioaktivität) sind ebenfalls vorzunehmen.

7. Schlussfolgerungen

Das geothermische Bild der Nordschweiz wird dominiert durch eine ausgeprägte positive Anomalie mit Zentrum im unteren Aaretal, die geographisch mit dem nord-schweizerischen Permokarbon-Trog zusammenfällt. Die Anomalie wird als das Resultat von Tiefengrundwasserströmungen mit signifikanter Vertikalkomponente interpretiert, nachdem eine Reihe von Erklärungsalternativen bewertet und ausgeschieden wurde.

Zur Abschätzung von Richtung und Betrag der Tiefengrundwasserströmung wurden zweidimensionale, gekoppelte thermohydraulische Modellrechnungen mittels numerischer Methoden durchgeführt. Sie liefern grössenordnungsmässige Hinweise auf die Wassermengen und Migrationsgeschwindigkeiten im Strömungssystem sowie auf die Durchlässigkeitsverhältnisse im Bereich des Permokarbon-Troges. Aufgrund der Modellrechnungen muss angenommen werden, dass in Trognähe grössere Kristallinbereiche mit vertikalen Durchlässigkeiten $> 10^{-9}$ m/sec bis in Tiefen von mehreren km vorhanden sind. Die Darcy-Geschwindigkeit der Tiefengrundwasserströmung liegt um rund 10 mm/Jahr. Ferner zeigen die Modellrechnungen eine Reihe von offenen Fragen auf.

Verdankungen

Die Untersuchungen erfolgten grösstenteils im Auftrag der Untergruppe Geologie der AGNEB (Arbeitsgruppe des Bundes für die nukleare Entsorgung), die Datenkompilation und -auswertung im Rahmen der KGS- und SGPK-Arbeitsprogramme. Die Tätigkeit in den Aufsichtskommissionen der Nagra-Bohrungen gab dem Erstautor reichlich Gelegenheit zu wertvollen Fachgesprächen mit dem Nagra-Team und mit Mitarbeitern der HSK (Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Bundesamt für Energiewirtschaft), Sektion Radioaktive Abfälle. Wir danken der Geschäftsleitung der Nagra für die Erlaubnis, noch unveröffentlichte Temperaturdaten der KRISTAL-Bohrungen in die Auswertung (Gradienten-Werte im Anhang) einzubeziehen.

Mitteilung Nr. 525, Institut für Geophysik der ETH Zürich

LITERATURVERZEICHNIS

- BEW (1981): Geothermische Datensynthese der Schweiz. – Schriftreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Studie Nr. 26, 122 S., Bern.
- BODMER, Ph. & RYBACH, L. (1984): Geothermal Map of Switzerland (Heat Flow Density). – Beitr. Geol. Schweiz, Ser. Geophysik Nr. 22, 47 S.
- (1985): Heat flow maps and deep groundwater circulation: examples from Switzerland. – J. Geodyn. 4, 233–246.
- BODVARSSON, G.S. (1982): Mathematical modeling of the behavior of geothermal systems under exploitation. – Ph.D. thesis, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley/USA.
- DIEBOLD, P. (1986): Erdwissenschaftliche Untersuchungen der Nagra in der Nordschweiz; Strömungsverhältnisse und Beschaffenheit der Tiefengrundwässer. – Mitt. aarg. natf. Ges. 31, 11–52.
- EUGSTER, W. & RYBACH, L. (1985): Überprüfung von geothermischen Angaben im Projekt GEWÄHR 1985. – Bericht zuhanden der Untergruppe Geologie der AGNEB, Bern, 22 S. (unveröffentlicht).
- GRELLER, M. & RYBACH, L. (1984): Uran-Prospektion im Permokarbon der Nordschweiz. – Bericht zuhanden der Eidg. Fachkommission für schweizerische Uranvorkommen, Bern, 45 S. (unveröffentlicht).
- GRIESSER, J.-Cl. & RYBACH, L. (1984): Nutzbarmachung der Geothermie im Raum Baden – Interpretation der Temperaturmessungen. – NEFF-Projekt Nr. 165, Interner Bericht Nr. 31, 8 S. (unveröffentlicht).
- GRIESSER, J.-Cl. (1985): Geothermische Prospektion zwischen Baden und Schinznach; Geophysikalische Untersuchungen und thermohydraulische Modellrechnungen. – Diss. Nr. 7845, ETH Zürich, 209 S.

- NEFF (1980): Forschungsprojekt «Geothermische Energie und unterirdische Wärmespeicherung, «Teilprojekt I: «Geothermische Prospektion im Raume Koblenz–Wildegg–Dielsdorf». – Schlussbericht, Nationaler Energie-Forschungs-Fonds, Projekt Nr. 33, Basel, 162 S.
- (1984): Forschungsprojekt «Erschliessung geothermischer Vorkommen», Teilprojekt I: «Nutzbarmachung der Geothermie im Raume Baden und Umgebung». – Schlussbericht, Nationaler Energie-Forschungs-Fond, Projekt Nr. 165, Basel, 105 S.
- RYBACH, L. (1981): Nutzungsmöglichkeiten geothermischer Energie in der Region Basel. – Verhandl. Naturf. Ges. Basel 92, 55–62.
- (1982): Die geothermischen Verhältnisse in der Schweiz. – Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 48, 23–34.
- RYBACH, L. & BODMER, Ph. (1983): Processing and representation of heat flow density maps, Part II: Construction and contouring. – Zbl. Geol. Paläont. Teil I, Heft 1/2, 87–92.
- RYF, W. (1984): Thermalwasserbohrung 1983, Engerfeld, Rheinfelden. – Rheinfelder Neujahrsblätter, 1984, 43–52.
- SCHÄRLI, U. & RYBACH, L. (1982): Bericht über die geothermischen Verhältnisse der Bohrung Herdern 1/TG. Forschungsgruppe Geothermik und Radiometrie, Institut für Geophysik ETHZ, Interner Bericht Nr. 116, 8 S. (unveröffentlicht).
- VOLLMAYR, Th. (1983): Temperaturmessungen in Erdölbohrungen der Schweiz. – Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 49, 15–27.
- (1985): Temperature in the subsurface of the Swiss and German Alpine foreland. – J. Geodyn. 4, 305–320.

Nagra Technische Berichte (nach NTB-Nummer geordnet):

- NTB 84-17: «Bestimmungen von rezenten Bewegungen der Erdkruste mit geodätischen Methoden», E. GUBLER, D. SCHNEIDER, P. KELLERHALS
- NTB 84-25: «Erläuterungen zur geologischen Karte der zentralen Nordschweiz 1:100 000», W. H. MÜLLER, M. HUBER, A. ISLER, P. KLEBOTH
- NTB 84-26: «Szenarien der geologischen Langzeitsicherheit», P. DIEBOLD, W. H. MÜLLER
- NTB 84-30: «Das Kristallin des Südschwarzwaldes», M. HUBER, A. HUBER
- NTB 84-50: «Simulation par Modèle Mathématique des Ecoulements Souterrains entre les Alpes et la Forêt Noire», F. KIMMEIER, P. PERROCHET, R. ANDREWS, L. KIRALY
- NTB 85-14: «Sedimentation und Tektonik im Tertiär der Nordschweiz», H. NAEF, P. DIEBOLD, S. SCHLANKE

Manuskript eingegangen am 3. Februar 1987

Revision angenommen 13. März 1987

Anhang: Geothermischer Datensatz der Nordschweiz
(aus EUGSTER & RYBACH 1985)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	ALLSCHWIL 1	607950/267300	327	277	43.0	28.4	B	A	E	E
2	ALLSCHWIL 2	605960/265820	750	333	44.5	34.5	B	A	I	E
3	ALTISHOFEN	640375/228180	2166	480	31.4	31.4	B	B	I	I
4	AQUI	682125/246490	500	419	33.8	33.8	B	B	I	E
5	BADENWEILER 3	617225/294325	505	425	35.8	27.4	B	A	I	E
6	BAITENHAUSEN	740300/286500	1500	435	34.5	31.1	B	A	I	I
7	BAD BELLINGEN 3	608410/285980	1194	225	64.0	44.1	B	A	I	E
8	BERLINGEN 1	719685/280195	2386	593	38.5	29.1	B	A	I	I
9	KKW BEZNAU	659491/267242	322	326	56.3	42.7	B	A	E	E
10	BIRMO	660350/257675	160	368	51.0*	51.0*	D	D	E	E
11	BOSWIL 1	664845/237415	1836	648	31.1*	31.1*	B	C	I	I
12	BUIX	568780/258620	1053	395	50.3	36.1	B	A	E	E
13	COURTION 1	572415/189420	3083	599	31.3	27.4	B	A	I	I
14	DENSBUEREN	646455/255054	230	516	50.0*	50.0*	D	D	E	E
15	DINGELSDORF 1	727950/288300	2820	445	32.5	27.0	B	A	I	I
16	ENTLEBUCH 1	651250/202800	5289	1080	45.0	23.3	B	A	I	I
17	FRENKENDORF	621042/262365	300	305	44.0	30.0	B	A	E	E
18	FURHTAL 709	674350/255890	175	420	35.4*	34.0*	D	D	E	E
19	GRELLINGEN	610570/254310	213	326	41.0*	30.0*	B	B	E	E
20	GUBRIST	677310/252755	200	585	40.0*	30.6*	D	A	E	E
21	HAUSEN HH1	657836/256939	408	380	47.0*	44.0*	B	D	I	E
22	HEIMERSDORF	583280/269090	798	392	64.0	42.9	B	A	I	E
23	HERDERN 1	711000/274500	2154	519	36.8	36.8	E	E	I	I
24	HIRTZBACH	583250/272450	738	310	50.7	40.3	B	A	I	E
25	HUENENBERG 1	675522/224593	3288	461	30.0	23.1	B	A	I	I
26	KLINGNAU 20	661356/271397	398	443	42.5	30.2	B	A	I	E
27	KLOTEN	687350/256200	380	444	31.1	31.1	B	B	E	E
28	KONSTANZ	730270/280990	660	400	30.4	23.2	B	A	I	E
29	KREUZLINGEN 1	729201/276169	2550	538	40.9	33.3	B	A	I	I
30	KUESNACHT 1	689296/241485	2693	642	34.6	27.3	B	A	I	I
31	LEYMEN	602840/261300	1155	353	37.0	30.2	B	A	I	E
32	LINDAU 1	692815/255098	2377	516	31.3	27.3	B	A	I	I
33	LINDEN 1	617740/188567	5448	881	26.6	26.6	B	A	I	I
34	BAD LOSTORF	637327/249242	584	549	30.0	23.8	B	A	I	E
35	MICHELBAACH	575100/289950	1059	348	35.4	28.9	B	B	I	E
36	NEUWILLER	605750/263250	1063	360	38.6	38.6	B	B	I	E
37	OWINGEN	729800/296700	1622	523	43.5	36.6	B	A	I	I
38	PFAFFNAU 1	632708/231789	1834	500	39.9	31.4	B	A	I	I
39	PFAFFNAU SUED 1	634950/228120	1209	616	31.7	23.7	B	B	I	E
40	RHEINFELDEN	627650/266680	600	300	33.0	33.0	F	F	I	E
41	RUCKFELD 1	662960/266850	480	414	40.0	40.0	D	D	I	E
42	RUPPOLDSRIED 1	599450/215600	996	483	40.0	33.3	B	A	I	E
43	SINGEN	703990/286630	685	435	37.0	24.0	B	A	I	E
44	STAFFELFELDEN 4	585300/297450	1918	256	56.0	41.7	B	A	I	I

Anhang (Fortsetzung)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
45	SUNDGAU	589400/263100	582	448	68.0	52.2	B	A	I	E
46	TIEFENBRUNNEN	684200/245350	736	408	30.0	30.0	B	A	I	E
47	TSCIUGG 1	572610/207910	704	463	36.8	30.2	B	A	I	E
48	TUGGEN	714750/228760	1300	408	33.8	30.3	B	A	I	E
49	ZURZACH 3	663742/271482	690	346	48.6*	41.5*	D	B	I	E
50	BOETTSTEIN K1	659340/268550	1501	347	46.0+	32.6+	B	B	I	E
51	WEIACHI K2	676750/268620	2482	369	43.9+	43.0+	B	B	I	I
52	RINIKEN K3	656604/261900	1800	325	54.7+	41.4+	B	B	I	I
53	SCHAFISHEIM K4	653620/246760	2007	421	36.8+	36.8+	B	B	I	I
54	KALSTEN K5	644641/265624	1306	320	43.2+	35.3+	B	B	I	E
55	LEUGGERN K6	657634/271208	1689	359	36.8+	34.3+	B	B	I	I

Legende:

Kol. 1: Nr. der Bohrung

Kol. 2: Name der Bohrung

Kol. 3: Landeskoordinaten

Kol. 4: Endteufe (z. T. ungenau)

[m. u. T]

Kol. 5: Höhenkote

[m. ü. M]

Kol. 6: Geothermischer Gradient 0–500 m

[°C/km]

Kol. 7: Geothermischer Gradient 750–1700 m

[°C/km]

Kol. 8: Quelle Gradient 0–500 m:

A = BEW (1981)

B = dieser Anhang

C = VOLLMAYR (1983)

D = GRIESSER & RYBACH (1984)

E = SCHAERLI & RYBACH (1982)

F = RYF (1984)

Kol. 9: Quelle Gradient 750–1700 m

Kol. 10: Bestimmung des Gradienten 0–500 m:

E = Extrapolation

I = Interpolation

Kol. 11: Bestimmung des Gradienten 750–1700 m:

E = Extrapolation

I = Interpolation

Indizierung der Zahlen:

119.0* Ungenauer Wert

130.0+ Besonders genauer Wert

Die Gradienten 0–500 m wurden mit einer Oberflächentemperatur von 9 °C bestimmt.