Zeitschrift: Eclogae Geologicae Helvetiae
Herausgeber: Schweizerische Geologische Gesellschaft
Band: 73 (1980)
Heft: 1

Artikel: Die Tiefengrundwässer des schweizerischen Mittellandes aus geothermischer Sicht

Autor: Rybach, Ladislaus / Büchi, Ulrich P. / Bodmer, Philippe

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-164956

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Eclogae geol. Helv.	Vol. 73/1	Seiten 293-310	8 Textfiguren und 1 Tabelle	Basel, März 1980

Die Tiefengrundwässer des schweizerischen Mittellandes aus geothermischer Sicht[1])

Von LADISLAUS RYBACH[2]), ULRICH P. BÜCHI[3]), PHILIPPE BODMER[2]) und HANS RUDOLF KRÜSI[2, 4])

ABSTRACT

Deep aquifers in the northern Foreland of the Swiss Alps are examined in view of low-enthalpy geothermal energy utilization. Four aquifers have been identified, ranging in age from lower Triassic to upper Miocene. The geothermal data, compiled from 52 drillholes (average depth 1400 m) are given in a geothermal gradient map. The gradient varies from 20 °C/km to 40 °C/km; the course of the isolines indicates an extension of the Upper Rhine Graben thermal anomaly towards southwest under the Jura and is further influenced by the topography of the crystalline basement below the Foreland sediments. Maps covering the temperature range 30 °C–150 °C have been constructed to show the formation temperatures at aquifer top, along with the estimated depth to formation top. From these data and from the available information on aquifer porosity (up to 20%), permeability (up to 100 mdarcy) and salinity it can be inferred that broad regions of the northern Foreland have considerable potential for low enthalpy geothermal energy utilization.

1. Einleitung

Im Rahmen der Erschliessungsbestrebungen von Alternativenergien sind auch *geothermische Energieträger* niedriger Enthalpie (Temperaturen <120 °C) ins Blickfeld einer weiteren Öffentlichkeit gerückt. Solche Energieträger stellen im allgmeinen die tiefliegenden Aquiferen dar, wie sie in sedimentären Formationen vorkommen. Bereits existieren einige wirtschaftlich arbeitende Anlagen zur Nutzung tiefliegender Aquiferen für Raumheizung in Frankreich (Pariser Becken, Aquitaine-Becken); auch werden in unseren Nachbarländern in mehreren Regionen Erschliessungsarbeiten vorgenommen: Strasbourg (Frankreich), Bühl (BRD), Waltersdorf (Österreich).

In der Schweiz fehlen noch entsprechende Aktivitäten, abgesehen von der Erweiterung und lokalen Nutzung der Thermalquelle Lavey VD für Heizzwecke (JAFFÉ et al. 1977a). Unser heutiger Kenntnisstand über das vorhandene geothermische Potential ist noch bescheiden; in dieser ersten, vorläufigen Studie soll auf

[1]) Mitteilung Nr. 260 aus dem Institut für Geophysik, ETH Zürich, CH-8093 Zürich.

[2]) Institut für Geophysik, ETH Zürich.

[3]) Bodenacherstrasse 79, CH-8121 Benglen.

[4]) Gegenwärtig c/o Shell Internationale Petroleum Maatschappij B.V. (SIPM), Production Geology, The Hague (Niederlande).

mögliche Warmwasservorkommen eingegangen werden. Ausgeklammert werden zunächst die Thermalquellen, welche zwar sehr interessante, jedoch meist lokal begrenzte Indikationen liefern (JAFFÉ et al. 1977b). Als mögliche nutzbare Energieträger verbleiben damit die Tiefengrundwässer, d.h. ausgedehnte Aquiferen, welche eine Mindesttemperatur aufweisen ($>35\,°C$, welche die untere Grenze für eine wirtschaftliche, mit Wärmepumpen kombinierte Nutzung darstellt; siehe STÜRZINGER & HAEFELI 1977).

Ziel dieser Arbeit ist, die geothermisch relevanten Daten der Tiefengrundwässer (Aquiferen) des schweizerischen Mittellandes zusammenzustellen und auszuwerten. Dabei soll auch auf hydrologische Bewegungen der Tiefengrundwässer eingegangen werden. Über den geothermischen Aspekt hinaus dient das dargestellte Material als Planungsgrundlage für Vorhaben wie die unterirdische Speicherung von Kohlenwasserstoffen, die Reservehaltung von Trink- und Brauchwasser usw. Im nachfolgenden soll auf die geothermischen, hydrogeologischen und formationsspezifischen Verhältnisse (Porosität, Permeabilität, Salinität) im *schweizerischen Mittelland* eingegangen werden, da einerseits die entsprechende Information aus diesem geologisch relativ einfach gebauten Teil der Schweiz noch am ehesten vorhanden ist, anderseits hier die grösste Abnehmerdichte für geothermische Energienutzung vorliegt.

2. Tiefenlage und Verbreitung von Aquiferen

Das kristalline Grundgebirge taucht im nördlichen Alpenvorland der Schweiz gegen SSE flach ab (Fig. 1). Darauf ist, zumindest in der Zentral- und Westschweiz, das Kristallin des Aar-Gastern-Massivs bzw. des Aiguilles-Rouges-Arpille-Massivs überschoben (BEB 1979; MENARD 1979). Über dem abtauchenden Kristallin folgt, und zwar auch unter den nach Norden vorgeschobenen alpinen Decken nördlich des Aarmassivs (siehe z.B. BÜCHI & SCHLANKE 1977), die autochtone Schichtfolge der mesozoisch-tertiären Sedimente. In geothermischer Hinsicht ist, neben den zu erwartenden Formationstemperaturen, die Tiefenlage und Verbreitung von Aquiferen innerhalb dieser Sedimente von massgebendem Interesse. So wurden für das Untersuchungsgebiet von oben nach unten vier Formationen ermittelt, a) welche eine weite Verbreitung haben und b) deren relativ grosse Wasserführung nachgewiesen oder sehr wahrscheinlich ist (schematische Darstellung siehe Fig. 2):

1. Obere Meeresmolasse (OMM; Wasserführung nachgewiesen in der Mineralwasserbohrung Brauerei Hürlimann [Zürich], BÜCHI 1975; Thermalwasserbohrung Konstanz [BRD], BÜCHI et al. 1976).
2. Verkarstetes Mesozoikum unter der Tertiärbasis (Kreide/Malm-Kalke; starke Wasserzuflüsse in den Bohrungen Füssing 1, Gendorf 1 in der Süddeutschen Molasse, LEMCKE & TUNN 1956; artesisches 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 der Bohrungen wie Kaiseraugst, Pratteln auf starke Wasserführung hin).

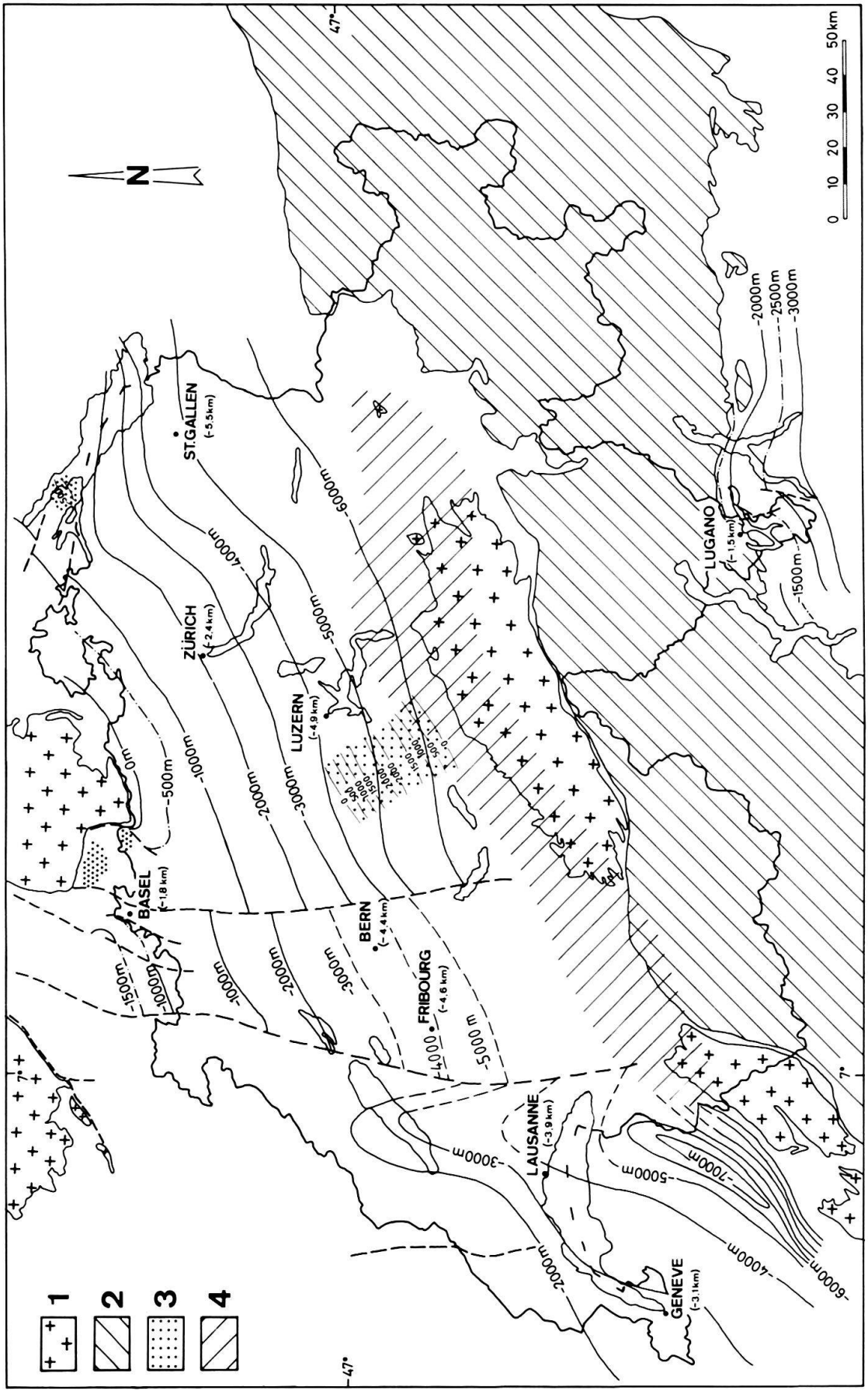

Fig. 1. Höhenlinienkarte der Kristallin-Oberfläche unter Mittelland und Jura. Isolinien in Metern ü. M., Zahlen in Klammern: Tiefe ab OK Terrain. 1 = Kristallinmassive, 2 = Gesteine mit niedriger Primärpermeabilität, 3 = Permokarbonmulden (z. T. schematisch). 4 = Überlagerungszone der überschobenen Massive auf Vorlandkristallin (vgl. Text).

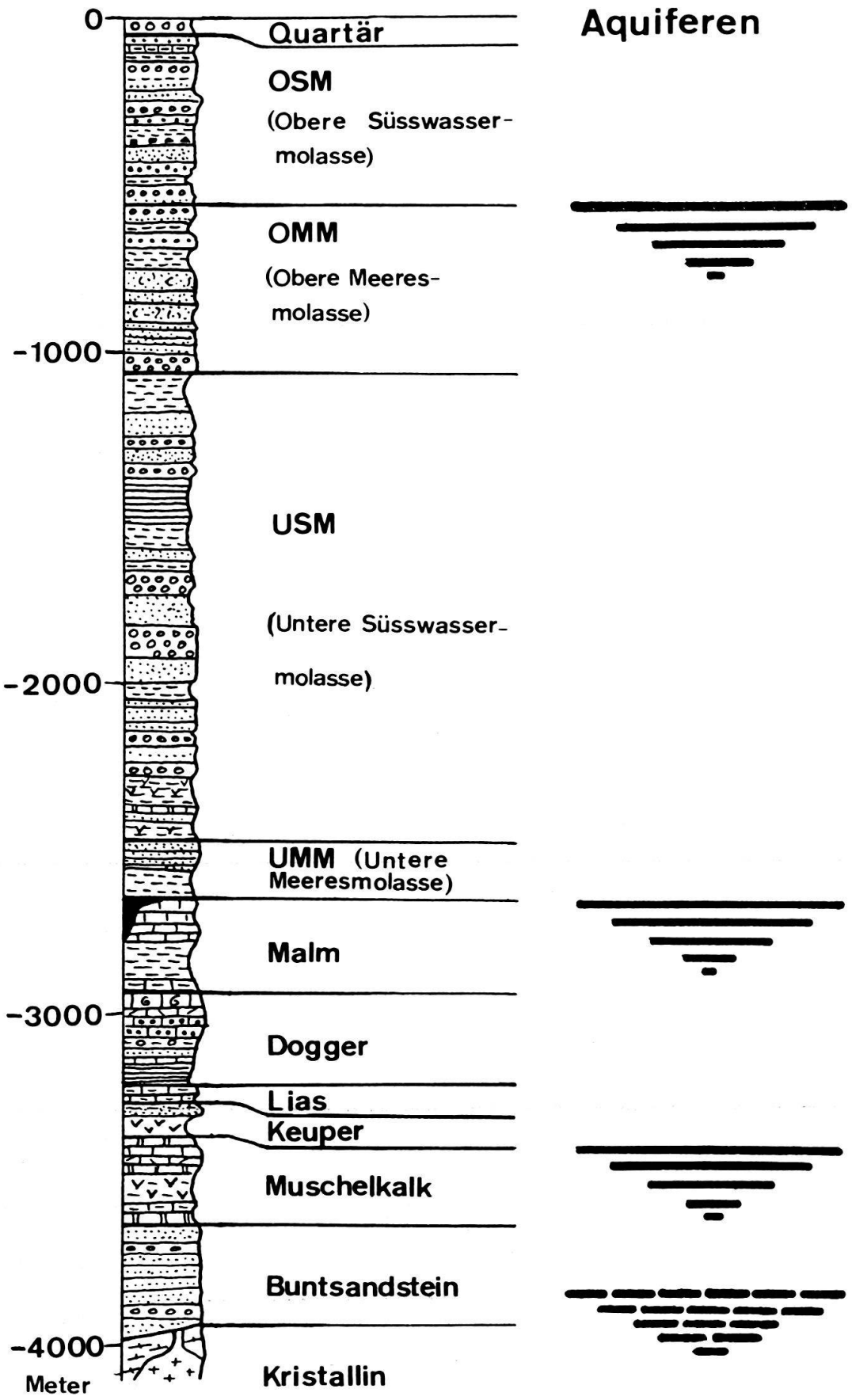

Fig. 2. Schematisches Schichtprofil im Mittelland mit Angabe der Aquiferen.

4. Kristallin-Oberkante, Permokarbon (wasserführend: postherzynische Verwitterungshorizonte des Altkristallins, Muldenfüllungen bestehend aus Rotliegendem und Buntsandstein, ferner entlang von Störungszonen wie z. B. die Thermalwasservorkommen Zurzach und Säckingen).

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

— Sandsteine der Unteren Süsswassermolasse (ZIMMERMANN et al. 1976),
— Sequan- und Kimmeridge-Kalke (mittlerer Malm),
— Hauptrogenstein (mittlerer Dogger),
— Rhätsandstein (oberer Keuper),
— Schilfsandstein (mittlerer Keuper).

Die Tiefenlage der Formationen, welche als Haupt-Aquiferen in Frage kommen, ist aus Tiefbohrungen punktweise bekannt. Die erbohrten Tiefen der Formationsoberkanten sind in der Tabelle zusammengestellt. Aufgrund dieser Daten wurde für jede Aquiferoberkante eine Isohypsenkarte gezeichnet. Generell manifestiert sich in diesen Karten das Abtauchen der Aquiferen in NNW–SSE-Richtung gegen den Alpenrand (mit Ausnahme der OMM, welche einen gegen den Bodensee breiter werdenden Trog bildet).

3. Die geothermischen Verhältnisse

Als Grundlage für die Erfassung des Temperaturfeldes dienten die Temperaturmessungen aus Tiefbohrungen (vor allem Erdöl- und Salz-Explorationsbohrungen), mit Bohrtiefen zwischen 180 und 5450 m; mittlere Bohrtiefe: 1420 m. Die Temperaturwerte wurden, falls nicht nach hinreichend langer Wartezeit gemessen, für die Effekte der Spülungszirkulation korrigiert (Methode von Lachenbruch & Brewer). Für die Datenkompilation sind schliesslich 52 Bohrungen ausgewählt worden; viele untiefe oder durch hydrologische Zirkulationseffekte gestörte Bohrungen (z. B. Pratteln, Uster, Bonfol, Schupfart, Belp, Münsingen) wurden nicht weiter verwendet.

Aufgrund der punktweise vorliegenden Temperaturdaten (Tabelle) wurden Isolinienkarten gezeichnet mit einem von Dr. E. Klingelé (Institut für Geophysik, ETH Zürich) entwickelten Interpolations-/Plotprogramm. Die Informationsdichte (Anzahl Bohrungen) ist für das Interpolationsprogramm gerade knapp genügend. Die Darstellung erfolgte in einer Reihe von Karten: Tiefe der 30 °C-Isotherme, der 60 °C-, 90 °C- und der 120 °C-Isotherme, Karte der Temperatur in 1 km Tiefe, Karte des geothermischen Gradienten (KRÜSI et al. 1978). Der Gradient wurde in den einzelnen Bohrungen durch lineare Interpolation zwischen den 30 °C- und 90 °C-Isothermen bestimmt (die wenigen Bohrungen, aus welchen kontinuierliche Temperaturlogs zur Verfügung stehen, zeigen einen durchwegs geradlinigen Temperaturverlauf). Als südliche Begrenzung des Untersuchungsgebietes wurde der Alpenrand s. l. (d. h. die Grenze zwischen subalpiner Molasse und Helvetikum bzw. Préalpes Romandes) festgehalten. Soweit zugänglich, wurden auch Daten aus dem benachbarten Ausland mitberücksichtigt.

Tabelle: *Tiefenlage der Isothermen und der Formationsoberkanten in den verwendeten Tiefbohrungen* (aus KRÜSI et al. 1978).

BOHRUNG	KOORDINATEN		END-TIEFE (M)	KOTE (M)	TIEFE DER ISOTHERMEN (KM N.N.)				TIEFE DER FORMATIONSOBERKANTEN (KM N.N.)			
	X	Y			30°	60°	90°	120°	OMM	TERTIAER-BASIS	OB.MUSCHEL-KALK	KRISTALLIN *)
ALLSCHWIL 1	607975	267305	330	276	-.25	-1.06	-1.88	-2.69		-0.020		
ALLSCHWIL 2	605200	270200	705	330	-.16	-.95	-1.75	-2.54		-0.570	-1.440	-2.220
BADENWEILER 3 BRD	617225	294325	505	425	-.10	-.89	-1.68	-2.47				
BERLINGEN 1	719685	280195	2386	593	-.06	-1.07	-2.10	-3.10	0.054	-0.880	-1.587	-1.793
BEITENHAUSEN 1 BRD	740300	286500	1500	435	-.15	-1.01	-1.89	-2.77	0.127	-1.05		
BAD BELLINGEN BRD	608433	286277	1175	225	-.11	-.67	-1.33	-1.98		-0.063	-0.875	
BAD KROZINGEN2 BRD	618960	307650	596	226	-.15	-.72	-1.28	-1.85				
BAD KROZINGEN3 BRD	618960	307710	606	225	.00	-.12	-.64	-1.15				
BAD KROZINGEN4 BRD	618780	307470	573	225	-.18	-.80	-1.41	-2.02				
BOSWIL 1	664845	237415	1836	648	-.20	-1.61	-3.02	-4.45	0.303	-1.174	-1.876	-2.101
BUIX	568920	258760	1050	395	.02	-.95	-1.92	-2.89			-0.353	-0.643
BUGGINGEN BRD	613700	300500	803	222	-.27	-1.01	-1.75	-2.49				
CHAPELLE	547306	168360	1530	764	.32	-.66	-1.64	-2.61	0.747	-0.676	-2.820	-3.316
CHAPERY	491100	78000	4200	600	-.03	-1.20	-2.36	-3.56				
COURTION 1	572335	189420	3084	599	-.00	-1.10	-2.21	-3.31		-0.724	-2.270	-2.693
DORNBIRN 1 OE	772750	260000	2820	430	.00	-.67	-1.25	-2.00				
EGLISAU 2	680800	269875	420	382	-.25	-1.33	-2.60	-3.78		0.150	-0.590	-0.750
ESSERTINES 1	539775	173490	2635	661	.39	-.44	-1.26	-2.09		0.324	-2.009	-2.287
ETTENKIRCH BRD	756100	289600	2161	471	-.03	-.87	-2.13	-3.43	0.002	-1.486		
FAUCIGNY F	516550	117950	4950	630	-.03	-1.03	-2.07	-3.10		-1.660		
FRENKENDORF	621042	262365	250	305	-.12	-.76	-1.40	-2.04			0.057	-0.100
FURTHTAL 706	674350	255890	200	420	-.11	-.92	-1.73	-2.54				
GOSSAU	735200	252200	1500	625	.03	-.86	-1.75	-2.65				
GUBRIST	677310	252775	180	585	.00	-.75	-1.50	-2.25				
HARTHEIM BRD	614200	310190	1083	204	-.34	-1.17	-1.99	-2.81				
HEITERSHEIM 1 BRD	613870	303370	1375	216	-.36	-1.21	-2.07	-2.93				
HUNENBERG	675522	224593	3300	461	-.32	-1.64	-2.96	-4.27	0.089	-2.798	-3.376	-3.565
KAISERAUGST	622500	265100	300	300	-.30	-1.50	-2.70	-3.70			0.250	-0.020
KLINGNAU	661463	271500	340	442	-.06	-.86	-1.67	-2.47			0.232	-0.050
KREUZLINGEN 1	729201	276169	2550	538	.14	-.80	-1.76	-2.68	0.001	-1.211	-1.877	-1.995
KUSNACHT	689296	241485	2695	642	.02	-1.10	-2.22	-3.33	0.097	-1.980	-2.538	-2.858
LINDAU	692815	255098	2377	516	-.09	-1.32	-2.55	-3.78	0.151	-1.150	-1.709	-1.849
LINDEN	617750	188567	5484	886	-.06	-1.19	-2.32	-3.44		-3.450		
LOSTORF	637600	249300	580	549	-.10	-1.24	-2.45	-3.55			-0.670	-0.840
MARTEL DERNIER	543730	203610	300	1025	.05	-1.01	-2.07	-3.12				
OWINGEN BRD	730600	292750	1622	523	.19	-.68	-1.56	-2.46		-0.090	-0.930	-1.082

Als Beispiel für diese Karten ist in Figur 3 die Gradientenkarte wiedergegeben (Genauigkeit rund ±5 °C/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:

Tabelle: *Fortsetzung.*

BOHRUNG	KOORDINATEN		END-TIEFE	KOTE	TIEFE DER ISOTHERMEN (KM N.N.)				TIEFE DER FORMATIONSOBERKANTEN (KM N.N.)			
	X	Y	(M)	(M)	30°	60°	90°	120°	OMM	TERTIAER-BASIS	OB.MUSCHEL-KALK	KRISTALLIN *)
PFAFFNAU 1	632700	231789	1834	500	-.14	-1.10	-2.05	-3.01		-0.191	-1.046	-1.324
PFULLENDORF BRD	735700	310000	1345	654	.23	-.40	-1.03	-1.65	0.634	0.224	-0.535	-0.666
ROMANENS	564188	167438	4022	945	.41	-.54	-1.50	-2.45		-1.912		
RUPPOLDSRIED	599450	215600	996	483	-.03	-.83	-1.64	-2.44		-0.406		
SAVIGNY	546271	155312	2486	839	.29	-.81	-1.90	-2.99		-1.482		-3.089
SINGEN BRD	706600	288800	685	435	-.16	-1.37	-2.57	-3.80		0.059	-1.515	-2.165
STAFFELFELDEN4 F	585360	297680	1918	256	-.19	-.86	-1.52	-2.19				
SALEVE F	495500	99300	813	650	-.10	-1.35	-2.59	-3.85		-1.052		
SORENS	571900	168600	3165	1019	.03	-.74	-1.51	-2.28		-2.146		
TREYCOVAGNES	536136	180273	3220	474	.13	-.77	-1.73	-2.66		0.473		
TSCHUGG	572610	207910	704	463	-.08	-.90	-1.77	-2.53		-0.046		
TUGGEN	714750	228760	1300	408	-.19	-1.08	-2.24	-3.26				
WEINSTETTEN 1 BRD	611980	306320	2200	207	-.51	-1.58	-2.65	-3.72				
ZIENKEN 1 BRD	611220	299380	1700	223	-.32	-1.13	-1.94	-2.75				
ZIENKEN 2 BRD	609580	301150	750	210	-.28	-1.02	-1.75	-2.49				
ZURZACH	663973	271224	430	340	.15	-.61	-1.36	-2.10				-0.078

*) IN DEN MEISTEN FAELLEN DURCH EXTRAPOLATION BESTIMMT, DETAILS S. RYBACH ET AL. 1978.

Querprofil: Von Norden her wird es gegen den Alpenkörper hin zunehmend kälter im Untergrund. Dies hängt offenbar mit der zunehmenden Tiefe des kristallinen Basement zusammen. Ähnliche Befunde gibt es auch andernorts (LAUER 1976; HORVÁTH et al. 1979).

Längsprofil: Zwischen wärmerem West- und Ostteil (Genfersee- bzw. Bodenseegebiet) liegt eine kältere Zentralzone. Die positive Anomalie im St. Galler Rheintal rührt weitgehend vom erhöhten Gradientwert der Tiefbohrung Dornbirn. Über die genaue Ausdehnung der Anomalie ist noch nichts bekannt.

«Rheingraben-Effekt»: Auffallend ist die Fortsetzung der bekannten thermischen Anomalie des Oberrheintalgrabens unter dem schweizerischen Jura in NNE-SSW-Richtung, die im Einklang steht mit strukturgeologischen Beobachtungen (PASQUIER & PERSOZ 1977). Zudem kann eine Anomalie, welche in das Thermalwassergebiet Baden-Zurzach hineinzieht, festgestellt werden. Möglicherweise vereinigt sie sich weiter nördlich mit dem Ostrand des Rheintalgrabens.

Gesamthaft deckt sich dieses thermische Bild - welches einen ersten Entwurf darstellt - mit der Verteilung der Seismizität (PAVONI 1977), welche im zentralen Teil des Mittellandes eine seismisch ruhige Zone erkennen lässt. Auf den Zusammenhang Geothermik-Seismizität wurde schon mehrfach hingewiesen (siehe z.B. STEGENA 1976; JAFFÉ et al. 1977b) sowie auch auf die im Gebiet der Alpen nach unten gebogenen Isothermen (RYBACH et al. 1977). Besonders wenn Störungszonen mit guter Durchlässigkeit steil abtauchen, können die geothermischen Verhältnisse durch darin auftretende Wasserzirkulation stark beeinflusst werden (vgl. S. 305 und Fig. 8).

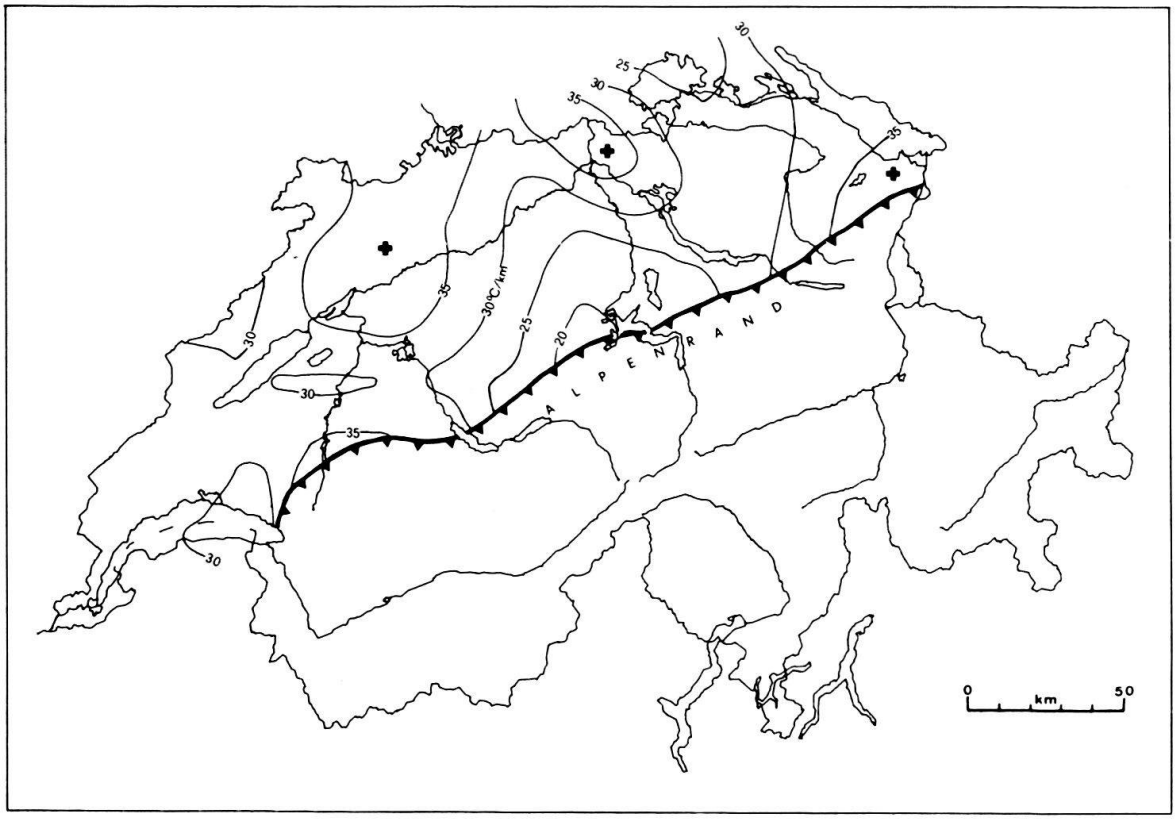

Fig. 3. Karte des geothermischen Gradienten (Werte in °C/km; für Erläuterung und Interpretation siehe Text).

4. Die Formationstemperaturen

Die Temperatur einer bestimmten Formation ist abhängig vom Temperaturverlauf mit der Tiefe (Temperaturfeld) und von der Tiefenlage dieser Schicht. Die Formationstemperaturkarte kann durch einfaches Schneiden der Isohypsenkarte der Schicht mit den verschiedenen Isothermenkarten (30 °C-, 60 °C-, 90 °C- und 120 °C-Karte) konstruiert werden; man erhält so Linien gleicher Formationstemperatur. Da die Formationen im untersuchten Gebiet (d.h. vom Jura bis zum Alpenrand) generell von Nordwesten nach Südosten abtauchen, ist zu erwarten, dass die Formationstemperatur eines bestimmten Aquifers ebenfalls in dieser Richtung zunimmt bzw. die Isolinien mehr oder weniger parallel zum Alpenrand verlaufen (Fig. 4–7). Ebendies ist denn auch das Hauptmerkmal aller Formationskarten. Es ist wichtig, zu beachten, dass sich die auf den Karten angegebenen Temperaturen immer auf die Oberkante (OK) der jeweiligen Formationen beziehen und somit Minimalwerte der zu erwartenden Temperaturen darstellen.

Als zusätzliche Information wurde auf den Karten (Fig. 4–7) an der Gitterpunkten eines Netzes mit 25 km Maschenweite die minimale *Bohrtiefe* in Kilometern angegeben, welche erwartet werden kann, um die betreffende Schicht anzubohren. Die Werte wurden den OK-Isohypsenkarten entnommen. Es ist aber zu betonen, dass diese Angaben nur Richtwerte darstellen, da ja die Kote innerhalb weniger hundert Meter stark variieren kann.

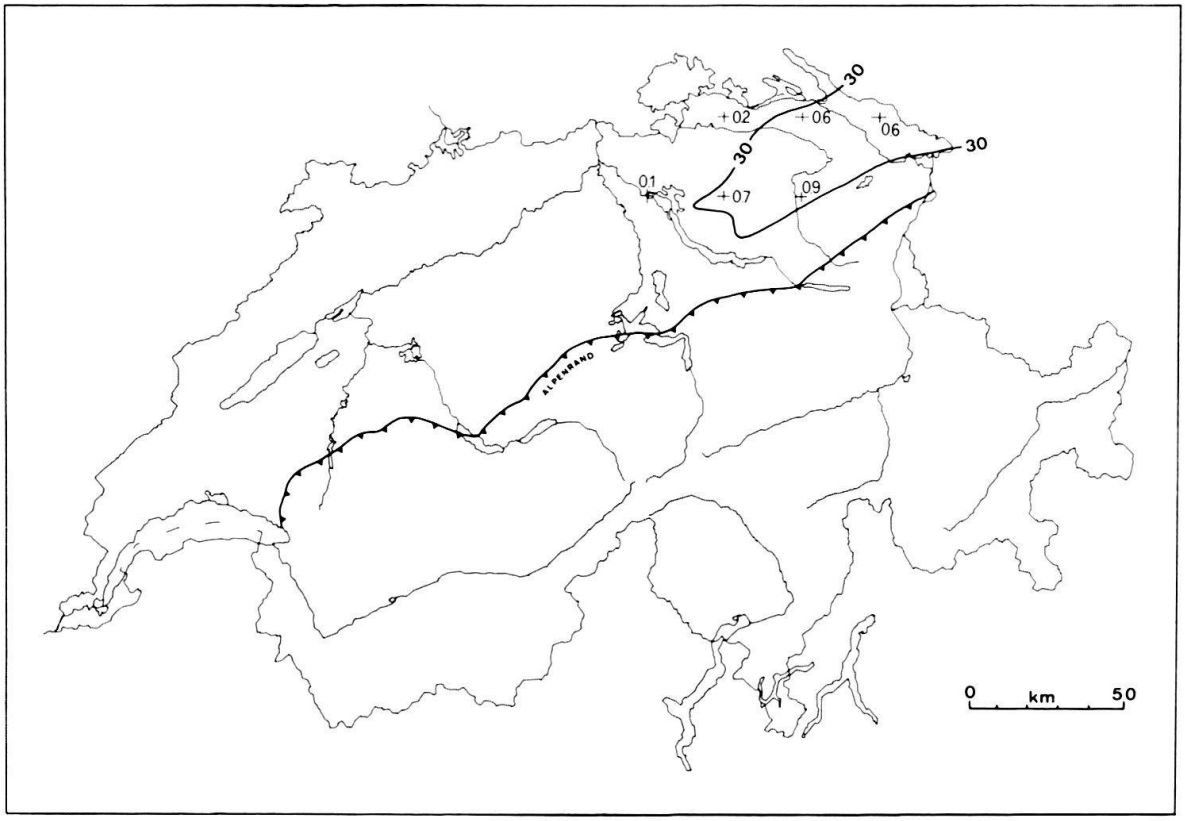

Fig. 4. Formationstemperatur OK Obere Meeresmolasse (Zahlen auf Netzpunkten: Bohrtiefe in km).

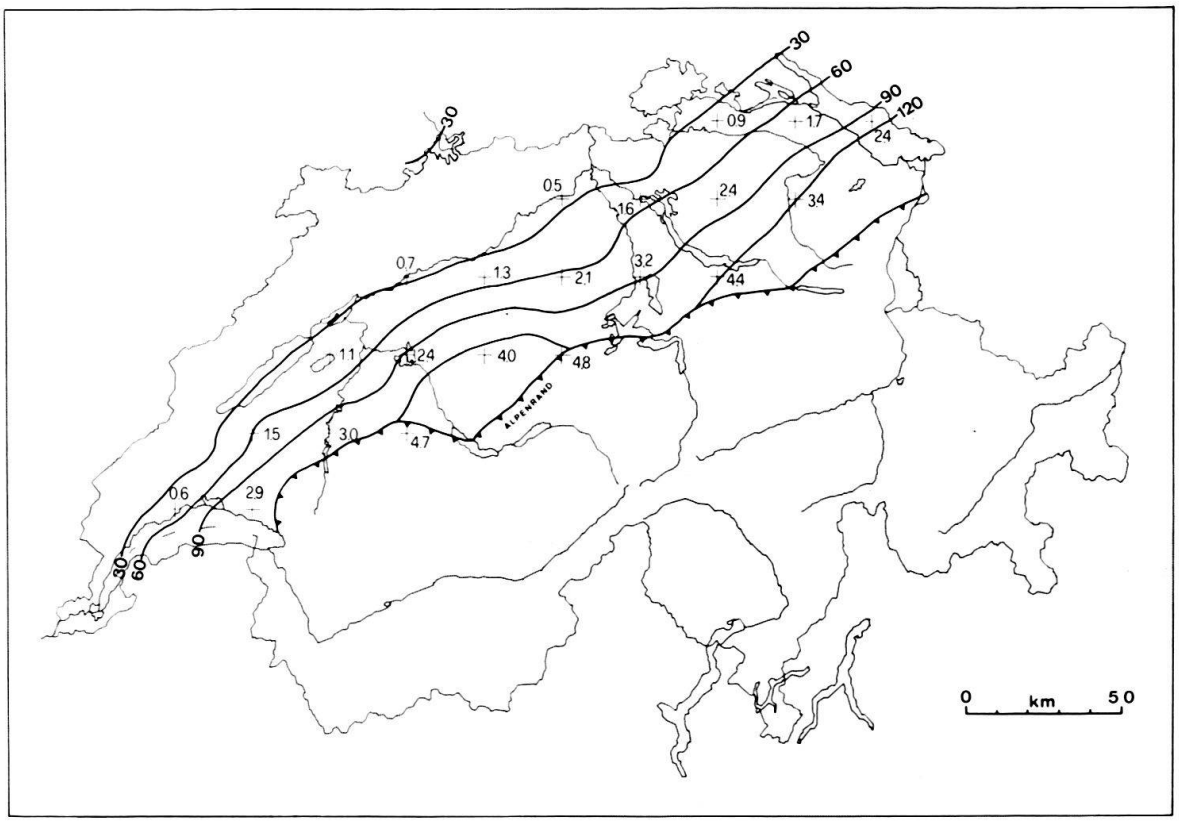

Fig. 5. Formationstemperatur OK Mesozoikum (Zahlen auf Netzpunkten: Bohrtiefe in km).

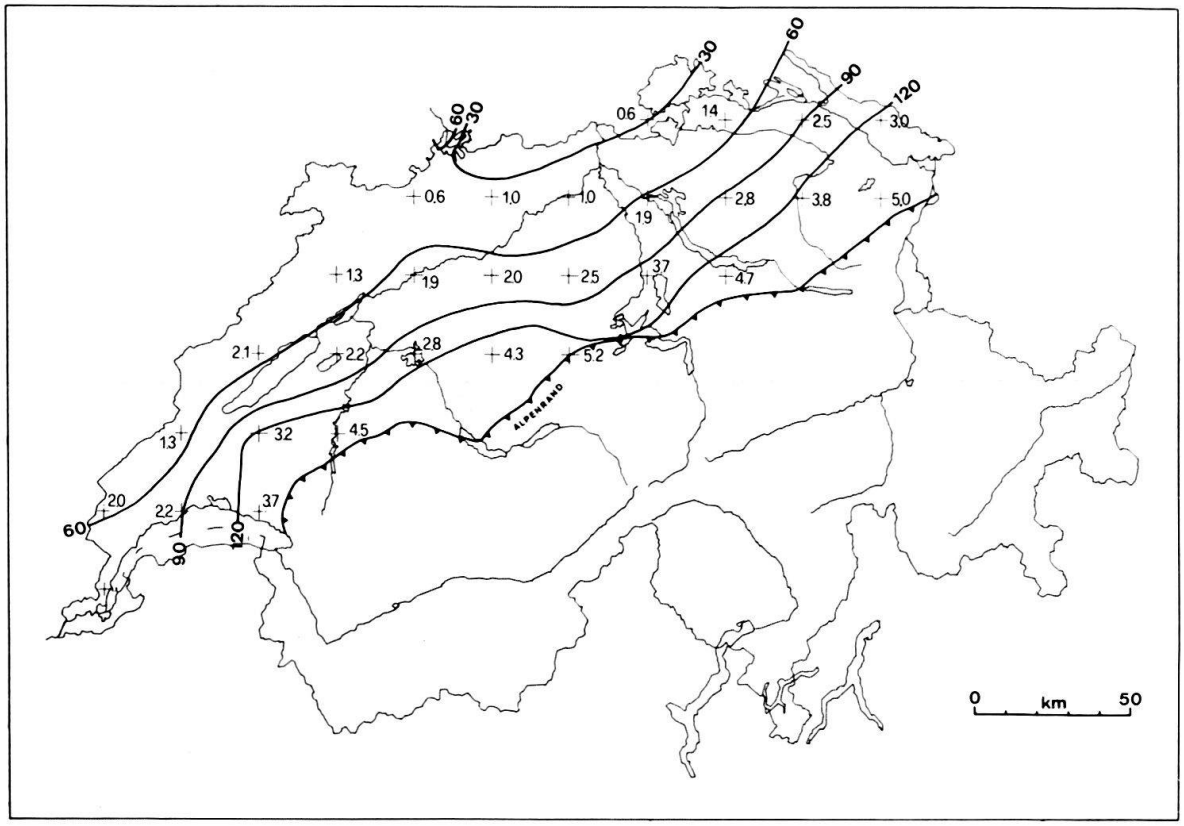

Fig. 6. Formationstemperatur OK Muschelkalk (Zahlen auf Netzpunkten: Bohrtiefe in km).

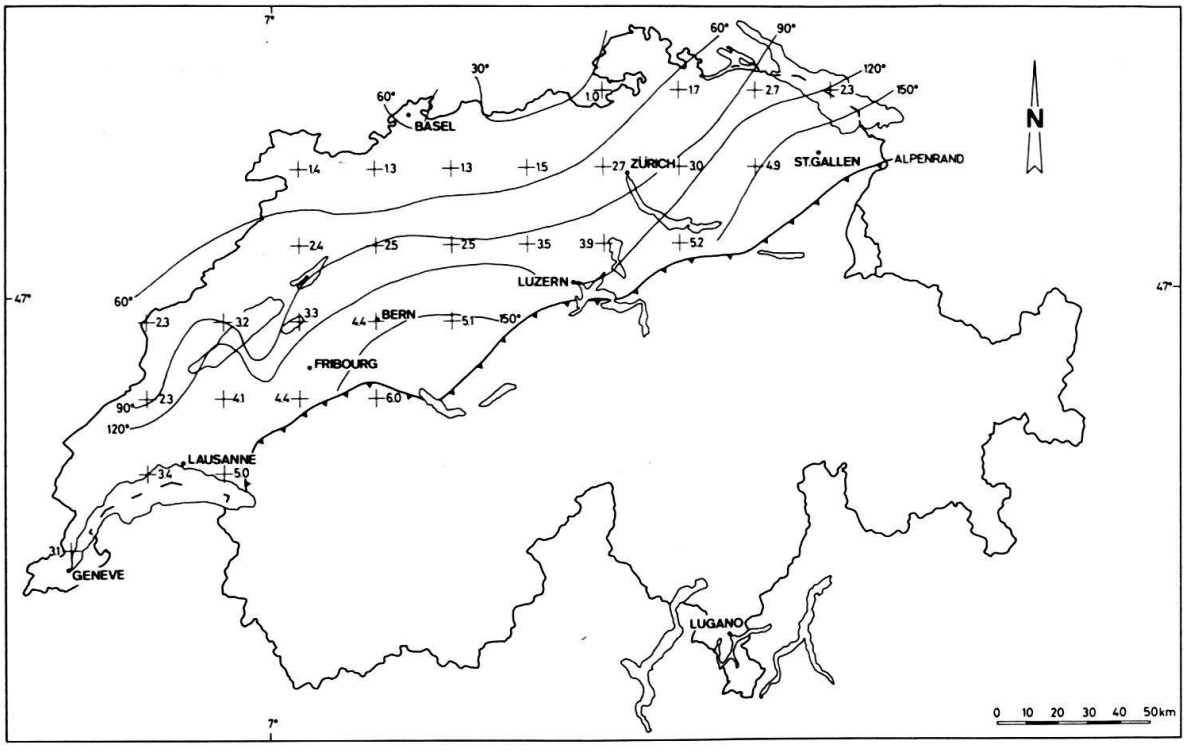

Fig. 7. Formationstemperatur OK Kristallin (Zahlen auf Netzpunkten: Bohrtiefe in km).

4.1 *Formationstemperaturkarte Oberkante Obere Meeresmolasse (OMM)* (Fig. 4)

Westlich der Linie Zug–Baden findet man die OMM an der Oberfläche anstehend oder oberflächennah. Sie taucht gegen Nordosten ab und erreicht am Bodensee Tiefen von bis über 900 m unter der Oberfläche. Temperaturen über 50 °C sind an der OK nicht zu erwarten. In der Bohrung Kreuzlingen findet man die OMM zwischen 540 und 740 m Tiefe mit einer Temperatur von 35 °C bis 42 °C.

4.2 *Formationstemperaturkarte Oberkante Mesozoikum* (Fig. 5)

Die Isolinien verlaufen mehr oder weniger parallel zum Alpenrand. Eine Formationstemperatur von 30 °C ist in einer Bohrtiefe von 350 bis 700 m (Essertines 340 m, Singen 380 m, Tschugg 500 m und Pfaffnau <700 m), von 60 °C zwischen 1400 und 1800 m (Courtion 1400 m, Chapelle 1450 m, Berlingen 1500 m, Lindau 1670 m, Boswil 1830 m), von 90 °C zwischen 2400 und 3300 m (Hünenberg 3250 m) und von 120 °C ab 3400 m zu erwarten.

Im Raume Basel wurden bereits im Tertiär Temperaturen über 30 °C in einer Bohrtiefe von 705 m gemessen (Bohrung Allschwil II), dies sicherlich wegen der hier durchziehenden Verwerfungen des Rheingraben-Ostrandes.

4.3 *Formationstemperaturkarte Oberkante oberer Muschelkalk* (Fig. 6)

Auch hier finden wir, wieder mit Ausnahme der Region Basel, ein einfaches und einheitliches Bild vor, dessen Hauptmerkmal das zum Alpenrand parallele Streichen ist.

Als Richtwerte gelten für die 30 °C-Isolinie Bohrtiefen um 600 m, für die 60 °C-Linie 1500 m (Pfaffnau 1550 m), für 90 °C Bohrtiefen zwischen 2200 und 3000 m (Kreuzlingen 2410 m, Courtion 2800 m, Küsnacht 3000 m) und für die 120 °C-Isolinie mindestens 3000 m (Chapelle 3300 m).

In der Bohrung Bellingen 3 wurden an der OK Muschelkalk 69,4 °C registriert (Bohrtiefe 1100 m). Die Temperatur von 80 °C wird in der Bohrung Allschwil II in 1770 m Tiefe erreicht (Extrapolation).

4.4 *Formationstemperaturkarte Oberkante Kristallin* (Fig. 7)

Bei Basel finden wir teilweise Formationstemperaturen von weit über 60 °C vor (Allschwil II etwa 100 °C, Bellingen rund 80 °C).

Allgemeine Richtwerte der zu erwartenden Bohrtiefen sind:

für 30 °C: 300– 500 m (Klingnau 500 m, Zurzach 300 m)
für 60 °C: 1100–1800 m (Pfaffnau 1800 m)
für 90 °C: 2000–3000 m
für 120 °C: ab 3500 m
für 150 °C: ab ca. 5000 m

5. Die hydrogeologischen Verhältnisse

Zu untersuchen ist noch der mögliche Einfluss von unterirdischen Wasserbewegungen auf das geothermische Regime, d.h. auf die Temperaturverteilung im

Untergrund. Hier kommen in erster Linie Infiltrationsbewegungen (Niederschlagwasser von der Oberfläche; Infiltration vom Vorfluten her) sowie Drainagebewegungen (zum Vorfluter) in Frage. Zusätzliche Effekte, bedingt durch Konvektionserscheinungen, können nicht ausgeschlossen werden.

Im folgenden sollen für die in engerer Betrachtung stehenden Aquiferen OMM, Tertiärbasis, oberer Muschelkalk und Kristallin-Oberfläche *vereinfachte* hydrogeologische Modelle dargestellt werden, um damit mögliche Einflüsse auf das thermische Bild abschätzen zu können.

Obere Meeresmolasse (OMM): Eine hydraulische Verbindung zwischen Speichergesteinen und der Obefläche ist am Trograd durch das Abtauchen der OMM-Schichten gewährleistet, wobei die Infiltrationsgeschwindigkeit einige m/Tag überschreitet (STÜRZINGER & HAEFELI 1977). Die Wasserbewegung in diesem Aquifer ist zudem noch durch eine langfristige *Abwärtsbewegung* des Formationswassers gekennzeichnet: Heute findet man die salzhaltigen, ursprünglich in der OMM beheimateten Formationswässer einige hundert Meter tiefer in der Unteren Süsswassermolasse (LEMCKE et al. 1968). Die Wasserbewegung führt dann in der Tertiärbasis zum Vorfluter; die Geschwindigkeit dieser Wasserbewegung liegt in der Grössenordnung von 10 mm/Jahr.

Oberkante Mesozoikum: Die Testresultate der Erdölbohrungen bestätigen, dass ähnlich wie in Süddeutschland der hydrostatische Druck in den verkarsteten Schichten der Tertiärbasis (Malmkalke in der Ostschweiz, Unterkreide bis Urgonien in der Westschweiz, vgl. Abb. 1 in BÜCHI & SCHLANKE 1977) sich im Laufe der letzten 100000 Jahre auf die Vorfluter am Nordrand des Beckens (= Jurasüdfuss) eingespielt hat:

- in der Ostschweiz auf den Rhein unterhalb Schaffhausen,
- im Gebiet westlich der Limmat auf die Aare bzw. ihre Nebenflüsse,
- in der Westschweiz auf den Neuenburger- bzw. Genfersee.

Damit ist eine aktive Entwässerung zum Vorfluter hin erwiesen. Infiltration in grösserem Ausmass vom Vorfluter her (und somit eine mögliche Auskühlung relativ zur darüberliegenden Molasseformation) ist selbst am nördlichsten Beckenrand unwahrscheinlich.

Oberer Muschelkalk: Das hydrogeologische System kann wie folgt skizziert werden, je nach der Höhenlage der Ausbisse der betreffenden Schichten am nördlichen Beckenrand: Das Formationswasser wandert im Muschelkalk zum Ausbiss, wenn dieser tiefer liegt als der nächste freie Malmwasserspiegel im Vorfluter. Liegt er höher, so dringt das Formationswasser von unten her in den Malm ein und wandert im Malm schichtparallel zum Vorfluter (LEMCKE 1977).

Kristallin: Es gibt praktisch keine verlässlichen Daten über das mögliche hydrogeologische System im kristallinen Grundgebirge. Bestimmt werden hier Klüfte (mehr oder weniger steilstehend) die Wasserbewegungen kontrollieren. Ein hydrogeologisches Modell, insbesondere für die Thermalquellen Zurzach, Baden und Schinznach, wurde von der Motor Columbus Ingenieurunternehmung AG (1977) vorgeschlagen, wonach das Thermalwasser seinen Ursprung im Gebiet des Schwarzwaldes hat und südwärts wandernd in grössere Tiefen gelangt. WERNER

(1975) hat ein hydrogeologisches Modell für das Rheintal aufgestellt, um den Einfluss aus grossen Tiefen aufsteigender Wässer abzuschätzen. Das Modell hat vermutlich auch hier seine Gültigkeit.

Für die Erfassung der thermischen Effekte, welche von Formationswasser-Bewegungen herrühren können, wurde ein einfaches *hydrogeothermisches Modell* angewendet, welches auf der Wärmebilanz zwischen dem - vertikalen - Erdwärmefluss und der durch die Wasserbewegung transportierten Wärme beruht (BULLARD & NIBLETT 1951; LEWIS & BECK 1977). Dabei wird angenommen, dass sich der stationäre Zustand eingespielt hat (dies ist in den zur Diskussion stehenden Systemen nach rund 10000 Jahren der Fall, siehe hierüber WERNER 1975). Massgebend sind für das Ausmass des thermischen Effektes die Strömungsgeschwindigkeit und die Neigung der Wasserwege (kein Effekt bei horizontaler Wasserbewegung, maximaler Effekt bei vertikaler Bewegung).

Figur 8 zeigt dieses einfache, zweidimensionale Modell; bei abwärtsgerichteter Wasserbewegung ist der Wärmefluss Q' oberhalb des Aquifers niedriger als darunter, wie auch der geothermische Gradient G' (G_0 = ungestörter Gradient unterhalb des Aquifers). Die Gradienten-Anomalie ist $\Delta G = \pm (V c G_0 / K) \sin\varphi$, je nachdem ob der Neigungswinkel φ der Wasserbewegung positiv oder negativ ist. V ist die Fliessgeschwindigkeit der Wasserbewegung (z. B. in m^2/sec, was numerisch äquivalent ist mit der Durchflussrate in m^3/sec pro m Länge), c die Wärmekapazität von Wasser (4,2 kJ/m^3, °K) und K die Wärmeleitfähigkeit der Gesteine (im vorliegenden Fall im Mittel 2,1 W/m, °K).

Es soll nun abgeschätzt werden, wie gross die Fliessgeschwindigkeit *schichtparalleler Wasserbewegung* (welche charakteristisch ist für die oben beschriebenen hydrogeologischen Systeme des betrachteten Aquifers) sein muss, um eine Gradien-

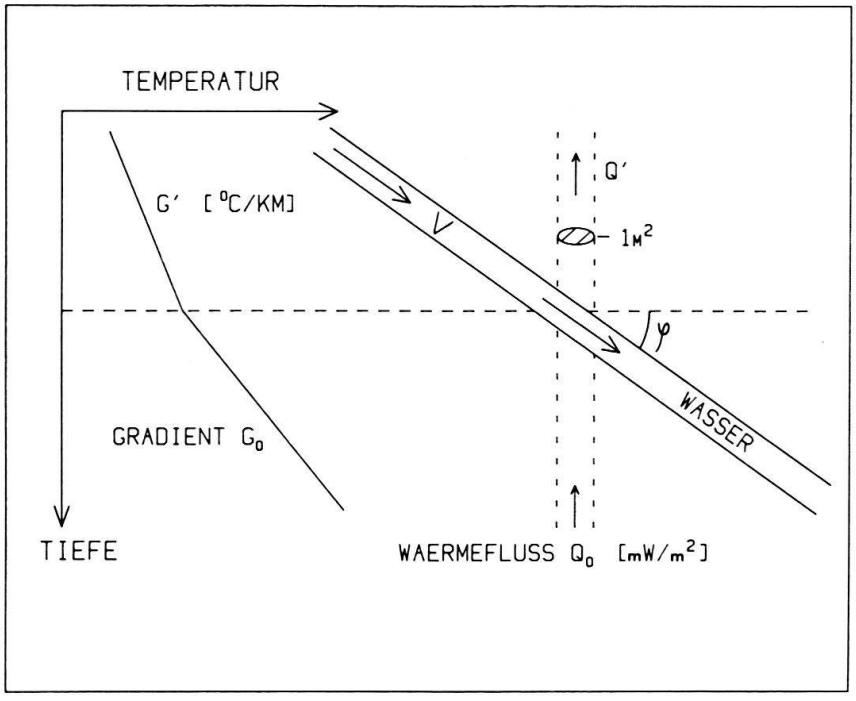

Fig. 8. Hydrothermisches Modell (Details siehe Text).

ten-Anomalie von $\Delta G = 10\,°C/km$ hervorzurufen. Die Berechnung ergibt mit den oben angeführten numerischen Werten sowie mit $G_0 = 35\,°C/km$ für einen Neigungswinkel $\varphi = 7°$ (ein Mittelwert für das Ansteigen der Aquiferen gegen den nördlichen Beckenrand) eine Mindestfliessrate von $V = 101\ m^2/Tag$. Da es keine hydrogeologischen Hinweise auf so hohe Fliessgeschwindigkeiten der schichtparallelen Wasserbewegung gibt, kann man allgemein den Schluss ziehen, dass die Bewegungen des Formationswassers in den betrachteten Aquiferen keine nennenswerten geothermischen Anomalien grösseren Ausmasses im Gebiet des schweizerischen Mittellandes hervorrufen.

6. Formationsspezifische Verhältnisse, Nutzungsmöglichkeiten von warmem und heissem Wasser

Aus den bisher abgeteuften schweizerischen Tiefbohrungen ist man im Gebiet des Mittellandes über den Schichtaufbau, die Verbreitung potentieller Aquiferspeicher sowie deren Porositäten und Permeabilitäten einigermassen im Bilde. Auch liegt Information vor über den Chemismus des Formationswassers; die Salinität von Warmwasser ist bei der geothermischen Energienutzung eine kritische Grösse (siehe z. B. WAHL 1977), ebenso bei der Nutzung als Trink- oder Brauchwasser. Für die Gewinnung von warmem und heissem Wasser sind die folgenden Formationen von Interesse:

6.1 *Obere Meeresmolasse (OMM)*

Die OMM kommt für die Gewinnung geothermischer Energie nur östlich der Reuss in Frage, da sie gegen Westen als weit gespannte Mulde an die Oberfläche ausstreicht. Durch die Mineralwasserbohrung der Brauerei Hürlimann in Zürich und die Thermalwasserbohrung in Konstanz ist die OMM als nutzbarer Grundwasserträger ausgewiesen. Die grösste Versenkungstiefe der Meeresmolasse liegt ungefähr auf der Linie Wil-Romanshorn; hier sind Wassertemperaturen bis zu 40 °C zu erwarten. Aufgrund der bisherigen Erfahrung ist das Wasser im Nordteil des Beckens nur schwach mineralisiert. Eine wesentlich stärkere Mineralisierung ist im Bereich der Muldenachse nicht auszuschliessen.

Für die Gewinnung von geothermischer Energie dürfte vor allem die Zone nördlich der Muldenachse interessieren, da hier mit Porositäten über 20% und Permeabilitäten bis zu einigen hundert mdarcy gerechnet werden kann.

6.2 *Untere Süsswassermolasse (USM)*

Verschiedene Öltests haben den Nachweis von Wasserführung in Sandsteinen der USM erbracht. Die Porositäten schwanken sehr stark, wobei im Nordteil des Mittellandes Werte zwischen 15 und 20% noch recht häufig sind. Die Maximalpermeabilitäten können wie in der OMM einige hundert mdarcy betragen. Es ist jedoch bekannt, dass die USM-Sandsteine als Flussbettausfüllungen vorliegen, so dass die Träger- und Speichereigenschaften über kurze Distanz sehr stark schwanken. Auch die Mineralisierung des Wassers ist sehr unterschiedlich und schwankt von praktisch süssem Wasser bis zu Brackwasser.

6.3 *Kreide und Malm*

Bei der *Kreide*, die lediglich westlich einer Linie Biel-Fribourg noch erhalten ist, interessieren als Wasserspeicher die Urgonkalke und die Kalke des Hauterivien und Valanginien (Pierre jaune de Neuchâtel). Die Urgonkalke besitzen häufig eine gute Primärporosität, die bei den stratigraphisch tieferen Kalken praktisch fehlt. Die Primärpermeabilitäten dürften bei beiden Formationen recht niedrig sein. Als Wasserlieferanten kommen die Kreidekalke nur bei Vorliegen von Kluft- bzw. Karstporosität bzw. Permeabilität in Frage. Von grossem Interesse sind die Kalke des oberen Malms, die wohl auch weitgehend dicht sind, jedoch häufiger sekundäre Porositäten und Permeabilitäten aufweisen. Kreide und Malm wurden bekanntlich während einer Festlandphase tiefgründig verkarstet; die dabei entstandenen Hohlräume wurden aber weitgehend durch die eozänen Bolusbildungen wieder versiegelt.

Die hydrogeologischen Verhältnisse (vgl. S. 304) sprechen für eine aktive Entwässerung des *Malms* zu den Vorflutern am nördlichen Beckenrand, die über ein Karstsystem erfolgen muss. Diese Tatsache wie auch die Spülungsverluste in den Erdölbohrungen weisen den Malm und die Kalke der Kreide als potentielle Speicher aus. Das im Malm im Nordteil des Beckens auftretende Wasser ist meistens nur schwach mineralisiert. Im Bereich von tektonischen Hochlagen sind Kohlenwasserstoff-Akkumulationen möglich. Die geothermische Exploration des Malms und der Kreide ist in Gebieten starker Fissuration am aussichtsreichsten, denn nur diese gewährleisten einen starken Wasserzufluss. Bohrungen sollten deshalb erst nach sorgfältigen geophysikalischen Vorbereitungen angesetzt werden.

6.4 *Dogger, Lias, Trias (exkl. Basissandstein)*

Die meisten mesozoischen Speichergesteine unterhalb des Malms sind in der Regel geringmächtig und nur mässig bis schlecht permeabel. Hinzu kommt, dass die in den Erdölbohrungen angetroffenen Wässer stark mineralisiert sind und z.T. Schwefelwasserstoff führen.

Eine Ausnahme macht hier der *obere Muschelkalk*, dessen grosse Wasserführung insbesondere im Jura in verschiedenen Bohrungen nachgewiesen wurde (Kaiseraugst, Pratteln). Eine Statistik über Permeabilität und Ergiebigkeit des oberen Muschelkalkes hat SCHMASSMANN (1978) aufgrund von 43 Wasserfassungen und Versuchsbohrungen in den Kantonen Baselland und Aargau zusammengestellt. Danach beträgt die Ergiebigkeit im Mittel 74 l/sec; sie hängt jedoch stark von der örtlichen Klüftung und Verkarstung ab. Die Mineralisation kann Werte bis einige g/l erreichen.

6.5 *Grenzbereich Trias zu Permokarbon bzw. Kristallin*

Dieser Komplex umfasst den Basissandstein des Muschelkalkes (Melser Sandstein), den Buntsandstein, Arkosen und Sandsteine des Permokarbons sowie Granitzersatz. In diesen Formationen wurden verschiedentlich gute Porositäten und Permeabilitäten beobachtet. Ihre Mächtigkeit schwankt regional sehr stark von praktisch 0 m bis mehrere hundert Meter. Für die Wassergewinnung dürfte dieser

Zone nicht nur für das Mittelland, sondern auch für den Jura eine bedeutende Rolle zukommen. Die Wasserführung dieses Horizontes beschränkt sich auf den postherzynischen Verwitterungshorizont des Altkristallins und auf die permokarbonischen Muldenfüllungen, ferner auf den Bereich von Störungszonen. Thermalwässer aus dem Kristallin sind in Säckingen (BRD) und Zurzach bekannt, aus dem Buntsandstein in Grenzach und Kaiseraugst. Wie im Mesozoikum weist die Mineralisation meist hohe Werte auf.

6.6 *Alpenrandgebiet*

Bekanntlich weist eine grosse Zahl der Speichergesteine eine generelle Abnahme der primären Speicherqualitäten zu den Alpen hin auf. Sekundärporosität und -permeabilität können aber lokal stark angehoben sein, wofür z. B. die Resultate der Erdölbohrung Dornbirn (Österreich) sprechen, wo heisses Wasser mit überhydrostatischem Druck aus der subalpinen Molasse austrat.

Eine geothermische Prospektion dürfte aber in dieser Zone mit einem erheblich höheren Risiko behaftet sein als im Mittelland selbst. Dafür kann man wesentlich höhere Formationstemperaturen erwarten (>100 °C, vgl. Fig. 5–7). Es ist zu hoffen, dass die Erdölbohrungen im Alpenrandgebiet Testresultate in dieser Richtung liefern werden.

7. Zusammenfassung, Schlussfolgerungen

Die Tiefengrundwässer des Mittellandes (unter Einschluss des Schweizer Jura) wurden einer eingehenden geothermischen Betrachtung unterzogen. Auch die hydrogeologischen Verhältnisse sowie die formationsspezifischen Eigenschaften der Aquiferspeichergesteine wurden kompiliert. Als Informationsgrundlage dienten die Resultate von zahlreichen Tiefbohrungen, von welchen schliesslich 52 Bohrungen (wovon 32 in der Schweiz) mit einer durchschnittlichen Tiefe von 1420 m für die weitere Bearbeitung ausgewählt wurden; das Untersuchungsgebiet erstreckt sich zwischen der nördlichen Landesgrenze und dem nördlichen Alpenrand.

Bestimmend für die geologische Struktur des Untersuchungsgebietes ist das Sedimentbecken im nördlichen Alpenvorland, in welchem mehrere Formationen als Aquiferspeicher identifiziert wurden. Die kristalline Unterlage des Sedimentbeckens ist in einer Isohypsenkarte dargestellt.

Die geothermischen Verhältnisse werden mit einer Gradientenkarte illustriert. Der geothermische Gradient variiert im Untersuchungsgebiet zwischen 20 °C/km und 40 °C/km, wobei für das Kartenbild tektonische Elemente verantwortlich sind, welche sich in der Oberflächengeologie kaum manifestieren, wie z. B. die Fortsetzung des Rheintalgrabens (unter dem Jura) nach Südwesten.

Eine Reihe von Isolinienkarten gibt die zu erwartenden Temperaturen an der Oberkante der folgenden Aquiferen: Obere Meeresmolasse (OMM), Tertiärbasis (Kreide/Malm), oberer Muschelkalk und Kristallin-Oberfläche, wobei sich eine generelle Zunahme gegen die Alpen (entsprechend dem Abtauchen der Formationen) manifestiert. Dargestellt wurde der Temperaturbereich 30 °C–150 °C, zusammen mit der Angabe der Tiefenlage in Abständen von 25 km (Genauigkeit der Tiefenangabe ± 0,1 km).

Die hydrogeologische Betrachtung der Wasserbewegungen in den Aquiferen ergab, dass infolge der mehrheitlich schichtparallelen Bewegungen bei geringen Neigungen (bloss einige Grad an der Nordflanke des Mittelland-Sedimentbeckens) keine nennenswerten geothermischen Anomalien zu erwarten sind.

Für eine geothermische Energienutzung sind, aufgrund der nun vorliegenden Daten, grosse Gebiete des schweizerischen Mittellandes grundsätzlich geeignet. Die noch lückenhaften Daten über Porosität (bis 20%), Permeabilität (bis einige hundert mdarcy) und Salinität (stark variabel) sind unbedingt zu ergänzen; deshalb ist es unerlässlich, dass künftig in allen schweizerischen Tiefbohrungen spezielle *Aquifer-tests* durchgeführt werden. Auch sind die geothermischen Karten durch Berücksichtigung der Resultate aus neuen Tiefbohrungen weiter zu verfeinern, was mit den vorhandenen Computerprogrammen ohne grossen Arbeitsaufwand laufend erfolgen kann.

Verdankungen

Die vorliegende Arbeit basiert im wesentlichen auf einer vom Eidgenössischen Amt für Energiewirtschaft 1978 in Auftrag gegebenen Studie «Sammlung, Kompilation und Interpretation geothermischer Daten in der Schweiz» sowie auf einem Vortrag «Die Tiefengrundwässer des schweizerischen Mittellandes aus geothermischer Sicht» (L. Rybach & U.P. Büchi), gehalten an der Schweizerischen Hydrogeologen-Tagung (Olten, 24.November 1977). Für die Vermittlung der Bohrlochdaten möchten wir dem Konsortium Untertagespeicher sowie den Firmen der schweizerischen Erdölforschung bestens danken, so der Swisspetrol und ihren Beteiligungsgesellschaften: SEAG, SA des Hydrocarbures, LEAG, Bernische Erdöl AG, Jura Vaudois Pétrole SA, Jura Bernois Pétrole SA, Jura Soleurois Pétrole SA, Baselland Petrol AG, und ihren Erdölpartnern: BEB Gewerkschaften Brigitta und Elwerath Betriebsführungsgesellschaft mbH, Elf-Aquitaine (Suisse), Shell Switzerland/Exploration. Besonderer Dank gebührt Herrn Dr. E. Klingelé (Institut für Geophysik, ETHZ) für seine stete Hilfe bei der Darstellung von Karten mittels Computer.

LITERATURVERZEICHNIS

BEB Gewerkschaften Brigitta und Elwerath Betriebsführungsgesellschaft mbH (1979): *Auf der Suche nach Erdgas und Erdöl in der Schweiz* (12 S., mit geol. Profil). - Hannover.

BULLARD, E.C., & NIBLETT, E.R. (1951): *Terrestrial heat flow in England.* - Monogr. Not. r. astr. Soc. geophys. Suppl. *6*, 222-238.

BÜCHI, U.P. (1975): *Wasser- und Energiegewinnung aus der Oberen Meeresmolasse und dem Mesozoikum.* - Inst. bauwiss. Forsch. *34*, 16 S.

BÜCHI, U.P., & SCHLANKE, S. (1977): *Zur Paläogeographie der schweizerischen Molasse.* - Erdöl-Erdgas-Z. *93*, 57-69.

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.* - Stuttgart.

HORVÁTH, F., BODRI, L., & OTTLIK, P. (1979): *Geothermics of Hungary and the tectonophysics of the Pannonian Basin "Red Spot".* In: ČERMÁK, V., & RYBACH, L. (Ed.): *Terrestrial Heat Flow in Europe.* - Springer, Heidelberg.

JAFFÉ, F., BENOIT, F., & ROUX, D. (1977a): *Low enthalpy geothermal energy development in Switzerland: The thermal spring of Lavey and its utilisation.* - Proceedings of the International Congress on Thermal Waters, Geothermal Energy and the Volcanism of the Mediterranean Area *I*, 268-274.

JAFFÉ, F., RYBACH, L., & VUATAZ, F. (1977b): *Thermal springs in Switzerland and their relation to seismotectonic features.* - Proceedings of the International Congress on Thermal Waters, Geothermal Energy and the Volcanism of the Mediterranean Area *I*, 275-285.

KRÜSI, H.R., BODMER, PH., & RYBACH, L. (1978): *Sammlung, Kompilation und Interpretation geothermischer Daten in der Schweiz, Schlussbericht.* - Eidg. Amt für Energiewirtschaft (Bern).

LAUER, J.P. (1976): *Isothermes profondes et «effets de socle».* - Bull. Soc. géol. France *5*, 1139-1149.

LEMCKE, K. (1977): *Übertiefe Grundwässer im Süddeutschen Alpenvorland.* - Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. *42*, 9-18.

LEMCKE, K., & TUNN, W. (1956): *Tiefenwässer in der süddeutschen Molasse und in ihrer verkarsteten Malmunterlage.* - Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. *27*, 9-14.

LEMCKE, K., BÜCHI, U.P., & WIENER, G. (1968): *Einige Ergebnisse der Erdölexploration auf die mittelländische Molasse der Zentralschweiz.* - Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. *87*, 15-34.

LEWIS, T.J., & BECK, A.E. (1977): *Analysis of heat flow data - Detailed observations in many holes in small areas.* - Tectonophysics *41*, 41-53.

MENARD, G. (1979): *Relations entre structures profondes et structures superficielles dans le sud-est de la France. Essai d'utilisation de données géophysiques.* - Thèse Univ. Grenoble.

Motor Columbus Ingenieurunternehmung AG (1977): *Geothermische Studie der Warmwasserzone Zurzach-Lostorf-Baden.* - Schriftenreihe der Eidg. Kommission für die Gesamtenergiekonzeption (Bern), Nr. 14.

PASQUIER, F., & PERSOZ, F. (1977): *Oxydation des calcaires mésozoiques sous la molasse du plateau suisse et paleokarst.* - Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. *43*, 21-28.

PAVONI, N. (1977): *Erdbeben im Gebiet der Schweiz.* - Eclogae geol. Helv. *70*, 301-370.

RYBACH, L., WERNER, D., MÜLLER, ST., & BERSET, G. (1977): *Heat flow, heat production and crustal dynamics in the Central Alps, Switzerland.* - Tectonophysics *41*, 113-126.

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.

SCHMASSMANN, H.J. (1978): *Bericht über die Hydrogeologie und die Geothermik tiefer Felsgrundwässer des nordwestschweizerischen Juras und des Rheintalgrabens.* - Eidg. Amt für Energiewirtschaft (Bern).

STEGENA, L. (1976): *The variation of temperature with depth in the Pannonian Basin.* In: ÁDÁM, A. (Ed.): *Geoelectric and Geothermal Studies* (S. 423-438). - Akademie-Verlag, Budapest.

STÜRZINGER, P., & HAEFELI, CH. (1977): *Geothermische Energie: Die Gewinnung von Wärme aus der Oberen Meeresmolasse mit Wärmepumpen.* - Wass., Energie, Luft *69*, 225-227.

WAHL, E.F. (1977): *Geothermal Energy Utilisation.* - Wiley & Sons, New York.

WERNER, D. (1975): *Probleme der Geothermik am Beispiel des Rheingrabens.* - Diss. Univ. Karlsruhe.

ZIMMERMANN, M.A., KÜBLER, B., OERTLY, H.J., FRAUTSCHI, J.-M., MONNIER, F., DERES, F., & MONBARON, M. (1976): *Molasse d'eau douce inférieur du plateau Suisse; Subdivision par l'indice de détritisme. Essai de datation par nannofossiles.* - Bull. Cent. Rech. Pau - SNPA *10*, 585-625.