

Die geothermischen Verhältnisse in der Schweiz

Autor(en): **Rybach, L.**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **48 (1982)**

Heft 115

PDF erstellt am: **11.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-206547>

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 Schweiz¹⁾

von L. RYBACH²⁾

Inhalt

1. Einleitung
2. Die Erfassung der geothermischen Verhältnisse
3. Alpen
4. Mittelland
5. Jura
6. Schlussfolgerungen, Ausblick

Abstract

The geothermal conditions in Switzerland reflect the complex interplay between geologic features and water circulation at depth, crustal structure and terrestrial heat flow, topographic relief and hydraulic potential. The characteristics of the subsurface temperature field as well as the possibilities to find useful low-enthalpy geothermal resources are discussed separately for the three main physiographic units of Switzerland: the Alps, the Molasse basin and the Jura.

1. Einleitung

Die Geothermik ist ein Spezialgebiet der Geophysik, sie befasst sich mit den thermischen Zuständen und Vorgängen im Erdinnern. Die Geothermiker versuchen, das Temperaturfeld im Untergrund (d. h. die räumliche Temperaturverteilung wie z. B. die Temperaturzunahme mit der Tiefe) möglichst genau zu erfassen. Dies ist in erster Linie nur durch direkte Temperaturmessungen möglich, die in möglichst grossen Tiefen (z. B. in Tiefbohrungen) durchzuführen sind. Ein weiteres Ziel geothermischer Forschung ist die Abklärung der Vorgänge, die zu einer gegebenen Temperaturverteilung geführt haben. Dabei kann es sich um reine Wärmeleitung handeln, oder um thermische Effekte von zirkulierendem Tiefenwasser (konvektiver Wärmetransport).

Die Temperaturverteilung in den obersten Kilometern der Erdkruste ist, nebst den rein wissenschaftlichen Interessen (z. B. Geodynamik), auch von zunehmend praktischer Bedeutung: als Planungsgrundlage für unterirdische Bauten, für die Speicherung von

¹⁾ Nach einem Vortrag an der Jahresversammlung der Schweizerischen Petroleum-Geologen und -Ingenieure (VSP) am 20. Juni 1981 in Villars sur Ollon. Mitteilung Nr. 391 aus dem Institut für Geophysik der ETH Zürich

²⁾ Prof. Dr. L. RYBACH, Institut für Geophysik der ETHZ, ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich

Kohlenwasserstoffen und von Wärme, für die Bewirtschaftung von Grundwasservorkommen s. 1., für die Lagerung von radioaktiven Abfällen in geologischen Formationen, sowie zu guter letzt für die Erschliessung von geothermischen Energieträgern. Nachfolgend soll dem letztgenannten Aspekt besondere Beachtung geschenkt werden.

Eine Nutzung der geothermischen Energie ist überall dort möglich, wo ein Arbeitsmedium (Dampf, Wasser) vorhanden ist, um die Erdwärme tieferen Schichten zu entziehen und zur Erdoberfläche zu befördern. Man unterscheidet vier Haupttypen von geothermalen Lagerstätten: 1. Natürliche Dampfvorkommen (in der Schweiz nicht zu erwarten), 2. Thermalquellen-Systeme, 3. Aquifere (Tiefengrundwässerträger) und 4. „Hot dry rock“ (künstliches Zirkulationssystem, noch im Experimentierstadium u. a. in USA, England, Frankreich, Deutschland, Japan). Als geothermische Ressourcen sind in der Schweiz zahlreiche Thermalquellen-Systeme bekannt, ferner ausgedehnte Aquifere, insbesondere im Mittelland und Jura. Diese können durch Tiefbohrungen erschlossen werden, wobei für die Förderung der warmen Tiefenwässer elektrisch betriebene Pumpen in Frage kommen. Die geothermische Wärme kann insbesondere für Raumheizung und Warmwasserbereitung eingesetzt werden, meist unter Verwendung von Wärmepumpen.

2. Die Erfassung der geothermischen Verhältnisse

Bis zur Mitte der 70-er Jahre war die Schweiz hinsichtlich der geothermischen Verhältnisse (Temperaturverteilung im Untergrund, Vorkommen und Bewegung von Tiefenwässern) noch weitgehend eine „terra incognita“. Die seither in Angriff genommenen Abklärungen (finanziert durch das Bundesamt für Energiewirtschaft, die Schweizerische Geophysikalische Kommission, sowie durch den Nationalen Energie-Forschungs-Fonds, NEFF) haben unsere Kenntnisse auf einen mit Nachbarländern vergleichbaren Stand gebracht. Viele Temperaturdaten sowie Angaben über mögliche Wasserleitsysteme wie Fissurationszonen, ferner Daten über die Tiefenlage, Ausdehnung, Porosität und Permeabilität von Tiefengrundwässerträgern sind dabei von der schweizerischen Erdölforschung zur Verfügung gestellt worden.

Die folgenden Ausführungen behandeln die geothermischen Verhältnisse in der Schweiz anhand der traditionellen Unterteilung in die physiographischen Grosseinheiten Alpen / Mittelland (= Molassebecken) / Jura. Für jede dieser Einheiten werden Angaben über das Temperaturfeld gemacht; ferner wird auf nutzbare geothermische Ressourcen eingegangen.

3. Alpen

3.1 *Das Temperaturfeld*

Im Gebiet der Alpen ist das Temperaturfeld in erster Linie durch die bewegte Topographie geprägt. Ferner sind die Vorgänge, die zur Ausbildung des Reliefs geführt haben (Hebung/Erosion) thermisch wirksam. Diese Effekte machen sich noch in mehreren Kilometern Tiefe bemerkbar (BODMER et al., 1979).

Die Verhältnisse seien am Beispiel der Temperaturdaten aus dem Schacht Guspisbach dargestellt. In diesem 520 m tiefen Vertikalschacht wurden während dem Bau des Gotthard-Strassentunnels die Felstemperaturen in mehr oder weniger regelmässigen Abständen gemessen (T_{meas} in Fig. 1). Die Messpunkte definieren eine recht starke Temperaturzunahme mit der Tiefe (geothermischer Gradient: 50°C/km), was durch die

Lage des Guspisbach-Schachtes im Talboden der Gotthardreuss bedingt ist. Die Berücksichtigung des Reliefs durch ein dreidimensionales Korrekturverfahren (T_{Topo}), sowie der möglichen Erosionseffekte, reduziert den Wert des geothermischen Gradienten auf $24^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (T_{Res}). Dieser niedrige Wert deutet auf einen niedrigen Wärmefluss hin. Ein niedriger Wärmefluss im Alpengebiet kann verschiedene Ursachen haben (RYBACH et al., 1980b): relativ grosse Krustenmächtigkeit, Einfluss der gebirgsbildenden Vorgänge („Subduktionseffekt“); ev. auch Infiltration von Niederschlagswasser (BODMER, 1982).

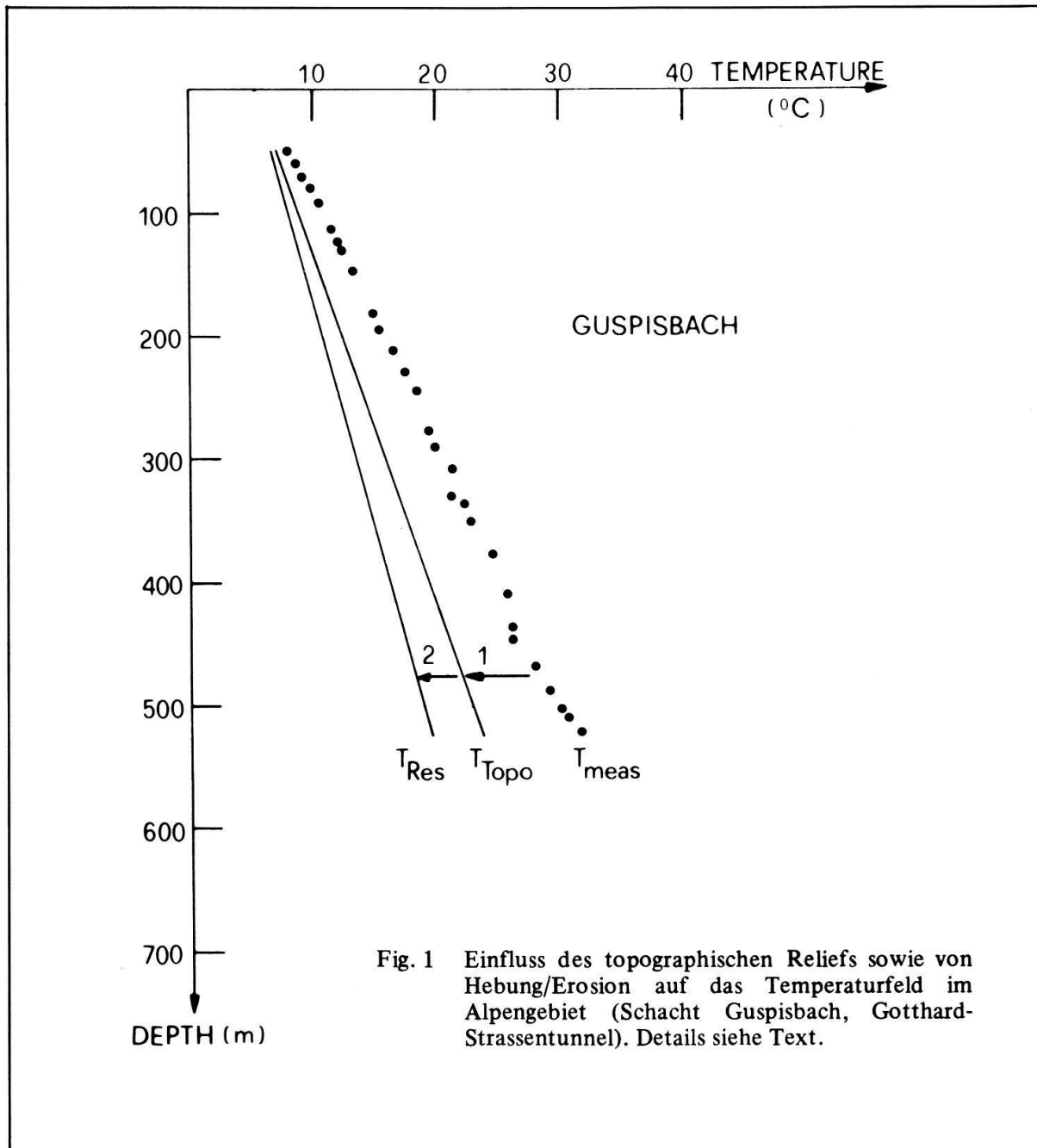


Fig. 1 Einfluss des topographischen Reliefs sowie von Hebung/Erosion auf das Temperaturfeld im Alpengebiet (Schacht Guspisbach, Gotthard-Strassentunnel). Details siehe Text.

Leider gibt es im Alpengebiet nur vereinzelte Temperaturdaten (Messungen in Tunnelbauten und in einigen wenigen Tiefbohrungen). Sie weisen jedoch, nach Durchführung

der notwendigen Korrekturen, alle auf recht niedrige geothermische Gradienten hin (korrigiert). Die überdurchschnittlich hohen Felstemperaturen im Simplon-Tunnel können auf Hebungs/Erosionseffekte zurückgeführt werden (CLARK & JÄGER, 1969).

3.2 *Nutzbare geothermische Ressourcen*

Generell kann gesagt werden, dass für eine geothermische Nutzung eine genügend hohe Permeabilität der betreffenden Gesteinsserien vorhanden sein muss. Die mit der alpinen Orogenese verbundenen tektonischen Deformationsphasen haben in den primär meist sehr kompakten Alpengesteinen zu sehr komplexen, z. T. über kurze Distanzen stark variablen Permeabilitätsverhältnissen geführt. Als geothermisch nutzbar können Thermalwasser-Zirkulationssysteme entlang tektonischer Störungszonen angesehen werden. In Verbindung mit Trias-Gesteinen können ebenfalls permeable, thermalwasserführende Zonen existieren. Intersektionen von Störungszonen sowie die tiefen Talachsen mit ihrer drainierenden Wirkung mit relativen Minima im hydraulischen Potential sind begünstigte Bereiche für das Auftreten von Thermalwasser in relativ geringer Tiefe.

Ein Nutzungsbeispiel eines alpinen Thermalwasser-Zirkulationssystems stellt die geothermische Anlage in Lavey-les-Bains (VD) dar: hier wurde durch gezielte Prospektion in 200 m Tiefe Thermalwasser mit 62° C Temperatur erschlossen, das zur Beheizung und Warmwasserbereitung eines Gebäudekomplexes dient (RYBACH & JAFFÉ, 1981).

4. Molassebecken

4.1 *Das Temperaturfeld*

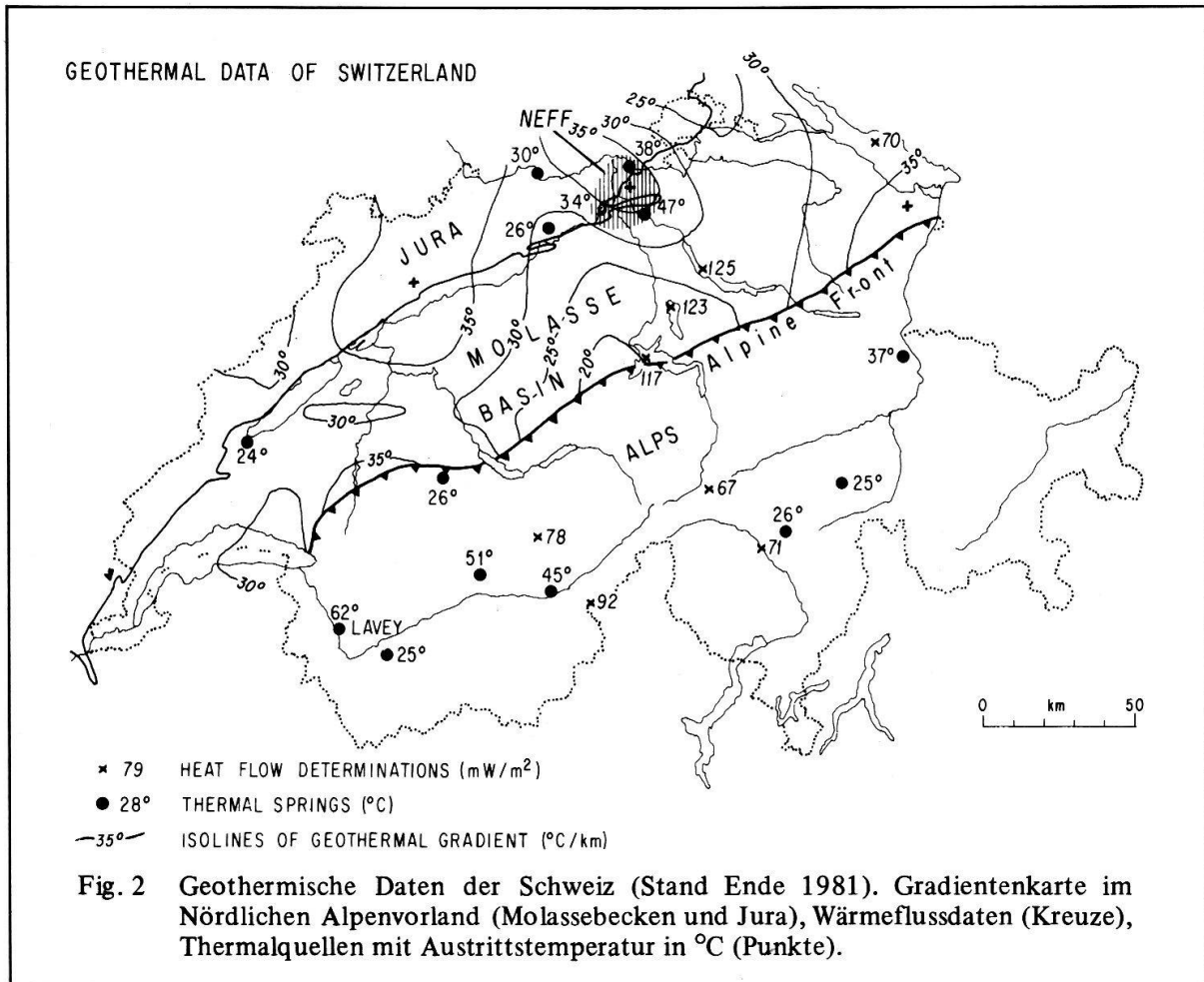
Über die Temperaturverhältnisse im Mittelland gibt es dank den zahlreichen Erdöl-Explorationsbohrungen relativ verlässliche Informationen. Allerdings müssen die Temperaturwerte solcher Bohrungen, falls nicht nach hinreichend langer Wartezeit gemessen, für Effekte der Spülungszirkulation korrigiert werden (siehe z. B. RYBACH & BODMER, 1980). Ferner konnten in mehreren, anderen Zwecken dienenden Tiefbohrungen (z. B. Bohrungen des Konsortiums Untertagespeicher) kontinuierliche Temperaturlogs aufgenommen werden.

Ein typisches Merkmal der Temperatur-Tiefenkurven im Molassebecken ist deren relativ geradliniger Verlauf. Dies deutet auf einen relativ konstanten geothermischen Gradienten im erfassten Tiefenbereich hin. Der geradlinige Verlauf tritt jedoch oft erst unterhalb etwa 400 m Tiefe auf, was auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden kann (Oberflächeneinflüsse, hydrologische Störungen, Tiefenabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der Gesteine).

Aufgrund der Daten von 52 Bohrungen (mittlere Bohrtiefe: 1420 m) wurde der geothermische Gradient kartiert, wobei der Gradient in den einzelnen Bohrungen durch lineare Extrapolation zwischen 30° C und 90° C bestimmt wurde. Als südliche Begrenzung des mit Isolinien kartierten Gebietes wurde der Alpenrand s. 1. (d. h. die Grenze zwischen subalpiner Molasse und Helvetikum bzw. Préalpes Romandes) festgehalten.

In Fig. 2 sind die Gradienten-Isolinien eingetragen (Genauigkeit etwa $\pm 5^\circ \text{C}/\text{km}$). Im nördlichen Alpenvorland variiert der geothermische Gradient im recht weiten Bereich zwischen 20° C/km und 40° C/km, wobei folgende generelle, z. T. sich überlagernde Merkmale festgestellt werden können:

- vom Norden her nimmt der geothermische Gradient gegen den Alpenrand hin ab. Dies hängt möglicherweise mit der zunehmenden Tiefe des kristallinen Basements zusammen (ähnliche Befunde gibt es auch andernorts, siehe z.B. LAUER, 1976 oder HORVATH et al., 1979). Denkbar ist auch ein regionales Nord-Süd-Wasserkreislaufsystem als Ursache (BODMER, 1982).
- zwischen wärmerem West- und Ostteil (Genfersee- bzw. Bodenseegebiet) liegt eine kältere Zentralzone. Die positive Anomalie im St. Galler Rheintal rührt weitgehend vom erhöhten Gradient der Tiefbohrung Dornbirn her. Weitere Anzeichen über eine grössere Ausdehnung dieser Anomalie gibt es zurzeit jedoch nicht.



Die Datendichte in den Alpen reicht nicht aus, um auch dort die Isolinien des geothermischen Gradienten zu zeichnen.

Die Bestimmung des Inkohlungsgrades von kohligten Bestandteilen der Molasse-Sedimente erlaubt wertvolle Rückschlüsse auf die zeitliche Entwicklung der geothermischen Verhältnisse im nördlichen Alpenvorland. Spülproben aus den Tiefbohrungen Küsnacht 1 und Hünenberg 1 ergaben niedrige Inkohlungswerte ($< 0,6 \% R_m$) sowie eine auffallend geringe Inkohlungszunahme mit der Tiefe ($< 0,008 \% R_m$ pro 100 m). Dies spricht für ein durchwegs niedrigtemperiertes paläogeothermisches Regime im Schweizer Molassebecken seit der Ablagerung der Sedimente. Wie der „Aktuogradient“ nimmt auch der paläogeothermische Gradient gegen die Alpen ab, sowohl in der Deutschen als auch in der Schweizer Vorlandmolasse (Tabelle 1).

Tabelle 1 Aktuogradient (= geothermischer Gradient heute) und Inkohlungsgradient im Nördlichen Alpenvorland (Molassebecken).
Aus RYBACH & BODMER (1980)

Bohrung	Untersuchter Tiefenbereich (m)	Aktuogradient ∇T (°C/km)	Inkohlungsgradient $\Delta R_m / \Delta z$ (% $R_m / 100$ m)
Süddeutschland			
Anzing 3	0 - 2630	22.8 **	0.009 *
Miesbach 1	0 - 5738	23.5 **	0.006 **
Schweiz			
Küsnacht 1	365 - 1885	26.8	0.008
Hünenberg 1	430 - 1580	22.7	<0.005

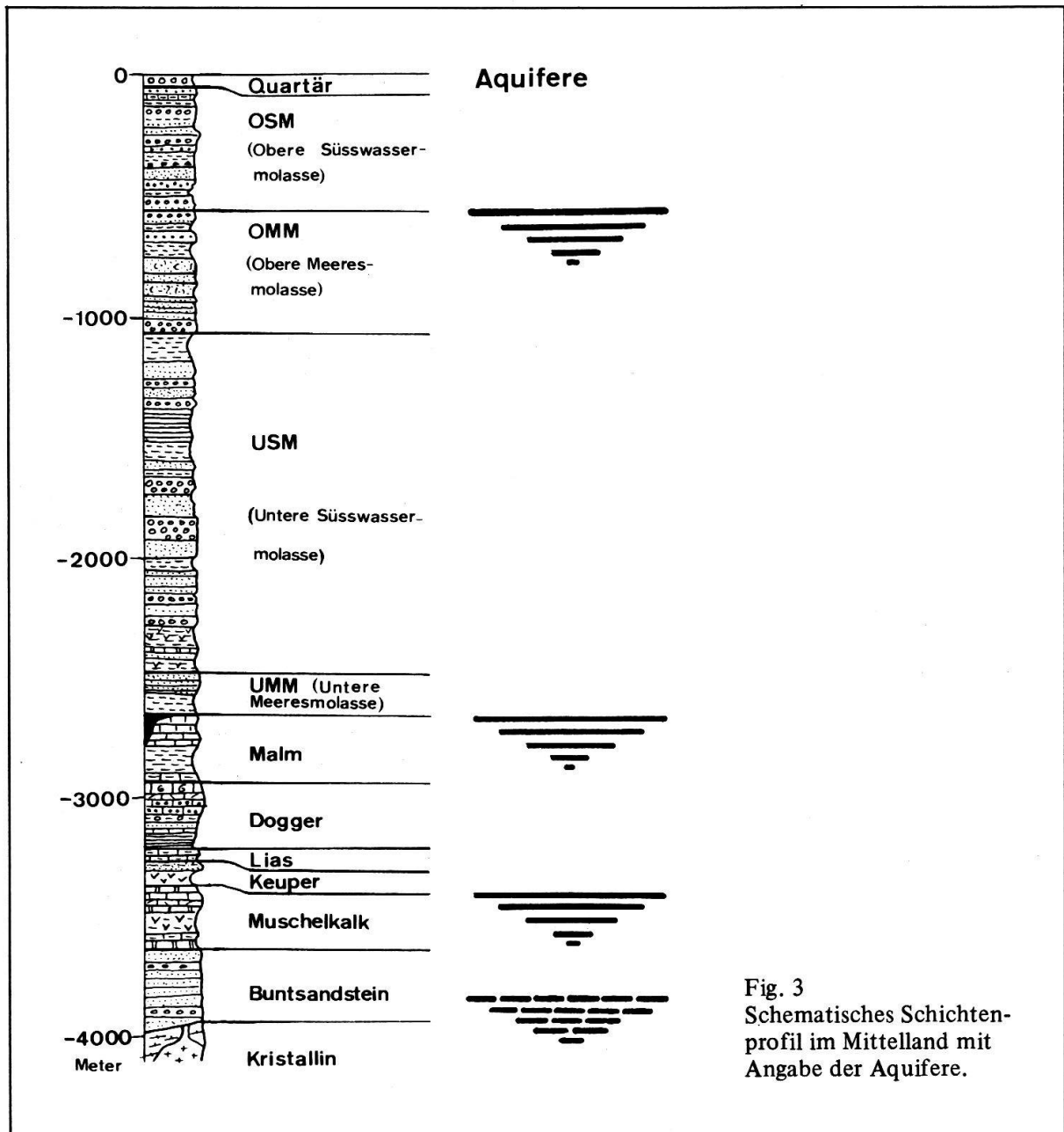
*) Daten aus TEICHMÜLLER & TEICHMÜLLER (1975)

***) Daten aus JACOB & KUCKELKORN (1977)

4.2 Nutzbare geothermische Ressourcen

Da im Molassebecken praktisch keine Thermalquellen-Systeme bekannt sind, kommen hier als geothermisch nutzbare Ressourcen in erster Linie tiefliegende Aquifere in Frage. In der tertiären Schichtfolge der Molasse sowie in deren mesozoischen und kristallinen Unterlage wurden von oben nach unten vier Formationen ermittelt, die a) eine weite Verbreitung haben und b) deren relativ grosse Wasserführung nachgewiesen oder sehr wahrscheinlich ist (schematische Darstellung siehe Fig. 3):

1. Obere Meeresmolasse (OMM; Wasserführung nachgewiesen in der Mineralwasserbohrung Brauerei Hürlimann (Zürich), BÜCHI 1975; Thermalwasserbohrung Konstanz (BRD) BÜCHI et al. 1976; Thermalwasserbohrung Tiefenbrunnen (Zürich), BÜCHI 1980 (mündl. Mittg.).
2. Verkarstetes Mesozoikum unter der Tertiärbasis (Kreide/Malm-Kalke; starke Wasserzuflüsse in den Bohrungen Füssing 1 und Gendorf 1 in der Süddeutschen Molasse, LEMCKE & TUNN 1956; artesisch gespanntes Wasser in der Bohrung Lottstetten (Nack), CARLÉ 1975; Spülungsverluste in mehreren schweizerischen Erdölbohrungen, die auf aktiven Karst hinweisen).
3. Oberer Muschelkalk (Trigonodusdolomit, Plattenkalk, Lumachellenkalk, Trochitenkalk; ausser den bekannten Thermalquellen Baden – Schinznach – Lostorf weisen die Daten verschiedener Bohrungen wie Kaiseraugst, Zurzach, Beznau, Pratteln auf starke Wasserführung hin).
4. Kristallin-Oberkante, Permokarbon (wasserführend: postherzynische Verwitterungshorizonte des Altkristallins, Muldenfüllungen bestehend aus Rotliegendem (ev. auch Buntsandstein), ferner entlang von Störungszonen wie z.B. die Thermalwasservorkommen Zurzach und Säkingen (BRD).



Neben diesen Horizonten gibt es noch weitere Aquifere, die aber entweder weniger verbreitet sind oder deren Wasserführung sehr unregelmässig ist. Es sind dies von oben nach unten u. a.:

- Sandsteine der Unteren Süßwassermolasse (USM)
- Sequan- und Kimmeridge-Kalke (mittlerer Malm)
- Hauptrogenstein (mittlerer Dogger)
- Rhätsandstein (oberer Keuper)
- Schilfsandstein (mittlerer Keuper).

Die Tiefenlage der Formationen, welche als Haupt-Aquifere in Frage kommen, ist aus Tiefbohrungen punktweise bekannt. Die Tiefen (und damit auch die Formationstemperaturen) nehmen gegen den Alpenrand hin generell zu (eine detaillierte Darstellung ist in RYBACH et al. 1980a gegeben).

5. Jura

5.1. Das Temperaturfeld

Der Isolinienverlauf des geothermischen Gradienten im Bereich des Schweizer Jura (vgl. Fig. 2) lässt zwei ausgeprägte Anomalien erkennen: a) vom Raum Basel streicht die Fortsetzung der bekannten geothermischen Anomalie des Oberrheintalgrabens unter dem Jura in NNE-SSW-Richtung, was in Einklang steht mit strukturgeologischen Befunden (PASQUIER & PERSOZ, 1977) und mit geophysikalischen Beobachtungen (MÜLLER & RYBACH, 1979); b) eine weitere Anomalie, die sich möglicherweise weiter nördlich mit dem Ostrand des Rheintalgrabens vereinigt, zieht von NW her in das bekannte Thermalquellengebiet Zurzach (38° C) – Schinznach (34° C) – Baden (47° C Austrittstemperatur).

Eine gezielte geothermische Prospektion im letztgenannten Gebiet, finanziert durch den Nationalen Energie-Forschungs-Fonds (NEFF) hat gezeigt, dass das Temperaturfeld hier eng verknüpft ist mit einem regionalen thermohydraulischen Zirkulationssystem. Dieses NEFF-Projekt Nr. 33 wurde von den Projektpartnern Institut für Geophysik ETHZ, Département de Minéralogie Université de Genève, Centre d'hydrogéologie Université de Neuchâtel, Institut d'économie et d'aménagements énergétiques EPFL und Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG Baden auf Ende 1980 abgeschlossen. Das Projektziel war, das geothermische Potential im Untersuchungsgebiet abzuschätzen und insbesondere die Art der natürlichen Thermalwasserzirkulation abzuklären. Letztere ist, da das Untersuchungsgebiet (mit mehreren Thermalquellen) im Zentrum der NAGRA-Sondierregion liegt, von grosser aktueller Bedeutung.

Bei den Projektarbeiten wurde eine ganze Reihe von Methoden erprobt, um eine integrierte geothermische Explorationsstrategie zu entwickeln: Strukturgeologie, Hydrogeologie, Oberflächengeophysik (Reflexions- und Refraktionsseismik, Gravimetrie, Geoelektrik), Bohrkampagne (inkl. Bohrlochgeophysik und Pumpversuche), Geothermik, Geochemie, thermohydraulische, mathematische Modelle (lokal und regional). Die Projektionsresultate ergaben, dass

- dank ihrer erhöhten Permeabilität der Obere Muschelkalk sowie der oberste, verwitterte und zerklüftete Teil des kristallinen Grundgebirges wasserführend sind
- die natürlichen Thermalwasseraustritte strukturell (Jura-Hauptüberschiebung) bzw. topographisch (Taleinschnitte mit Minima im hydraulischen Potential) bedingt sind und auf rund 10 m³/Minute geschätzt werden können
- das Thermalwasser i. a. aus einer Mischung von drei Komponenten besteht (Wasser aus Kristallin/Muschelkalk/Quartär)
- die feststellbaren geothermischen Anomalien mit dem regionalen Wasserzirkulationssystem in Zusammenhang stehen, wobei insbesondere steilstehende Zonen mit hoher Permeabilität wichtig sind.
- dieses System grösstenteils von Norden her gespiesen wird (das Einsickerungsgebiet liegt nach Isotopenuntersuchungen auf einer Höhe von rund 600 m ü. M., vermutlich im Schwarzwald); laterale E-W-Zuflüsse aus dem Jura sind jedoch nicht auszuschliessen
- aufgrund der maximalen Reservoirtemperaturen (60° – 80° C, aus chemischen Geothermometern berechnet) die Zirkulationstiefe des Thermalwassers etwa 1.5 – 2 km beträgt.

Fig. 4 stellt die hydrogeologischen Befunde schematisch dar. Eine ausführliche Darstellung ist im NEFF-Projekt Nr. 33 / Teilprojekt 1 (1980) zu finden.

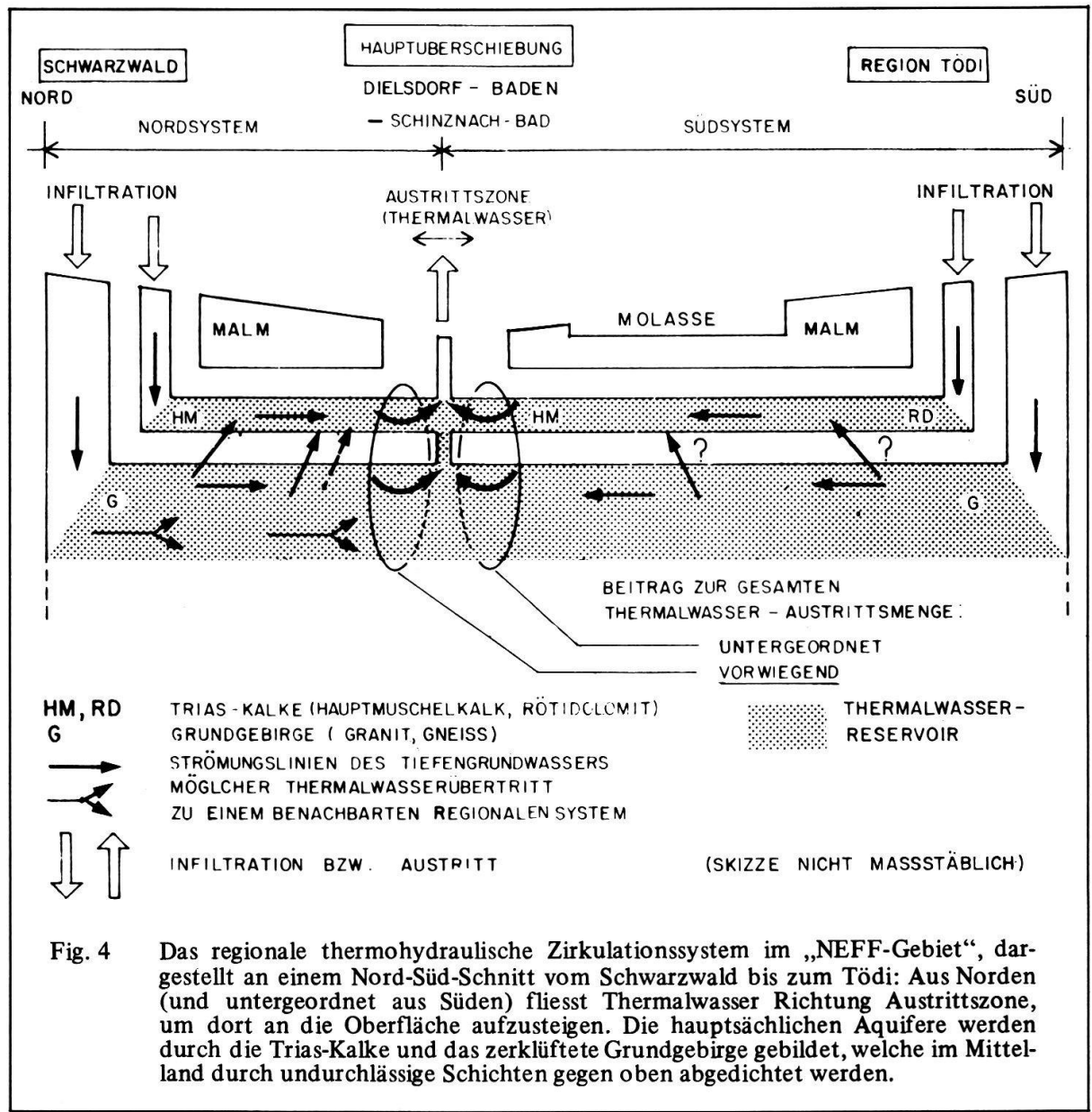


Fig. 4 Das regionale thermohydraulische Zirkulationssystem im „NEFF-Gebiet“, dargestellt an einem Nord-Süd-Schnitt vom Schwarzwald bis zum Tödi: Aus Norden (und untergeordnet aus Süden) fließt Thermalwasser Richtung Austrittszone, um dort an die Oberfläche aufzusteigen. Die hauptsächlichen Aquifere werden durch die Trias-Kalke und das zerklüftete Grundgebirge gebildet, welche im Mittel-land durch undurchlässige Schichten gegen oben abgedichtet werden.

5.2 Nutzbare geothermische Ressourcen

Vermutlich sind entlang der gesamten Länge des Jura-Südfusses, d.h. zwischen dem Thermalquellengebiet Yverdon und dem obenbeschriebenen Zirkulationssystem am Faltenjura-Ostende, weitere thermalwasserhöfliche Zonen vorhanden. Eine geothermische Prospektionskampagne (im Rahmen des NEFF-Projektes Nr. 165) hat zum Ziel, entsprechende Abklärungen durchzuführen. Auch im Tafeljura östlich Basel sowie im Raum Basel selbst (am Süden des Oberrheintalgrabens) ist ein interessantes geothermisches Potential vorhanden (RYBACH, 1981), dessen nähere Abklärung durch die Kantone Basel-Stadt und Basel-Landschaft kürzlich in Angriff genommen wurde.

Ein Beispiel für verschiedene Erschliessungsszenarios der Thermalwasser-Vorkommen

im „NEFF-Gebiet“ (Koblenz – Wildegg – Dielsdorf, schraffiert in Fig. 2) ist in Tabelle 2 gegeben (aus SCHNEIDER et al., 1981). Damit die Einwirkung auf das natürliche thermohydraulische System in einem beschränkten Rahmen bleibt, sollen gewisse Bedingungen eingehalten werden: gesamte Entnahmemenge Q nicht wesentlich grösser als die natürliche Austrittsmenge des Systems, angemessene Verteilung der Bohrungen, Fördermenge angepasst an die hydraulischen Parameter des Untergrundes (Permeabilität, Porosität). Über die mögliche Gesamtanzahl und die optimale Verteilung der Bohrungen sollten die Ergebnisse einer ersten Pilotanlage Auskünfte geben. Für eine optimale Nutzung der Warmwasserreserven innerhalb des Projektgebietes (entlang oder nördlich der Achse Schinznach – Dielsdorf) mittels Bohrungen, wäre eine Entnahmemenge des zwei- bis dreifachen der natürlichen Austrittsmenge denkbar. In diesem Fall wäre eine gesamte Fördermenge von etwa 20 - 30 m³/Minute nicht auszuschliessen. Dies entspricht unter der Annahme günstiger Voraussetzungen (Abkühlung von $\Delta T = 30^\circ\text{C}$) und für eine kombinierte Ausbeute des Muschelkalks im Bereich der Thermalwasser-Austrittszone und des Grundgebirges an der Kristallin-Oberkante einer thermischen Leistung von 60 MW. Die Dimensionierung eines solchen Entnahmesystems würde aber die vorherige Realisierung von Pilotanlagen (inkl. Beobachtung der Einwirkung des Anlagebetriebes auf das natürliche thermohydraulische System, insbesondere auf die bestehenden Thermen) voraussetzen.

Tabelle 2 Optionen zur Erschliessung von Thermalwasser im Gebiet Koblenz – Wildegg – Dielsdorf („NEFF-Gebiet“, schraffiert in Fig. 2). Aus SCHNEIDER et al. (1981).

Grundwasserleiter	Bohrtiefe [m]	Q_{total} [m ³ /min]	$Q_{Bohrung}$ [m ³ /min]	T [°C]
Muschelkalk in der Thermalwasser-Austrittszone (Mischwasser)	150- 400	etwa 10 (5-15)	0,5-1,0 (bis 2,0)	35-50
1. Option: Muschelkalk nördlich der Hauptüberschiebung	250- 400	<5-10	0,5-1,0 (bis 2,0)	20-25
2. Option: Grundgebirge (Kristallin-Oberkante)	1000-2000	<5	etwa 0,5 (bis 1,0)	etwa 75
3. Option (hypothetisch): Grundgebirge (tiefere Zone)	>2000	keine Information (wahrscheinlich <5)	etwa 0,5 (bis 1,0)	>75
Q_{total} = gesamte Entnahmemenge für das Projektgebiet $Q_{Bohrung}$ = Fördermenge pro Bohrung T = Temperatur im Grundwasserleiter				

6. Schlussfolgerungen, Ausblick

Die geothermischen Verhältnisse in der Schweiz sind vielgestaltig und widerspiegeln die mannigfaltigen Wechselwirkungen zwischen geologischen Strukturen und Tiefenzirkulation von Wasser, Krustenaufbau und terrestrischem Wärmefluss topographischem Relief und hydraulischem Potential.

Das Temperaturfeld in den Alpen, zweifellos geprägt durch das topographische Relief, ist nur lückenhaft bekannt. Im Mittelland herrschen seit der Ablagerung der Molasse-Sedimente ausgeglichene Verhältnisse vor. Das geothermische Bild des Jura ist charakterisiert durch Zonen, in welchen Thermalwasserzirkulation stattfindet.

Für eine geothermische Nutzung kommen in der Schweiz kurz- und mittelfristig Warmwasser-Zirkulationssysteme sowie warme, mehr oder weniger stationäre Tiefengrundwässer in Frage, welche insbesondere für direkte Anwendungen im Niederenthalpie-Bereich (Raumheizung, Warmwasserbereitung, Prozesswärme z.B. für Landwirtschaft) geeignet sind. Eine Potentialabschätzung ist in Tabelle 3 gegeben.

Tabelle 3 Abschätzung des geothermischen Potentials der Schweiz
(nach RYBACH et al., 1979).

Energieträger	Leistungspotential (thermisch)	Möglicher Beitrag zum Wärmeverbrauch der Schweiz (Basis 1979)	Risiko
Grundwasser (Nutzung mit Wärmepumpen)	500 MW*	0,9 %	↓ zu- nehmend ↓
Warmwasser- Zirkulationssysteme (Thermalquellen)	100 MW	0,2 %	
Warme Tiefen- grundwässer (Aquifere)			
OMM	1 200 MW	2,3 %	
Kreide/Malm	2 000 MW	3,8 %	
Muschelkalk/ Kristallin	3 000 MW	5,6 %	
[Trockene Erdwärme („hot dry rock“)]	>10 000 MW	>20 %	

*) nach JÄCKLI (1981)

Angesichts der hohen Investitionskosten bei der Nutzbarmachung der Geothermie ist ein koordiniertes Vorgehen von Bund, Kantonen und dem privaten Sektor unerlässlich. Vor jeder Nutzung müssen die lokalen geothermischen Verhältnisse im Detail abgeklärt werden. Eine wichtige Planungsgrundlage stellt dabei die „Geothermische Datensynthese der Schweiz“ (Schriftreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Studie Nr. 26, 1982) sowie Ph. BODMER (1982) dar.

Kurzfristig kann die Geothermie nur einen Bruchteil des schweizerischen Energiebedarfes decken. Langfristig eröffnet jedoch das Potential der trockenen Erdwärme („hot dry rock“, siehe z.B. RYBACH et al., 1978) interessante Perspektiven. Insbesondere hierzu sind noch umfangreiche und intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig, am zweckmässigsten im Rahmen internationaler Zusammenarbeit.

Literaturverzeichnis

- BODMER, PH., ENGLAND, P. C., KISSLING, E. & RYBACH, L. (1979): On the correction of subsurface temperature measurements for the effects of topographic relief, Part II: Application to temperature measurements in the Central Alps. In: CERMAK, V. & RYBACH, L. (Ed): „Terrestrial Heat Flow in Europe“. – Springer, Heidelberg, p. 78 - 87.
- BODMER, Ph. (1982): Beiträge zur Geothermie der Schweiz. – Diss. ETH Zürich (im Druck).
- BÜCHI, U. P. (1975): Wasser- und Energiegewinnung aus der Oberen Meeresmolasse und dem Mesozoikum. – Inst. bauwiss. Forschung 34, 1 - 16.
- BÜCHI, U. P., SCHLANKE, S. & MÜLLER, E. (1976): Zur Geologie der Thermalwasserbohrung Konstanz und ihre sedimentpetrographische Korrelation mit der Erdölbohrung Kreuzlingen. – Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 42, 25 - 34.
- CARLÉ, W. (1975): Die Mineral- und Thermalwässer von Mitteleuropa. – Wiss. Verlagsges., Stuttgart.
- CLARK, S. P. & JÄGER, E. (1969): Denudation rate in the Alps from geochronologic and heat flow data. – Am. Jour. Sci. 267, 1143 - 1160.
- HORVATH, F., BODRI, L. & OTTLIK, P. (1979): Geothermics of Hungary and the tectonophysics of the Pannonian Basin „Red Spot“. In: CERMAK, V. & RYBACH, L. (Ed): „Terrestrial Heat Flow in Europe“. – Springer, Heidelberg, p. 206 - 217.
- JACOB, H. & KUCKELKORN, (1977): Das Inkohlungsprofil der Bohrung Miesbach 1 und seine erdölgeologische Interpretation. – Erdöl-Erdgas-Z. 93, 115 - 124.
- JÄCKLI, H. (1981): L'eau souterraine comme source de chaleur pour les pompes thermiques. In: BOREL, L., MORF, J. J., SILBERRING, L. & STRAHM, CH: „Pompes à chaleur“, Annexe VI, Institut de Thermodynamique, EPF Lausanne.
- LAUER, J. P. (1976): Isothermes profondes et „effets de socle“. – Bull. Soc. géol. France 5, 1139 - 1149.
- LEMCKE, K. & TUNN, W. (1956): Tiefenwässer in der süddeutschen Molasse und in ihrer verkarsteten Unterlage. – Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 27, 9 - 14.
- MÜLLER, ST. & RYBACH, L. (1979): Ist die Westschweiz ein Teil des mitteleuropäischen Rift-systems? – 159. Jahresvers. Schweiz. natf. Ges. Lausanne.
- NEFF-Projekt Nr. 33, Teilprojekt 1 (1980): Geothermische Prospektion im Raume Koblenz – Wildeggen – Dielsdorf, Schlussbericht.
- PASQUIER, F. & PERSOZ, F. (1977): Oxydation des calcaires mésozoïques sous la plateau suisse et paleokarst. – Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 43, 21 - 28.
- RYBACH, L., BODMER, PH., PAVONI, N. & MÜLLER, ST. (1978): Siting criteria for heat extraction from Hot Dry Rock: Application to Switzerland. Pure and appl. Geophys. 116, 1211 - 1224.
- RYBACH, L., HÄNNY, J. & WERNER, W. (1979): Possibilités et limites de l'utilisation de l'énergie géothermiques en Suisse. – Rev. tech. Sulzer 4, 141 - 150.
- RYBACH, L., BÜCHI, U. P., BODMER, PH. & KRÜSI, H. R. (1980a): Die Tiefengrundwässer des schweizerischen Mittellandes aus geothermischer Sicht. – Eclogae geol. Helv. 73, 293 - 310.
- RYBACH, L., MÜLLER, ST., MILNES, A. G., ANSORGE, J., BERNOULLI, D. & FREY, M. (1980b): The Swiss Geotraverse Basel - Chiasso - a review. – Eclogae geol. Helv. 73, 437 - 462.
- RYBACH, L. & BODMER, PH. (1980): Die geothermischen Verhältnisse der Schweizer Geotraverse im Abschnitt Basel – Luzern. – Eclogae geol. Helv. 73, 501 - 512.
- RYBACH, L. & JAFFÉ, F. C. (1981): Low enthalpy geothermal energy exploration and development in Switzerland. – U. S. Geothermal Resources Council Transactions 5, 205 - 209.
- RYBACH, L. (1981): Nutzungsmöglichkeiten geothermischer Energie in der Region Basel. – Verhandl. Naturf. Ges. Basel 92, 55 - 62.
- SCHNEIDER, J. F. & BLUM, W., mit BODMER, PH., JAFFÉ, F., MATHEY, B., RYBACH, L., SAUGY, B., TRIPET, J. P., VUATAZ, F. D. & WERNER, D. (1981): Geothermisches Potential und Nutzungsmöglichkeiten im Nordostjura. – Schweiz. Ingenieur & Architekt, Heft 20.
- TEICHMÜLLER, M. & TEICHMÜLLER, R. (1975): Inkohlungsuntersuchungen in der Molasse des Alpenvorlandes. – Geologica bavar. 73, 123 - 142.